



**Τεχνολογικό
Εκπαιδευτικό
Ίδρυμα Κρήτης**

**Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό
Ίδρυμα Κρήτης
Παράρτημα Χανίων
Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών**

Πτυχιακή Εργασία

**Μελέτη Συστήματος
LTE και LTE-Advanced για
Κινητές Επικοινωνίες Τέταρτης Γενιάς**



**Της φοιτήτριας
Κατσαβιδάκι Μαρίας
Α. Μ. 3980**

**Επιβλέπων Καθηγητής
Δρ. Κόκκινος Ευάγγελος**

Χανιά 2013

Μελέτη Συστήματος LTE και LTE-Advanced για Κινητές Επικοινωνίες Τέταρτης Γενιάς

Κατσαβιδάκι Μαρία
Επιβλέπων: Δρ. Κόκκινος Ευάγγελος

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή αναφέρεται στην τεχνολογία τέταρτης γενιάς, δηλαδή στο Long Term Evolution (LTE) και LTE-Advanced. Γίνεται μια ιστορική αναδρομή στα προηγούμενα συστήματα κινητής τηλεφωνίας, GSM και WCDMA. Στην συνέχεια, περιγράφεται η αρχιτεκτονική του LTE και τα πρωτόκολλα επικοινωνιών του. Γίνεται αναφορά στα προβλήματα του ασύρματου καναλιού (εξασθένιση και διασυμβολικές παρεμβολές) και πώς αυτά αντιμετωπίζονται με τις ψηφιακές τεχνικές εκτίμησης καναλιού, ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων. Ακόμα, περιγράφεται η Πολλαπλή Πρόσβαση με Ορθογωνική Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας, OFDMA και οι τεχνικές πολλαπλών κεραιών: Επεξεργασία Διαφορισμού, Χωρική Πολύπλεξη και Beamforming. Στη συνέχεια περιγράφονται τα λογικά, μεταφοράς και φυσικά κανάλια. Επιπλέον παρουσιάζεται η Διαδικασία Αναγνώρισης Κυψέλης και οι διαδικασίες λήψης και εκπομπής πακέτων δεδομένων, καθώς και η διαδικασία αίτησης του κινητού για απόκτηση πόρων του δικτύου. Τέλος, αναφέρεται στα πρωτόκολλα Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο (MAC) και Ελέγχου Ραδιοζεύξης (RLC) του Επιπέδου 2 και στις διαδικασίες ενεργοποίησης και απενεργοποίησης του κινητού.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: LTE, LTE-Advanced, 4G, UMTS, OFDMA, MIMO, FDD, TDD, eNB, Επεξεργασία Διαφορισμού, Χωρική Πολύπλεξη, Beamforming.

Study of LTE and LTE-Advanced System for Fourth Generation Mobile Communications

Katsavidaki Maria
Supervisor professor: Kokkinos Evangelos

Resume

This work focuses on the fourth generation technology, namely the Long Term Evolution (LTE) and LTE-Advanced. Firstly, there is a historical overview of the former mobile telephone systems, GSM and WCDMA. Secondly, there is an analysis of the architecture of LTE and its communication protocols. The wireless channel's problems (fading and inter-symbol interference) are also examined and emphasis is given on how they can be solved with the help of the digital techniques of channel estimation, error detection and correction. Furthermore, there is a description of the Orthogonal Division Multiple Access, OFDMA and multiple antenna techniques: Diversity Processing, Spatial Multiplexing and Beamforming. The logical, transport and physical channels are examined, as well. The Cell Acquisition Procedure and the packet data transmission and reception procedures are also presented, along with the mobile's request procedure for obtaining network resources. Last, there is a reference to the Layer's 2 Medium Access Control (MAC) and Radio Link Control (RLC) protocols and the mobile's power-on and power-off procedures.

KEYWORDS: LTE, LTE-Advanced, 4G, UMTS, OFDMA, MIMO, FDD, TDD, eNB, Diversity Processing, Spatial Multiplexing, Beamforming.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	13
Κατάλογος συντομογραφιών	14
1 Εισαγωγή	18
1.1 Αρχιτεκτονική Αξιολόγηση των UMTS και GSM	18
1.1.1 Αρχιτεκτονική Υψηλού Επιπέδου	18
1.1.2 Αρχιτεκτονική Ασύρματου Δικτύου Πρόσβασης	20
1.1.3 Αρχιτεκτονική του Δικτύου Κορμού	22
1.1.4 Πρωτόκολλα Επικοινωνιών	22
1.2 Ιστορία των Συστημάτων Κινητών Τηλεπικοινωνιών	24
1.2.1 Από το 1G στο 3G	24
1.2.2 Συστήματα Τρίτης Γενιάς	25
1.3 Η Ανάγκη για LTE	26
1.3.1 Η Ανάπτυξη των Δεδομένων Κινητής Τηλεφωνίας	26
1.3.2 Χωρητικότητα ενός Συστήματος Κινητών Τηλεπικοινωνιών	27
1.3.3 Αύξηση τη Χωρητικότητα του Συστήματος	28
1.3.4 Επιπλέον Κίνητρα	29
1.4 Από το UMTS στο LTE	30
1.4.1 Αρχιτεκτονική Υψηλού Επιπέδου του LTE	30
1.4.2 Long Term Evolution	31
1.4.3 Εξέλιξη Αρχιτεκτονικής Συστήματος	32
1.5 Από το LTE στο LTE-Advanced	33
1.5.1 Οι Απαιτήσεις της ITU για 4G	33
1.5.2 Οι Απαιτήσεις του LTE-Advanced	34
1.5.3 Επικοινωνιακά Συστήματα 4G	35
1.5.4 Η Σημασία του 4G	35
1.6 Οι 3GPP Προδιαγραφές για το LTE	36
Αναφορές	38
2 Εξέλιξη Αρχιτεκτονικής Συστήματος	40
2.1 Η Αρχιτεκτονική του LTE	40
2.1.1 Αρχιτεκτονική Υψηλού Επιπέδου	40
2.1.2 Ο Εξοπλισμός του Χρήστη	40
2.1.3 Εξελιγμένο Επίγειο Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης UMTS	42
2.1.4 Εξελιγμένος Πυρήνας Πακέτου	43
2.1.5 Αρχιτεκτονική Περιαγωγής	45
2.1.6 Περιοχές Δικτύου	46
2.1.7 Αρίθμηση, Διευθυνσιοδότηση και Ταυτοποίηση	46
2.2 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας	49
2.2.1 Μοντέλο Πρωτοκόλλου	49
2.2.2 Πρωτόκολλα Μεταφοράς Διεπαφής Αέρα	50
2.2.3 Πρωτόκολλα Μεταφοράς Σταθερού Δικτύου	50
2.2.4 Πρωτόκολλα Επιπέδου Χρήστη	51
2.2.5 Πρωτόκολλα Σηματοδότησης	52
2.3 Παράδειγμα Ροών Πληροφοριών	53

2.3.1	Σηματοδότηση AS	53
2.3.2	Σηματοδότηση NAS	54
2.3.3	Μεταφορά Δεδομένων	55
2.4	Φορέας Διαχείρισης	56
2.4.1	Ο Φορέας EPS	56
2.4.2	Σηράγωση με Χρήση GTP	59
2.4.3	Σηράγωση με Χρήση των GRE και PMIP	60
2.4.4	Ραδιο-φορείς Σηματοδοσίας	61
2.5	Διαγράμματα Κατάστασης	61
2.5.1	Διαχείριση Κινητικότητας EPS	61
2.5.2	Διαχείριση Σύνδεσης EPS	62
2.5.3	Έλεγχος Ασύρματων Πόρων	63
2.6	Κατανομή Φάσματος	65
	Αναφορές	67
3	Ψηφιακές Ασύρματες Επικοινωνίες	70
3.1	Ασύρματη Μετάδοση και Λήψη	70
3.1.1	Μετάδοση του Σήματος	70
3.1.2	Λήψη Σήματος	72
3.1.3	Εκτίμηση Καναλιού	73
3.1.4	Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης	73
3.1.5	Καταστάσεις FDD και TDD	75
3.2	Πολυδιαδρομή, Εξασθένιση και Διασυμβολικές Παρεμβολές	76
3.2.1	Πολυδιαδρομή και Εξασθένιση	76
3.2.2	Διασυμβολική Παρεμβολή	79
3.3	Διαχείριση Λαθών	80
3.3.1	Εμπρόσθια Διόρθωση Λαθών	80
3.3.2	Αυτόματη Αίτηση Επανάληψης	81
3.3.3	Υβριδική Αυτόματη Αίτηση Επανάληψης	82
	Αναφορές	84
4	Πολλαπλή Πρόσβαση με Ορθογωνική Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας	
4.1	Ορθογώνια Πολύπλεξη Διαίρεσης Συχνότητας	85
4.1.1	Μείωση της ISI χρησιμοποιώντας OFDM	85
4.1.2	Ο Πομπός OFDM	86
4.1.3	Αρχικό Λογικό Διάγραμμα	89
4.2	OFDMA σε ένα Κυψελοειδές Δίκτυο Κινητών	90
4.2.1	Πολλαπλή Πρόσβαση	90
4.2.2	Κλασματική Επαναχρησιμοποίηση Συχνότητας	91
4.2.3	Εκτίμηση Καναλιού	92
4.2.4	Εισαγωγή Κυκλικού Προθέματος	93
4.2.5	Χρήση του Πεδίου Συχνότητας	95
4.2.6	Επιλογή Απόστασης Υπο-φέρουσας	96
4.3	Ενιαία Φέρουσα Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης Συχνότητας	97

4.3.1	Διακυμάνσεις Ισχύος από το OFDMA	97
4.3.2	Λογικό Διάγραμμα της SC-FDMA	98
	Αναφορές	101
5	Τεχνικές Πολλαπλών Κεραιών	102
5.1	Επεξεργασία Διαφορισμού	102
5.1.1	Διαφορική Λήψη	102
5.1.2	Διαφορική Μετάδοση Κλειστού Βρόχου	103
5.1.3	Διαφορική Μετάδοση Ανοικτού Βρόχου	104
5.2	Χωρική Πολύπλεξη	105
5.2.1	Αρχές Λειτουργίας	105
5.2.2	Χωρική Πολύπλεξη Ανοικτού Βρόχου	108
5.2.3	Χωρική Πολύπλεξη Κλειστού Βρόχου	110
5.2.4	Αναπαράσταση Πίνακα	112
5.2.5	Θέματα Εφαρμογής	115
5.2.6	MIMO Πολλαπλού Χρήστη	115
5.3	Beamforming	117
5.3.1	Αρχές Λειτουργίας	117
5.3.2	Σύστημα Διεύθυνσης Δέσμης	119
5.3.3	Beamforming Διπλού Επιπέδου	119
5.3.4	Αναθεωρημένος MU-MIMO Κάτω Ζεύξης	120
	Αναφορές	121
6	Αρχιτεκτονική της LTE Διεπαφής Αέρα	122
6.1	Στοιβα Πρωτοκόλλων Διεπαφής Αέρα	122
6.2	Λογικά, Μεταφοράς και Φυσικά Κανάλια	123
6.2.1	Λογικά Κανάλια	123
6.2.2	Κανάλια Μεταφοράς	124
6.2.3	Φυσικά Κανάλια Δεδομένων	126
6.2.4	Πληροφορίες ελέγχου	126
6.2.5	Φυσικά Κανάλια Ελέγχου	127
6.2.6	Φυσικά Σήματα	128
6.2.7	Ροές Πληροφοριών	129
6.3	Ο Πόρος Δικτύου	129
6.3.1	Δομή Σχισμής	129
6.3.2	Δομή Πλαισίου	131
6.3.3	Προήγηση Χρόνου Άνω Ζεύξης	132
6.3.4	Δομή Πλέγματος Πόρου	134
6.3.5	Επιλογές Εύρους Ζώνης	134
6.4	Μετάδοση Πολλαπλών Κεραιών	135
6.4.1	Θύρες Κεραιών Κάτω Ζεύξης	135
6.4.2	Τρόποι Μετάδοσης Κάτω Ζεύξης	137
6.5	Αντιστοίχιση RE	137
6.5.1	Αντιστοίχιση RE Κάτω Ζεύξης	137

6.5.2	<i>Αντιστοίχιση RE Άνω Ζεύξης</i>	138
	Αναφορές	140
7	Αναγνώριση Κυψέλης	141
7.1	Διαδικασία Αναγνώρισης	141
7.2	Σήματα Συγχρονισμού	142
7.2.1	<i>Φυσική Ταυτότητα Κυψέλης</i>	142
7.2.2	<i>Πρωτεύον Σήμα Συγχρονισμού</i>	143
7.2.3	<i>Δευτερεύον Σήμα Συγχρονισμού</i>	144
7.3	Σήματα Αναφοράς Κάτω Ζεύξης	144
7.4	Φυσικό Κανάλι Εκπομπής	146
7.5	Φυσικό Κανάλι Ελέγχου του Δείκτη Διαμόρφωσης	147
7.6	Πληροφορίες Συστήματος	148
7.6.1	<i>Οργάνωση Πληροφοριών Συστήματος</i>	148
7.6.2	<i>Μετάδοση και Λήψη των Πληροφοριών Συστήματος</i>	149
7.7	Διαδικασίες Μετά την Αναγνώριση Αναφορές	150
8	Αποστολή και Λήψη Δεδομένων	152
8.1	Διαδικασίες Μετάδοσης Δεδομένων	152
8.1.1	<i>Αποστολή και Λήψη Κάτω Ζεύξης</i>	152
8.1.2	<i>Αποστολή και Λήψη Άνω Ζεύξης</i>	154
8.1.3	<i>Semi Persistent Scheduling</i>	155
8.2	Μετάδοση Μηνυμάτων Χρονοδιαγράμματος για το PDCCH	156
8.2.1	<i>Πληροφορίες Ελέγχου Κάτω Ζεύξης</i>	156
8.2.2	<i>Κατανομή Πόρων</i>	158
8.2.3	<i>Παράδειγμα: DCI Μορφή 1</i>	159
8.2.4	<i>Προσωρινά Αναγνωριστικά Ασύρματου Δικτύου</i>	160
8.2.5	<i>Μετάδοση και Λήψη του PDCCH</i>	161
8.3	Μετάδοση Δεδομένων στα PDSCH και PUSCH	162
8.3.1	<i>Επεξεργασία Μεταφοράς Καναλιού</i>	162
8.3.2	<i>Επεξεργασία Φυσικού Καναλιού</i>	164
8.4	Μετάδοση Δεικτών Υβριδικής ARQ στο PHICH	165
8.4.1	<i>Εισαγωγή</i>	165
8.4.2	<i>Αντιστοίχιση Στοιχείου Πόρου του PHICH</i>	166
8.4.3	<i>Επεξεργασία Φυσικού Καναλιού του PHICH</i>	167
8.5	Πληροφορίες Ελέγχου Άνω Ζεύξης	167
8.5.1	<i>Επιβεβαιώσεις Υβριδικής ARQ</i>	167
8.5.2	<i>Δείκτης Ποιότητας Καναλιού</i>	168
8.5.3	<i>Τάξη Ένδειξης</i>	169
8.5.4	<i>Δείκτης Πίνακα Προκωδικοποίησης</i>	169
8.5.5	<i>Μηχανισμοί Αναφοράς Κατάστασης Καναλιού</i>	170
8.5.6	<i>Αιτήματα Χρονοδιαγράμματος</i>	171
8.6	Μετάδοση UCI στο PUCCH	171

8.6.1	<i>Μορφές PUCCH</i>	171
8.6.2	<i>Πόροι PUCCH</i>	173
8.6.3	<i>Επεξεργασία Φυσικού Καναλιού του PUCCH</i>	174
8.7	Σήματα Αναφοράς Άνω Ζεύξης	174
8.7.1	<i>Σήμα Αναφοράς Αποδιαμόρφωσης</i>	174
8.7.2	<i>Σήμα Αναφοράς Ήχησης</i>	175
8.8	Έλεγχος Ισχύος Άνω Ζεύξης	176
8.8.1	<i>Υπολογισμός Ισχύος Άνω Ζεύξης</i>	176
8.8.2	<i>Εντολές Ελέγχου Ισχύος Άνω Ζεύξης</i>	177
8.9	Ασυνεχής Λήψη	178
8.9.1	<i>Ασυνεχής Λήψη και Αναζήτηση στην RRC_IDLE</i>	178
8.9.2	<i>Ασυνεχής Λήψη σε RRC_CONNECTED</i>	179
	Αναφορές	180
9	Τυχαία Πρόσβαση	182
9.1	Μετάδοση Επικεφαλίδων Τυχαίας Πρόσβασης στο PRACH	182
9.1.1	<i>Αντιστοίχιση Στοιχείου Πόρου</i>	182
9.1.2	<i>Παραγωγή Ακολουθίας Επικεφαλίδας</i>	184
9.1.3	<i>Μετάδοση Σήματος</i>	184
9.2	Διαδικασία Non Contention Based	185
9.3	Διαδικασία Contention Based	186
	Αναφορές	188
10	Στρώμα 2 Διεπαφής Αέρα	189
10.1	Πρωτόκολλο MAC	189
10.1.1	<i>Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλου</i>	189
10.1.2	<i>Εντολές Προήγησης Χρόνου</i>	190
10.1.3	<i>Αναφορά Κατάστασης Καταχωρητή</i>	191
10.1.4	<i>Αναφορά Περιθωρίου Ισχύος</i>	192
10.1.5	<i>Πολύπλεξη και Αποπολύπλεξη</i>	192
10.1.6	<i>Προτεραιότητα Λογικού Καναλιού</i>	193
10.1.7	<i>Χρονοδιάγραμμα Μεταδόσεων στη Διεπαφή Αέρα</i>	193
10.2	Πρωτόκολλο Ελέγχου Ραδιοζεύξης	195
10.2.1	<i>Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλου</i>	195
10.2.2	<i>Διαφανής Λειτουργία</i>	195
10.2.3	<i>Μη Αναγνωρισμένη Λειτουργία</i>	196
10.2.4	<i>Αναγνωρισμένη Λειτουργία</i>	197
10.3	Πρωτόκολλο Σύγκλισης Πακέτων Δεδομένων	198
10.3.1	<i>Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλου</i>	198
10.3.2	<i>Συμπίεση Κεφαλίδας</i>	199
10.3.3	<i>Πρόληψη Απώλειας Πακέτων Κατά Την Μεταπομπή</i>	200
	Αναφορές	201
11	Διαδικασίες Ενεργοποίησης και Απενεργοποίησης	202
11.1	Ακολουθία Ενεργοποίησης	202

11.2	Επιλογή Δικτύου και Κυψέλης	203
	11.2.1 <i>Επιλογή Δικτύου</i>	203
	11.2.2 <i>Επιλογή Κλειστής Ομάδας Συνδρομητή</i>	204
	11.2.3 <i>Επιλογή Κυψέλης</i>	205
11.3	Εγκατάσταση Σύνδεσης RRC	206
	11.3.1 <i>Βασική Διαδικασία</i>	206
	11.3.2 <i>Σχέση με Άλλες Διαδικασίες</i>	208
11.4	Διαδικασία Σύνδεσης	209
	11.4.1 <i>Κατανομή Διεύθυνσης IP</i>	209
	11.4.2 <i>Επισκόπηση της Διαδικασίας Επισύναψης</i>	210
	11.4.3 <i>Αίτημα Επισύναψης</i>	210
	11.4.4 <i>Διαδικασίες Εξακρίβωσης και Ασφάλειας</i>	212
	11.4.5 <i>Ενημέρωση Θέσης</i>	213
	11.4.6 <i>Δημιουργία Φορέα Προεπιλογής</i>	214
	11.4.7 <i>Αποδοχή Επισύναψης</i>	215
	11.4.8 <i>Ενημέρωση Φορέα Προεπιλογής</i>	217
11.5	Διαδικασία Αποσύνδεσης	218
	Αναφορές	219

Πρόλογος

Η πτυχιακή αυτή μιλáει για το κυρίαρχο 4G σύστημα κινητής τηλεφωνίας στον κόσμο, το LTE. Στόχος είναι να δοθεί στον αναγνώστη μια συνοπτική εισαγωγή για την τεχνολογία που χρησιμοποιεί το LTE. Καλύπτεται το σύνολο του συστήματος, τόσο οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη ραδιοεπικοινωνία μεταξύ του σταθμού βάσης και του κινητού τηλεφώνου, όσο και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά δεδομένων και μηνυμάτων σηματοδοσίας σε όλο το δίκτυο.

Το Κεφάλαιο 1 είναι μια εισαγωγή, που σχετίζεται με προηγούμενα LTE συστήματα κινητής τηλεπικοινωνίας και καθορίζει τις ανάγκες και τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της. Το Κεφάλαιο 2 καλύπτει την αρχιτεκτονική του συστήματος, ιδίως τα στοιχεία του υλικού και πρωτόκολλα επικοινωνίας που περιέχει και τη χρήση του ραδιοφάσματός του. Το Κεφάλαιο 3 εξετάζει τις τεχνικές ασύρματης μετάδοσης που το LTE έχει κληρονομήσει από τα προηγούμενα συστήματα κινητών τηλεπικοινωνιών ενώ τα Κεφάλαια 4 και 5 περιγράφουν τις πιο πρόσφατες τεχνικές Ορθογώνιας Πολύπλεξης Διαίρεσης Συχνότητας και κεραιών πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων. Το Κεφάλαιο 6 είναι μια υψηλού επιπέδου περιγραφή της διεπαφής αέρα, ενώ το Κεφάλαιο 7 αφορά τις χαμηλού επιπέδου διαδικασίες που ένα κινητό τηλέφωνο χρησιμοποιεί όταν ενεργοποιείται, για να ανακαλύψει τους LTE σταθμούς βάσης που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση. Το Κεφάλαιο 8 καλύπτει τις χαμηλού επιπέδου διαδικασίες που ο σταθμός βάσης και το κινητό τηλέφωνο χρησιμοποιούν για τη μετάδοση και λήψη πληροφοριών, ενώ το Κεφάλαιο 9 καλύπτει μια ειδική διαδικασία, τυχαίας προσπέλασης, με την οποία το κινητό τηλέφωνο μπορεί να επικοινωνήσει με έναν σταθμό βάσης χωρίς προηγούμενο χρονοπρογραμματισμό. Το Κεφάλαιο 10 περιλαμβάνει τα υψηλότερα επίπεδα διεπαφής αέρα, δηλαδή τα πρωτόκολλα μέσου ελέγχου πρόσβασης, ελέγχου ραδιοζεύξης και σύγκλισης πακέτων δεδομένων. Τέλος στο κεφάλαιο 11, περιγράφουμε τις διαδικασίες υψηλού επιπέδου που ένα κινητό τηλέφωνο χρησιμοποιεί όταν ενεργοποιείται, για να καταχωρηθεί με το δίκτυο και να αποκαταστήσει την επικοινωνία με τον έξω κόσμο.

Κατάλογος συντομογραφιών

16-QAM 16	Quadrature Amplitude Modulation
1G	First Generation
1xRTT	1x Radio Transmission Technology
2G	Second Generation
3G	Third Generation
3GPP	Third Generation Partnership Project
3GPP2	Third Generation Partnership Project 2
4G	Fourth Generation
64-QAM	64 Quadrature Amplitude Modulation
AM	Acknowledged Mode
AMBR	Aggregate Maximum Bit Rate
AMR	Adaptive Multi Rate
APN	Access Point Name
APN-AMBR	Per APN Aggregate Maximum Bit Rate
ARQ	Automatic Repeat Request
AuC	Authentication Centre
BCCH	Broadcast Control Channel
BCH	Broadcast Channel
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BSC	Base Station Controller
BSR	Buffer Status Report
BTS	Base Transceiver Station
CBC	Cell Broadcast Centre
CBS	Cell Broadcast Service
CCCH	Common Control Channel
CCE	Control Channel Element
CDMA	Code Division Multiple Access
CFI	Control Format Indicator
CP	Cyclic Prefix
CQI	Channel Quality Indicator
CRC	Cyclic Redundancy Check
C-RNTI	Cell Radio Network Temporary Identifier
CS	Circuit Switched
CSG	Closed Subscriber Group
CSI	Channel State Information
dB	Decibel
dBm	Decibels relative to one milliwatt
DCCH	Dedicated Control Channel
DCI	Downlink Control Information
DFT	Discrete Fourier Transform
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DL	Downlink
DL-SCH	Downlink Shared Channel
DRS	Demodulation Reference Signal
DRX	Discontinuous Reception
DTCH	Dedicated Traffic Channel
ECGI	E-UTRAN Cell Global Identifier
ECI	E-UTRAN Cell Identity
ECM	EPS Connection Management
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EIR	Equipment Identity Register
EMM	EPS Mobility Management
eNB	Evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System

E-RAB	Evolved Radio Access Bearer
ESM	EPS Session Management
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
ETWS	Earthquake and Tsunami Warning System
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
EV-DO	Evolution Data Optimized
FCC	Federal Communications Commission
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFT	Fast Fourier Transform
FTP	File Transfer Protocol
GBR	Guaranteed Bit Rate
GERAN	GSM EDGE Radio Access Network
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GP	Guard Period
GPRS	General Packet Radio Service
GRE	Generic Routing Encapsulation
GSM	Global System for Mobile Communications
GTP	GPRS Tunnelling Protocol
GTP-C	GPRS Tunnelling Protocol Control Part
GTP-U	GPRS Tunnelling Protocol User Part
GUMMEI	Globally Unique MME Identifier
GUTI	Globally Unique Temporary Identity
HARQ	Hybrid ARQ
HeNB	Home evolved Node B
HI	Hybrid ARQ Indicator
HLR	Home Location Register
HRPD	High Rate Packet Data
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
I	In phase
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IMEI	International Mobile Equipment Identity
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IMT	International Mobile Telecommunications
IP	Internet Protocol
IP-CAN	IP Connectivity Access Network
IPv4	Internet Protocol version 4
IPv6	Internet Protocol version 6
ISI	Inter Symbol Interference
ITU	International Telecommunication Union
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	LTE-Advanced
MAC	Medium Access Control
MBMS	Multimedia Broadcast/Multicast Service
MCC	Mobile Country Code
MCCH	Multicast Control Channel
MCH	Multicast Channel
ME	Mobile Equipment
MGW	Media Gateway
MIB	Master Information Block
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MIP	Mobile IP
MM	Mobility Management
MME	Mobility Management Entity

MMEC	MME Code
MMEGI	MME Group Identity
MMEI	MME Identifier
MMSE	Minimum Mean Square Error
MNC	Mobile Network Code
M-RNTI	MBMS Radio Network Temporary Identifier
MSC	Mobile Switching Centre
MT	Mobile Termination
MTCH	Multicast Traffic Channel
M-TMSI	M Temporary Mobile Subscriber Identity
MU-MIMO	Multiple User MIMO
NACK	Negative Acknowledgement
NAS	Non Access Stratum
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OSI	Open Systems Interconnection
PBCH	Physical Broadcast Channel
PBR	Prioritized Bit Rate
PCCH	Paging Control Channel
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
PCH	Paging Channel
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDN	Packet Data Network
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PDU	Protocol Data Unit
P-GW	Packet Data Network Gateway
PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel
PL	Path Loss/Propagation Loss
PLMN	Public Land Mobile Network
PLMN-ID	Public Land Mobile Network Identity
PMCH	Physical Multicast Channel
PMI	Precoding Matrix Indicator
PMIP	Proxy Mobile IP
PRACH	Physical Random Access Channel
PRB	Physical Resource Block
P-RNTI	Paging Radio Network Temporary Identifier
PS	Packet Switched
PSS	Primary Synchronization Signal
PSTN	Public Switched Telephone Network
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
Q	Quadrature
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RACH	Random Access Channel
RADIUS	Remote Authentication Dial In User Service
RA-RNTI	Random Access Radio Network Temporary Identifier
RB	Resource Block
RBG	Resource Block Group
RE	Resource Element
REG	Resource Element Group
RF	Radio Frequency
RI	Rank Indication
RLC	Radio Link Control
RNC	Radio Network Controller
RNTI	Radio Network Temporary Identifier
ROHC	Robust Header Compression
R-PDCCH	Relay Physical Downlink Control Channel

RRC	Radio Resource Control
RS	Reference Signal
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RTP	Real Time Protocol
S1-AP	S1 Application Protocol
SAE	System Architecture Evolution
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SCTP	Stream Control Transmission Protocol
SDU	Service Data Unit
SNFN	System Frame Number
SGSN	Serving GPRS Support Node
S-GW	Serving Gateway
SIB	System Information Block
SIM	Subscriber Identity Module
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SI-RNTI	System Information Radio Network Temporary Identifier
SMS	Short Message Service
SMTP	Simple Mail Transfer Protocol
SPS	Semi Persistent Scheduling
SR	Scheduling Request
SRB	Signalling Radio Bearer
SRS	Sounding Reference Signal
SSS	Secondary Synchronization Signal
S-TMSI	S temporary Mobile Subscriber Identity
SU-MIMO	Single User MIMO
TA	Timing Advance/Tracking Area
TAC	Tracking Area Code
TAI	Tracking Area Identity
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TD-SCDMA	Time Division synchronous code division Multiple Access
TE	Terminal Equipment
TEID	Tunnel Endpoint Identifier
TFT	Traffic Flow Template
TM	Transparent Mode
TMSI	Temporary Mobile Subscriber Identity
TPC	Transmit Power Control
TTI	Transmission Time Interval
UCI	Uplink Control Information
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UE-AMBR	Per UE Aggregate Maximum Bit Rate
UICC	Universal Integrated Circuit Card
UL	Uplink
UL-SCH	Uplink Shared Channel
UM	Unacknowledged Mode
UMB	Ultra Mobile Broadband
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
USIM	Universal Subscriber Identity Module
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VLR	Visitor Location Register
VoIP	Voice over IP
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
X2-AP	X2 Application Protocol

1

Εισαγωγή

Το πρώτο μας κεφάλαιο τοποθετεί το LTE στο ιστορικό του πλαίσιο, και παραθέτει τις απαιτήσεις και τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του. Θα ξεκινήσουμε επανεξετάζοντας τις αρχιτεκτονικές των UMTS και GSM, παρουσιάζοντας κάποια από την ορολογία που χρησιμοποιούν τα δύο συστήματα. Στη συνέχεια, θα συνοψίσουμε την ιστορία των συστημάτων κινητής τηλεφωνίας, θα συζητήσουμε τα θέματα που έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη του LTE και θα δείξουμε πώς το UMTS έχει εξελιχθεί πρώτα σε LTE και στη συνέχεια σε μια βελτιωμένη έκδοση, γνωστή ως LTE-Advanced. Το κεφάλαιο κλείνει επανεξετάζοντας τη διεργασία τυποποίησης για το LTE.

1.1 Αρχιτεκτονική Αξιολόγηση των UMTS και GSM

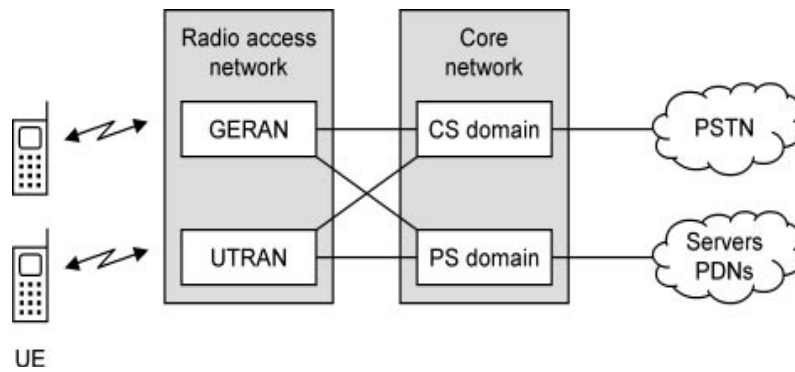
1.1.1 Αρχιτεκτονική Υψηλού Επιπέδου

Το LTE σχεδιάστηκε από μια συνεργασία εθνικών και περιφερειακών τηλεπικοινωνιακών οργανισμών τυποποίησης, γνωστή ως *Third Generation Partnership Project* (3GPP) [1] και σε πλήρη μορφή είναι γνωστό ως 3GPP Long Term Evolution. Το LTE εξελίχθηκε από ένα παλαιότερο σύστημα 3GPP, γνωστό ως το *Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών* (UMTS), το οποίο με τη σειρά του εξελίχθηκε από το *Παγκόσμιο Σύστημα για Κινητές Επικοινωνίες* (GSM). Για να θέσουμε το LTE σε πλαίσιο, θα ξεκινήσουμε εξετάζοντας τις αρχιτεκτονικές των UMTS και GSM και παρουσιάζοντας κάποια από την πιο σημαντική ορολογία.

Ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας είναι επισήμως γνωστό ως ένα *δίκτυο κινητών επικοινωνιών* (PLMN), και διοικείται από έναν *φορέα εκμετάλλευσης δικτύου* όπως η Vodafone ή η Verizon. Τα UMTS και GSM μοιράζονται μια κοινή αρχιτεκτονική δικτύου, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Υπάρχουν τρία κύρια μέρη, δηλαδή το δίκτυο κορμού, το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης και το κινητό τηλέφωνο.

Το *δίκτυο κορμού* περιέχει δύο τομείς. Ο τομέας *μεταγωγής κυκλώματος* (CS) μεταφέρει τηλεφωνικές κλήσεις σε όλη την γεωγραφική περιοχή που καλύπτει ο φορέας εκμετάλλευσης δικτύου, με τον ίδιο τρόπο όπως ένα παραδοσιακό τηλεπικοινωνιακό σύστημα σταθερής γραμμής. Επικοινωνεί με το *σταθερό δίκτυο επικοινωνιών* (PSTN) έτσι ώστε οι χρήστες να μπορούν να πραγματοποιούν κλήσεις προς σταθερά και με τους τομείς CS από άλλους φορείς εκμετάλλευσης δικτύου. Ο τομέας *μεταγωγής πακέτων* (PS) μεταφέρει ροές δεδομένων, όπως ιστοσελίδες και μηνύματα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, μεταξύ του χρήστη και εξωτερικών *δικτύων πακέτων δεδομένων* (PDNs), όπως το διαδίκτυο.

Οι δύο τομείς μεταφέρουν τις πληροφορίες τους με πολύ διαφορετικούς



Σχήμα 1.1 Αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου UMTS και GSM

τρόπους. Ο τομέας CS χρησιμοποιεί μια τεχνική, γνωστή ως *μεταγωγή κυκλώματος*, στην οποία αναιρεί μια αποκλειστική αμφίδρομη σύνδεση για κάθε μεμονωμένη κλήση τηλεφώνου, έτσι ώστε να μπορεί να μεταφέρει την πληροφορία με ένα σταθερό ρυθμό δεδομένων και ελάχιστη καθυστέρηση. Αυτή η τεχνική είναι αποτελεσματική, αλλά μάλλον ανεπαρκής: η σύνδεση έχει αρκετή χωρητικότητα για να χειριστεί το χειρότερο σενάριο κατά το οποίο και οι δύο χρήστες μιλούν την ίδια στιγμή, αλλά συνήθως είναι υπερμεγέθης. Επιπλέον, είναι ακατάλληλο για μεταφορά δεδομένων, στην οποία ο ρυθμός δεδομένων μπορεί να ποικίλει σε μεγάλο βαθμό.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος, ο τομέας PS χρησιμοποιεί μια διαφορετική τεχνική, γνωστή ως *μεταγωγή πακέτων*. Στην τεχνική αυτή, ένα ρεύμα δεδομένων χωρίζεται σε πακέτα, καθένα από τα οποία επισημαίνεται με τη διεύθυνση της απαιτούμενης συσκευής προορισμού. Εντός του δικτύου, οι *δρομολογητές* διαβάζουν τις ετικέτες διευθύνσεων των εισερχόμενων πακέτων δεδομένων και τα προωθούν προς τους αντίστοιχους προορισμούς. Οι πόροι του δικτύου μοιράζονται σε όλους τους χρήστες, οπότε η τεχνική αυτή είναι πιο αποτελεσματική από ό,τι η μεταγωγή κυκλώματος. Ωστόσο, μπορεί να προκύψουν καθυστερήσεις αν πάρα πολλές συσκευές προσπαθήσουν να μεταδώσουν την ίδια στιγμή, μια κατάσταση η οποία είναι γνωστή από τη λειτουργία του διαδικτύου.

Το *δίκτυο ασύρματης πρόσβασης* χειρίζεται τις ραδιοεπικοινωνίες του δικτύου κορμού με το χρήστη. Στο Σχήμα 1.1, υπάρχουν πράγματι δύο χωριστά δίκτυα ασύρματης πρόσβασης, δηλαδή το *δίκτυο ασύρματης πρόσβασης EDGE GSM* (GERAN) και το *επίγειο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης UMTS* (UTRAN). Αυτά χρησιμοποιούν τις διαφορετικές τεχνικές ραδιοεπικοινωνίας των GSM και UMTS, αλλά μοιράζονται ένα κοινό δίκτυο κορμού μεταξύ τους.

Η συσκευή του χρήστη είναι επισήμως γνωστή ως ο *εξοπλισμός χρήστη* (UE) και κοινώς ως *κινητό*. Επικοινωνεί με το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης μέσω της *διεπαφής αέρα*, επίσης γνωστή ως *ραδιοεπαφή*. Η κατεύθυνση από το δίκτυο στο κινητό είναι γνωστή ως *κάτω ζεύξη* (DL) ή *ευθεία ζεύξη* και η κατεύθυνση από το κινητό στο δίκτυο, είναι γνωστή ως *άνω ζεύξη* (UL) ή *αντίστροφη ζεύξη*.

Ένα κινητό μπορεί να λειτουργήσει εκτός της περιοχής κάλυψης του φορέα εκμετάλλευσης δικτύου του, χρησιμοποιώντας τους πόρους από δύο PLMN: το

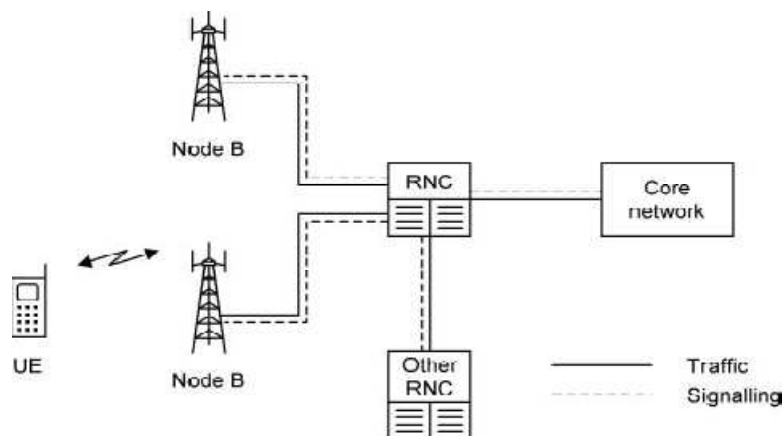
επισκεπτόμενο δίκτυο, όπου το κινητό βρίσκεται, και το οικείο δίκτυο του διαχειριστή. Αυτή η κατάσταση είναι γνωστή ως *περιαγωγή*.

1.1.2 Αρχιτεκτονική Ασύρματου Δικτύου Πρόσβασης

Το Σχήμα 1.2 δείχνει το ασύρματο δίκτυο πρόσβασης του UMTS. Το πιο σημαντικό στοιχείο είναι ο *σταθμός βάσης*, ο οποίος στο UMTS είναι επισήμως γνωστός ως *Κόμβος Β*. Κάθε σταθμός βάσης έχει ένα ή περισσότερα σύνολα κεραιών, μέσω των οποίων επικοινωνεί με τα κινητά σε έναν ή περισσότερους *τομείς*. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, ένας τυπικός σταθμός βάσης χρησιμοποιεί τρία σύνολα κεραιών για να ελέγχει τρεις τομείς, καθένας από τους οποίους καλύπτει ένα τόξο 120°. Σε μια χώρα μεσαίου μεγέθους, όπως το Ηνωμένο Βασίλειο, ένα τυπικό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας μπορεί να περιέχει συνολικά αρκετές χιλιάδες σταθμούς βάσης.

Η λέξη *κυψέλη* μπορεί να χρησιμοποιηθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους [2]. Στην Ευρώπη, μια κυψέλη είναι συνήθως το ίδιο πράγμα με έναν τομέα, αλλά στις ΗΠΑ, συνήθως σημαίνει η ομάδα των τομέων που ελέγχει έναν ενιαίο σταθμό βάσης. Εμείς θα επιμείνουμε με την ευρωπαϊκή σύμβαση σε όλο το βιβλίο, έτσι ώστε η κυψέλη και ο τομέας να σημαίνουν το ίδιο πράγμα.

Κάθε κυψέλη έχει ένα περιορισμένο μέγεθος, το οποίο καθορίζεται από το μέγιστο εύρος κατά το οποίο ο δέκτης μπορεί να ακούσει με επιτυχία τον πομπό. Έχει επίσης μια περιορισμένη χωρητικότητα, η οποία είναι η μέγιστη ταχύτητα δεδομένων σε συνδυασμό με όλα τα κινητά εντός της κυψέλης. Αυτά τα όρια οδηγούν στην ύπαρξη διαφόρων τύπων κυψελών. Οι *μακροκυψέλες* παρέχουν ευρεία περιοχή κάλυψης σε αγροτικές περιοχές ή προάστια και έχουν ένα μέγεθος μερικών χιλιομέτρων. Οι *μικροκυψέλες* έχουν ένα μέγεθος μερικών εκατοντάδων μέτρων και παρέχουν μια μεγαλύτερη συλλογική χωρητικότητα που είναι κατάλληλη για πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές. Οι *πικοκυψέλες* χρησιμοποιούνται σε μεγάλους εσωτερικούς χώρους όπως γραφεία ή εμπορικά κέντρα και έχουν μήκος μερικών δεκάδων μέτρων. Τέλος, οι συνδρομητές μπορούν να αγοράσουν *κεντρικούς σταθμούς*



Σχήμα 1.2 Αρχιτεκτονική επίγειου δικτύου ασύρματης πρόσβασης UMTS

βάσης για να εγκαταστήσουν στα σπίτια τους. Αυτοί ελέγχουν τα *femtocells*, που είναι λίγα μέτρα σε μήκος.

Εξετάζοντας πιο προσεκτικά τη διεπαφή αέρα, κάθε κινητό και σταθμός βάσης μεταδίδει σε μια ορισμένη ραδιοσυχνότητα, η οποία είναι γνωστή ως *φέρουσα συχνότητα*. Γύρω από αυτή τη φέρουσα συχνότητα, καταλαμβάνει ένα ορισμένο ποσό του φάσματος συχνοτήτων, γνωστό ως *εύρος ζώνης*. Για παράδειγμα, ένα κινητό μπορεί να μεταδίδει με μία φέρουσα συχνότητα 1960 MHz και ένα εύρος ζώνης 10 MHz, που σε αυτή την περίπτωση οι μεταδόσεις του θα καταλαμβάνουν ένα εύρος συχνοτήτων από 1955 έως 1965 MHz.

Η διεπαφή αέρα πρέπει να διαχωρίζει τις μεταδόσεις των σταθμών βάσης από εκείνες των κινητών, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι δεν συγκρούονται. Το UMTS μπορεί να το κάνει αυτό με δύο τρόπους. Κατά τη χρήση *αμφίδρομης διαίρεσης συχνότητας* (FDD), οι σταθμοί βάσης μεταδίδουν σε μια φέρουσα συχνότητα, και τα κινητά σε μια άλλη. Κατά τη χρήση *αμφίδρομης διαίρεσης χρόνου* (TDD), οι σταθμοί βάσης και τα κινητά μεταδίδουν στην ίδια φέρουσα συχνότητα, αλλά σε διαφορετικούς χρόνους. Η διεπαφή αέρα πρέπει επίσης να διαχωρίζει τους διαφορετικούς σταθμούς βάσης και τα κινητά μεταξύ τους. Θα δούμε τις τεχνικές που χρησιμοποιεί, στα Κεφάλαια 3 και 4.

Όταν ένα κινητό μετακινείται από το ένα μέρος του δικτύου στο άλλο, πρέπει να σταματήσει να επικοινωνεί με μία κυψέλη και να ξεκινήσει να επικοινωνεί μαζί με την επόμενη κυψέλη. Ανάλογα με τις περιστάσεις, αυτή η διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας δυο διαφορετικές τεχνικές, γνωστές ως *μεταπομπή* και *επανεπιλογή κυψέλης*. Στο UMTS ένα κινητό μπορεί πράγματι να επικοινωνήσει με περισσότερες από μία κυψέλες σε μια στιγμή, σε μια κατάσταση γνωστή ως *ομαλή μεταπομπή*.

Οι σταθμοί βάσης συγκεντρώνονται από συσκευές, γνωστές ως *ελεγκτές ραδιοδικτύου* (RNCs). Αυτοί έχουν δύο κύρια καθήκοντα. Πρώτον, περνούν την πληροφορία φωνής του χρήστη και τα πακέτα δεδομένων ανάμεσα στους σταθμούς βάσης και στο δίκτυο κορμού. Δεύτερον, ελέγχουν τις ραδιοεπικοινωνίες ενός κινητού μέσω μηνυμάτων σηματοδότησης που είναι αόρατα στο χρήστη, για παράδειγμα λέγοντας σε ένα κινητό να παραδώσει από τη μια κυψέλη στην άλλη. Ένα τυπικό δίκτυο μπορεί να περιέχει μερικές δεκάδες RNCs, καθένας από τους οποίους ελέγχει μερικές εκατοντάδες σταθμούς βάσης.

Το ασύρματο δίκτυο πρόσβασης GSM έχει έναν παρόμοιο σχεδιασμό, παρόλο που ο σταθμός βάσης, είναι γνωστός ως ένας *πομποδέκτης σταθμού βάσης* (BTS) και ο ελεγκτής είναι γνωστός ως ο *ελεγκτής σταθμού βάσης* (BSC). Αν ένα κινητό υποστηρίζει τόσο το GSM όσο και το UMTS, τότε το δίκτυο μπορεί να το παραδώσει μεταξύ των δύο δικτύων ασύρματης πρόσβασης, με μια διαδικασία γνωστή ως *διασυμβολική μεταπομπή*. Αυτό μπορεί να είναι πολύτιμο αν ένα κινητό κινείται εκτός της περιοχής κάλυψης του UMTS, και σε μια περιοχή που καλύπτεται μόνο από το GSM.

Στο Σχήμα 1.2, έχουμε δείξει την κίνηση του χρήστη, με συνεχείς γραμμές και τα μηνύματα σηματοδότησης του δικτύου, με διακεκομμένες γραμμές. Θα επιμείνουμε με την παρούσα σύμβαση σε όλο το βιβλίο.

1.1.3 Αρχιτεκτονική του Δικτύου Κορμού

Το Σχήμα 1.3 δείχνει την εσωτερική αρχιτεκτονική του δικτύου κορμού. Στον τομέα CS, οι *πύλες μέσων* (MGWs) δρομολογούν τηλεφωνήματα από το ένα μέρος του δικτύου στο άλλο, ενώ οι *διακομιστές κέντρου μεταγωγής* (MSC) χειρίζονται τα μηνύματα σηματοδοσίας που έχουν συσταθεί, διαχειρίζονται και καταστρέφουν τις τηλεφωνικές κλήσεις. Χειρίζονται αντίστοιχα τις λειτουργίες κίνησης και σηματοδότησης από δύο παλαιότερες συσκευές, γνωστές ως ο MSC και ο *καταχωρητής θέσης επισκεπτών* (VLR). Ένα τυπικό δίκτυο μπορεί να περιέχει μόνο μερικές από αυτές τις συσκευές.

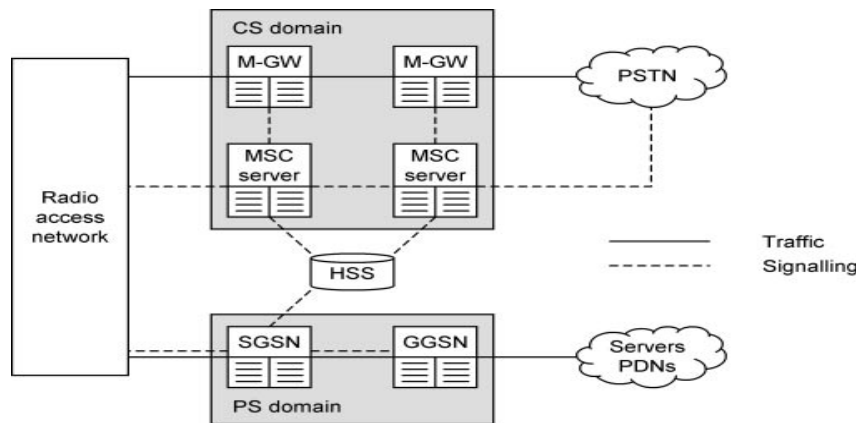
Στον τομέα PS, οι *κόμβοι στήριξης πύλης GPRS* (GGSNs) ενεργούν ως διεπαφές για διακομιστές και PDNs, στον έξω κόσμο. Οι *κόμβοι στήριξης εξυπηρέτησης GPRS* (SGSNs) δρομολογούν τα δεδομένα ανάμεσα στους σταθμούς βάσης και στους GGSNs, και χειρίζονται τα μηνύματα σηματοδοσίας που έχουν φτιαχτεί, διαχειρίζονται και καταστρέφουν τα ρεύματα δεδομένων. Για άλλη μια φορά, ένα τυπικό δίκτυο μπορεί να περιέχει μόνο μερικές από αυτές τις συσκευές. Ο *εξυπηρετητής οικείου συνδρομητή* (HSS) είναι μια κεντρική βάση δεδομένων που περιέχει πληροφορίες σχετικά με τους συνδρομητές όλων των χειριστών δικτύων και μοιράζεται ανάμεσα στους δύο τομείς δικτύου. Συγχωνεύει τις λειτουργίες των δύο προηγούμενων στοιχείων, οι οποίες ήταν γνωστές ως ο *καταχωρητής οικείας θέσης* (HLR) και το *κέντρο πιστοποίησης* (AuC).

1.1.4 Πρωτόκολλα Επικοινωνιών

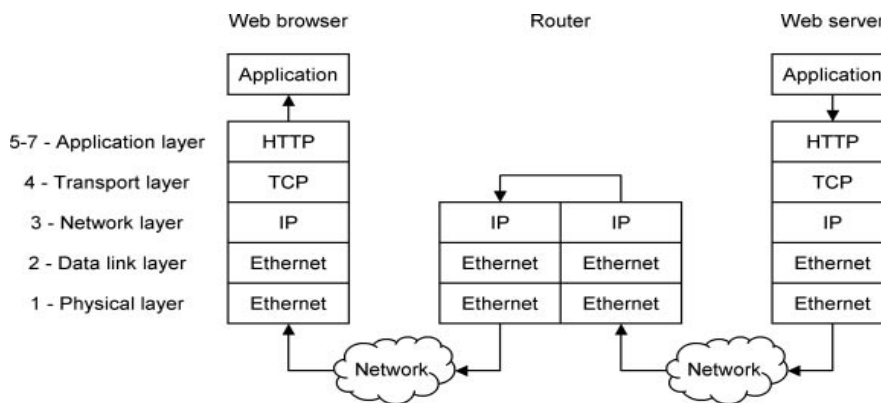
Από κοινού με άλλα συστήματα επικοινωνιών, το UMTS και το GSM μεταφέρουν πληροφορίες χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα υλικού και λογισμικού. Ο καλύτερος τρόπος για να απεικονιστούν αυτά είναι στην πραγματικότητα μέσω των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται από το διαδίκτυο. Αυτά τα πρωτόκολλα σχεδιάστηκαν από την *Ομάδα Εργασίας Εφαρμοσμένης Μηχανικής Διαδικτύου* (IETF) και ομαδοποιούνται σε διάφορα αριθμημένα *στρώματα*, καθένα από τα οποία χειρίζεται μία όψη της διαδικασίας μετάδοσης και λήψης. Η συνηθισμένη ομαδοποίηση ακολουθεί ένα μοντέλο επτά στρωμάτων, γνωστό ως το μοντέλο *Διασύνδεσης Ανοικτών Συστημάτων* (OSI).

Σαν ένα παράδειγμα (βλέπε Σχήμα 1.4), ας υποθέσουμε ότι ο εξυπηρετητής δικτύου στέλνει πληροφορίες στο πρόγραμμα περιήγησης ενός χρήστη. Στο πρώτο στάδιο, ένα πρωτόκολλο επιπέδου εφαρμογών, σε αυτή την περίπτωση το πρωτόκολλο μεταφοράς υπερκειμένου (HTTP), λαμβάνει πληροφορίες από το λογισμικό εφαρμογής του διακομιστή και το περνάει κάτω από το επόμενο στρώμα παρουσιάζοντάς το με έναν τρόπο που το επίπεδο εφαρμογών του χρήστη, θα είναι τελικά κατανοητό. Άλλα πρωτόκολλα επιπέδου εφαρμογών περιλαμβάνουν το *πρωτόκολλο μεταφοράς απλού ταχυδρομείου* (SMTP) και το *πρωτόκολλο μεταφοράς αρχείων* (FTP).

Το *στρώμα μετάδοσης* διαχειρίζεται την απ' άκρη σ' άκρη μετάδοση



Σχήμα 1.3 Αρχιτεκτονική δικτύων κορμού των UMTS και GSM



Σχήμα 1.4 Παραδείγματα πρωτοκόλλων επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται από το διαδίκτυο, δείχνοντας την αντιστοιχία τους στα στρώματα του μοντέλου OSI.

δεδομένων. Υπάρχουν δύο κύρια πρωτόκολλα. Το *πρωτόκολλο ελέγχου μετάδοσης* (TCP) αναμεταδίδει ένα πακέτο απ' άκρο σ' άκρο αν δε φτάνει σωστά, και είναι κατάλληλο για δεδομένα όπως οι ιστοσελίδες και τα μηνύματα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου που πρέπει να λαμβάνονται αξιόπιστα. Το *πρωτόκολλο δεδομενογραφημάτων χρήση* (UDP) στέλνει το πακέτο χωρίς καθόλου αναμετάδοση και είναι κατάλληλο για δεδομένα όπως φωνή πραγματικού χρόνου ή βίντεο, για τα οποία η έγκαιρη άφιξη είναι πιο σημαντική.

Στο *στρώμα δικτύου*, το *πρωτόκολλο διαδικτύου* (IP) στέλνει πακέτα με τη σωστή διαδρομή από την πηγή στον προορισμό, χρησιμοποιώντας τη διεύθυνση IP της συσκευής προορισμού. Η διαδικασία γίνεται από τους παρεμβαίνοντες δρομολογητές, που επιθεωρούν τη διεύθυνση IP προορισμού, εφαρμόζοντας μόλις τα χαμηλότερα τρία στρώματα της στοίβας πρωτοκόλλου. Το *στρώμα ζεύξης δεδομένων* διαχειρίζεται τη μετάδοση πακέτων από μια συσκευή σε μια άλλη, για παράδειγμα αναμεταδίδοντας ένα πακέτο σε μια ενιαία διεπαφή, αν αυτό δε φτάσει σωστά. Τελικά, το *φυσικό επίπεδο* ασχολείται με τα πραγματικά δεδομένα εκπομπής, για

παράδειγμα, ρυθμίζοντας την τάση του μεταδιδόμενου σήματος. Το διαδίκτυο μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε κατάλληλα πρωτόκολλα για το φυσικό στρώμα και ζεύξης δεδομένων, όπως το *Ethernet*.

Σε κάθε επίπεδο της στοίβας του πομπού, ένα πρωτόκολλο λαμβάνει ένα πακέτο δεδομένων από το παραπάνω πρωτόκολλο υπό την μορφή μιας *μονάδας δεδομένων υπηρεσιών (SDU)*. Επεξεργάζεται το πακέτο, προσθέτει μια επικεφαλίδα για να περιγράψει την επεξεργασία που έχει διεξαχθεί, και εξάγει το αποτέλεσμα ως μια *μονάδα δεδομένων πρωτοκόλλου (PDU)*. Αυτό αμέσως γίνεται η εισερχόμενη SDU του επόμενου πρωτοκόλλου παρακάτω. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι το πακέτο να φτάσει στον πάτο της στοίβας πρωτοκόλλου, σημείο στο οποίο μεταδίδεται. Ο δέκτης αντιστρέφει τη διαδικασία, χρησιμοποιώντας τις επικεφαλίδες για να το βοηθήσει να αναίρεσει το αποτέλεσμα της επεξεργασίας του πομπού.

Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται καθ' όλη τη διάρκεια της ασύρματης πρόσβασης και των δικτύων κορμού των UMTS και GSM. Εμείς δε θα εξετάσουμε τα πρωτόκολλά τους με κάθε λεπτομέρεια, αντιθέτως, θα πάμε κατ' ευθείαν στα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται από το LTE, ως μέρος του Κεφαλαίου 2.

1.2 Ιστορία των Συστημάτων Κινητών Τηλεπικοινωνιών

1.2.1 Από το 1G στο 3G

Τα συστήματα κινητών τηλεπικοινωνιών εισήχθησαν για πρώτη φορά στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Τα συστήματα *πρώτης γενιάς (1G)* χρησιμοποίησαν αναλογικές τεχνικές επικοινωνίας, οι οποίες ήταν παρόμοιες με εκείνες που χρησιμοποιούνταν από ένα παραδοσιακό αναλογικό ραδιόφωνο. Οι μεμονωμένες κυψέλες ήταν μεγάλες και τα συστήματα δεν χρησιμοποίησαν το διαθέσιμο ραδιοφάσμα αποτελεσματικά, έτσι η ικανότητά τους, με τα σημερινά δεδομένα, ήταν πολύ μικρή. Οι συσκευές των κινητών ήταν μεγάλες και ακριβές και κυκλοφορούσαν στην αγορά σχεδόν αποκλειστικά σε επαγγελματίες χρήστες.

Οι κινητές επικοινωνίες απογειώθηκαν ως καταναλωτικό προϊόν με την εισαγωγή των συστημάτων *δεύτερης γενιάς (2G)* στις αρχές του 1990. Αυτά τα συστήματα ήταν τα πρώτα που χρησιμοποίησαν ψηφιακή τεχνολογία, η οποία επέτρεπε μια πιο αποτελεσματική χρήση του ραδιοφάσματος και την εισαγωγή μικρότερων, φθηνότερων συσκευών. Αρχικά είχαν σχεδιαστεί μόνο για φωνή, αλλά αργότερα ενισχύθηκαν να υποστηρίζουν άμεσα μηνύματα μέσω της *Υπηρεσίας Μικρών Μηνυμάτων (SMS)*. Το πιο δημοφιλές σύστημα 2G ήταν το GSM, το οποίο είχε αρχικά σχεδιαστεί ως μια πανευρωπαϊκή τεχνολογία, αλλά αργότερα έγινε δημοφιλές σε ολόκληρο τον κόσμο. Επίσης αξιοσημείωτο ήταν το *IS-95*, αλλιώς γνωστό ως *cdmaOne*, το οποίο σχεδιάστηκε από την Qualcomm, και έγινε το κυρίαρχο σύστημα 2G στις ΗΠΑ.

Η επιτυχία των συστημάτων 2G επικοινωνιών ήρθε την ίδια χρονική στιγμή με την πρώιμη ανάπτυξη του διαδικτύου. Ήταν φυσικό για τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύου να φέρουν τις δύο έννοιες μαζί, επιτρέποντας στους χρήστες

να κατεβάσουν δεδομένα σε κινητές συσκευές. Αυτό το κάνουν τα αποκαλούμενα συστήματα 2.5G βασισμένα στις πρωτότυπες ιδέες από τα 2G, με την εισαγωγή του τομέα PS του δικτύου κορμού και τροποποιώντας τη διεπαφή αέρα έτσι ώστε να μπορούν να χειριστούν τα δεδομένα καθώς και τη φωνή. Η *Γενική Υπηρεσία Ραδιοφωνίας Πακέτων* (GPRS) ενσωμάτωσε αυτές τις τεχνικές στο GSM, ενώ το IS-95 αναπτύχθηκε σε ένα σύστημα, γνωστό ως *IS-95B*.

Την ίδια στιγμή, οι διαθέσιμοι ρυθμοί δεδομένων μέσω του διαδικτύου αυξάνονταν προοδευτικά. Για να αντικατοπτριστεί αυτό, οι σχεδιαστές αρχικά βελτίωσαν την επίδοση των συστημάτων 2G, χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως *Ενισχυμένοι Ρυθμοί Δεδομένων για την Εξέλιξη του GSM* (EDGE) και έπειτα εισήγαγαν πιο ισχυρά συστήματα *τρίτης γενιάς* (3G), στα χρόνια μετά το 2000. Τα συστήματα 3G χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνικές για ασύρματη μετάδοση και λήψη από τους προκατόχους τους τα 2G, το οποίο αυξάνει τις μέγιστες ταχύτητες δεδομένων που μπορούν να χειριστούν και καθιστά ακόμα πιο αποδοτική τη χρήση του διαθέσιμου φάσματος ραδιοσυχνοτήτων.

Δυστυχώς, τα πρώιμα συστήματα 3G ήταν υπερβολικά προκατειλημμένα και η απόδοσή τους δεν ανταποκρίθηκε αρχικά στις προσδοκίες. Εξαιτίας αυτού, τα 3G απομακρύνθηκαν σωστά μετά την εισαγωγή των συστημάτων 3.5G γύρω στο 2005. Σε αυτά τα συστήματα, η διεπαφή αέρα περιλαμβάνει επιπλέον βελτιστοποιήσεις που απευθύνονται σε εφαρμογές δεδομένων, οι οποίες αυξάνουν το μέσο όρο κατά τον οποίο ο χρήστης μπορεί να ανεβάσει ή να κατεβάσει πληροφορίες, σε βάρος της εισαγωγής μεγαλύτερης μεταβλητότητας στο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και της ώρας άφιξης.

1.2.2 Συστήματα Τρίτης Γενιάς

Κυρίαρχο σύστημα 3G στον κόσμο είναι το UMTS. Το UMTS αναπτύχθηκε από το GSM αλλάζοντας εντελώς την τεχνολογία που χρησιμοποιείται για τη διεπαφή αέρα, διατηρώντας παράλληλα το δίκτυο κορμού σχεδόν αμετάβλητο. Το σύστημα στη συνέχεια ενισχύθηκε για εφαρμογές δεδομένων, με την εισαγωγή των 3.5G τεχνολογιών *πρόσβασης πακέτων κάτω ζεύξης υψηλής ταχύτητας* (HSDPA) και *πρόσβασης πακέτων άνω ζεύξης υψηλής ταχύτητας* (HSUPA), που είναι συλλογικά γνωστές ως *πρόσβαση πακέτων υψηλής ταχύτητας* (HSPA).

Η διεπαφή αέρα του UMTS έχει δύο ελαφρώς διαφορετικές υλοποιήσεις. Η *πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης ευρυζωνικού κώδικα* (WCDMA) είναι η εκδοχή που αρχικά καθορίστηκε, και αυτή που χρησιμοποιείται σήμερα από το μεγαλύτερο μέρος του κόσμου. Η *διαίρεση χρόνου πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης σύγχρονου κώδικα* (TD-SCDMA) είναι ένα παράγωγο του WCDMA, η οποία είναι επίσης γνωστή ως επιλογή χαμηλού ρυθμού τσιπ UMTS της κατάστασης TDD. Η TD-SCDMA αναπτύχθηκε στην Κίνα, για να μειωθεί η εξάρτηση της χώρας στη Δυτική τεχνολογία και για καταβολή δικαιωμάτων στις δυτικές εταιρείες. Έχει αναπτυχθεί από έναν από τους τρεις φορείς 3G της Κίνας, την China Mobile.

Υπάρχουν δύο βασικές τεχνικές διαφορές μεταξύ αυτών των υλοποιήσεων.

Πρώτον, το WCDMA συνήθως διαχωρίζει τις μεταδόσεις των σταθμών βάσης και των κινητών, μέσω της FDD, ενώ το TD-SCDMA χρησιμοποιεί TDD. Δεύτερον, το WCDMA χρησιμοποιεί ένα πλατύ εύρος ζώνης των 5 MHz, ενώ το TD-SCDMA χρησιμοποιεί μια μικρότερη τιμή των 1.6 MHz.

Το *cdma2000* αναπτύχθηκε από το IS-95 και χρησιμοποιείται κυρίως στη Βόρεια Αμερική. Η αρχική τεχνολογία 3G ήταν γνωστή ως *cdma2000 1x τεχνολογία ασύρματης μετάδοσης* (1xRTT). Στη συνέχεια ενισχύθηκε σε ένα σύστημα 3.5G με δύο εναλλακτικές ονομασίες, *cdma2000 πακέτα δεδομένων υψηλού ρυθμού* (HRPD) ή *evolution data optimized* (EV-DO), που χρησιμοποιεί παρόμοιες τεχνικές σε HSPA. Οι προδιαγραφές για τα IS-95 και *cdma2000*, παράγονται από μια παρόμοια σύμπραξη με το 3GPP, η οποία είναι γνωστή ως το *Third Generation Partnership Project 2* (3GPP2) [3].

Υπάρχουν τρεις κύριες τεχνικές διαφορές μεταξύ των διεπαφών αέρα του *cdma2000* και του UMTS. Πρώτον, το *cdma2000* χρησιμοποιεί ένα εύρος ζώνης των 1.25 MHz. Δεύτερον, το *cdma2000* είναι συμβατό με το IS-95, με την έννοια ότι τα κινητά IS-95 μπορούν να επικοινωνήσουν με τους σταθμούς βάσης *cdma2000* και αντίστροφα, ενώ το UMTS δεν είναι συμβατό με το GSM. Τρίτον, το *cdma2000* διαχωρίζει τη φωνή και τα βελτιστοποιημένα δεδομένα πάνω διαφορετικές φέρουσες συχνότητες, ενώ το UMTS τους επιτρέπει να μοιράζονται την ίδια. Τα πρώτα δύο ζητήματα εμπόδισαν τη διείσδυση του WCDMA στην αγορά της Βόρειας Αμερικής, όπου υπήρχαν λίγες κατανομές εύρους ζώνης τόσο ευρύ όσο 5 MHz και υπήρχε ένας μεγάλος αριθμός νόμιμων συσκευών IS-95.

Η τελική τεχνολογία 3G είναι η *Παγκόσμια Διαλειτουργικότητα για Πρόσβαση Μικροκυμάτων* (WiMAX). Αυτή αναπτύχθηκε από το *Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών* σύμφωνα με προδιαγραφές του προτύπου IEEE 802.16 και έχει μια πολύ διαφορετική ιστορία από τα άλλα συστήματα 3G. Η αρχική προδιαγραφή (IEEE 802.16 έως 2.001) ήταν για ένα σύστημα που παρέδιδε δεδομένα πάνω σε μικροκυματικές ζεύξεις από σημείο σε σημείο, αντί των σταθερών καλωδίων. Μια μεταγενέστερη αναθεώρηση, γνωστή ως *σταθερή WiMAX* (IEEE 802.16–2004), υποστήριζε επικοινωνίες σημείου σε πολλαπλά σημεία, ανάμεσα σε ένα κατευθυντικό σταθμό βάσης και μια σειρά από σταθερές συσκευές. Μια άλλη τροποποίηση, γνωστή ως *κινητή WiMAX* (IEEE 802.16e), επέτρεπε στις συσκευές να κυκλοφορούν και να παραδίδουν τις επικοινωνίες τους από ένα σταθμό βάσης σε ένα άλλο. Μόλις αυτές οι δυνατότητες ήταν όλες σε ισχύ, η WiMAX άρχισε να μοιάζει με οποιοδήποτε άλλο σύστημα επικοινωνίας 3G, έστω και ένα που είχε βελτιστοποιηθεί για δεδομένα από την αρχή.

1.3 Η Ανάγκη για LTE

1.3.1 Η Ανάπτυξη των Δεδομένων Κινητής Τηλεφωνίας

Για πολλά χρόνια, φωνητικές κλήσεις κυριάρχησαν στην κυκλοφορία των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Η ανάπτυξη των δεδομένων κινητής τηλεφωνίας ήταν αρχικά

αργή, αλλά τα έτη μέχρι το 2010 η χρήση τους άρχισε να αυξάνεται δραματικά. Για να φανεί αυτό, το Σχήμα 1.5 δείχνει μετρήσεις από την Ericsson, της συνολικής κίνησης που χειρίζεται από δίκτυα σε όλο τον κόσμο, σε petabytes (εκατομμύρια gigabytes) ανά μήνα [4]. Το σχήμα καλύπτει την περίοδο από τον Ιανουάριο του 2007 μέχρι τον Ιούλιο του 2011, κατά τη διάρκεια του οποίου χρόνου, το ποσό της κυκλοφορίας δεδομένων αυξήθηκε με ένα συντελεστή πάνω από το 100.

Η τάση αυτή προβλέπεται να συνεχιστεί. Για παράδειγμα, το Σχήμα 1.6 δείχνει προβλέψεις από την Analysys Mason της αύξησης της κίνησης των κινητών, την περίοδο από το 2011 έως το 2016. Να σημειωθεί η διαφορά στις κατακόρυφες κλίμακες των δύο διαγραμμάτων.

Εν μέρει, η αύξηση αυτή προήλθε από την αυξημένη διαθεσιμότητα στις τεχνολογίες επικοινωνιών 3.5G. Πιο σημαντική, ωστόσο, ήταν η εισαγωγή του Apple iPhone το 2007, ακολουθούμενο από συσκευές που βασίζονται στο λειτουργικό σύστημα Android της Google από το 2008. Αυτά τα smartphones ήταν πιο ελκυστικά και φιλικά προς το χρήστη από τους προκατόχους τους και σχεδιάστηκαν για να υποστηρίξουν τη δημιουργία εφαρμογών από τρίτους προγραμματιστές. Το αποτέλεσμα ήταν μια έκρηξη στον αριθμό και τη χρήση των κινητών εφαρμογών, η οποία φαίνεται στα διαγράμματα. Ως συμβάλλον παράγοντας, φορείς εκμετάλλευσης δικτύων είχαν προηγουμένως προσπαθήσει να ενθαρρύνουν την ανάπτυξη των δεδομένων κινητής τηλεφωνίας από την εισαγωγή των κατ' αποκοπή συστημάτων χρέωσης που επέτρεπαν την απεριόριστη λήψη δεδομένων. Αυτό οδήγησε σε μια κατάσταση, όπου ούτε οι προγραμματιστές ούτε οι χρήστες υποκινήθηκαν για να περιορίσουν την κατανάλωση των δεδομένων τους.

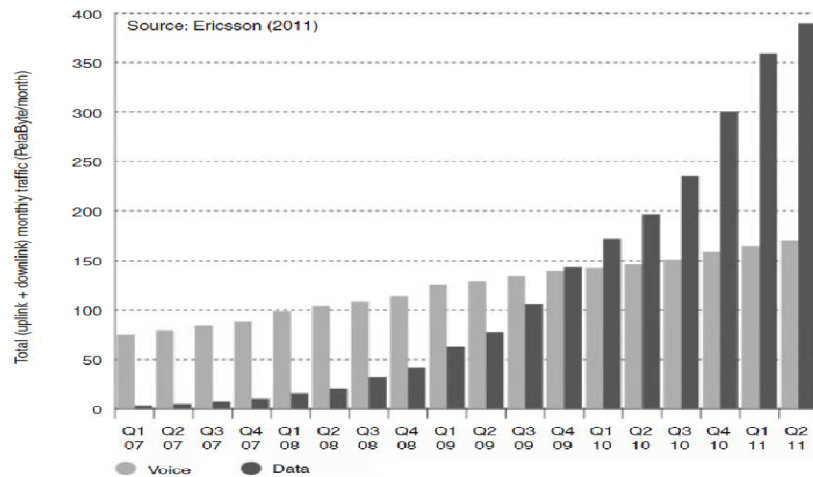
Σαν αποτέλεσμα αυτών των θεμάτων, τα δίκτυα 2G και 3G άρχισαν να συνωστίζονται στα χρόνια γύρω στο 2010, οδηγώντας σε μια απαίτηση για αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου. Στην επόμενη ενότητα, επανεξετάζουμε τα όρια της χωρητικότητας ενός συστήματος κινητών επικοινωνιών και δείχνουμε πώς μπορεί να επιτευχθεί μια τέτοια αύξηση χωρητικότητας.

1.3.2 Χωρητικότητα ενός Συστήματος Κινητών Τηλεπικοινωνιών

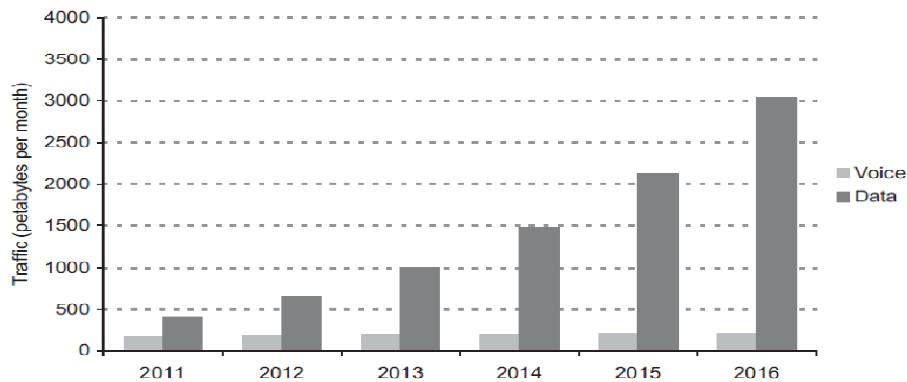
Το 1948, ο Claude Shannon ανακάλυψε ένα θεωρητικό όριο στην ταχύτητα δεδομένων που μπορεί να επιτευχθεί από οποιοδήποτε σύστημα επικοινωνίας [5]. Θα το γράψουμε στην απλούστερη μορφή του, ως ακολούθως:

$$C = B \log_2 (1 + \text{SINR}) \quad (1.1)$$

Εδώ, SINR είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο συν τις παρεμβολές, με άλλα λόγια η ισχύς στο δέκτη λόγω του απαιτούμενου σήματος, διαιρούμενη με τη δύναμη που οφείλεται σε θόρυβο και σε παρεμβολές. B είναι το εύρος ζώνης του συστήματος επικοινωνίας σε Hz, και C είναι η χωρητικότητα του καναλιού σε bits s⁻¹. Είναι θεωρητικά δυνατό για ένα σύστημα επικοινωνιών να στείλει δεδομένα από έναν πομπό προς ένα δέκτη χωρίς καθόλου λάθη, υπό την προϋπόθεση ότι ο ρυθμός



Σχήμα 1.5 Μετρήσεις κίνησης φωνής και δεδομένων σε παγκόσμια δίκτυα κινητών τηλεπικοινωνιών, κατά την περίοδο από τον Ιανουάριο του 2007 μέχρι τον Ιούλιο του 2011. Ανατύπωση με την άδεια της Ericsson.



Σχήμα 1.6 Προβλέψεις κίνησης φωνής και δεδομένων σε παγκόσμια δίκτυα κινητών τηλεπικοινωνιών, κατά την περίοδο από το 2011 έως το 2016. Τα δεδομένα παρέχονται από την Analysys Mason.

δεδομένων είναι μικρότερος από την χωρητικότητα του καναλιού. Σε ένα σύστημα κινητών επικοινωνιών, C είναι ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων που μπορεί να χειριστεί μια κυψέλη και ισούται με το συνδυασμό ρυθμού δεδομένων όλων των κινητών εντός της κυψέλης.

Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 1.7, με εύρος ζώνης των 5, 10 και 20 MHz. Ο κάθετος άξονας δείχνει τη χωρητικότητα του καναλιού σε εκατομμύρια bits ανά δευτερόλεπτο (Mbps), ενώ ο οριζόντιος άξονας παριστά το SINR, σε ντεσιμπέλ (dB):

$$\text{SINR(dB)} = 10 \log_{10} (\text{SINR}) \quad (1.2)$$

1.3.3 Αύξηση τη Χωρητικότητα του Συστήματος

Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι για να αυξηθεί η χωρητικότητα ενός συστήματος

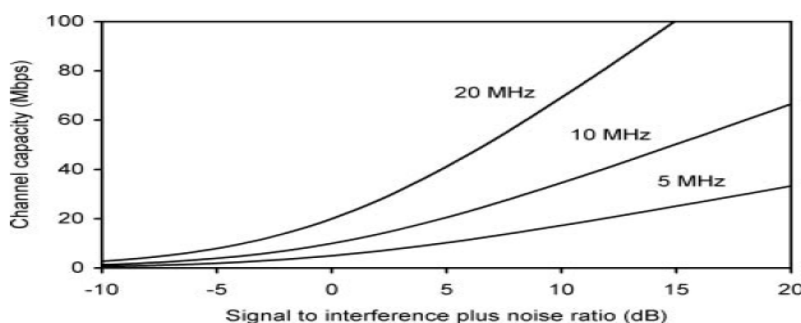
κινητών επικοινωνιών, το οποίο μπορούμε να κατανοήσουμε με επιθεώρηση της Εξίσωσης (1.1) και του Σχήματος 1.7. Το πρώτο, και το πιο σημαντικό, είναι η χρήση μικρότερων κυψελών. Σε ένα κυψελοειδές δίκτυο, η χωρητικότητα του καναλιού είναι ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων που μία μόνο κυψέλη μπορεί να χειριστεί. Κατασκευάζοντας επιπλέον σταθμούς βάσης και μειώνοντας το μέγεθος της κάθε κυψέλης, μπορούμε να αυξήσουμε τη χωρητικότητα ενός δικτύου, ουσιαστικά χρησιμοποιώντας πολλά διπλά αντίγραφα της Εξίσωσης (1.1).

Η δεύτερη τεχνική, είναι να αυξηθεί το εύρος ζώνης. Το ραδιοφάσμα διοικείται από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) και από τις περιφερειακές και εθνικές ρυθμιστικές αρχές, και η αυξανόμενη χρήση των κινητών τηλεπικοινωνιών οδήγησε στην αύξηση της κατανομής φάσματος συστημάτων 2G και 3G. Ωστόσο, υπάρχει μόνο μια πεπερασμένη ποσότητα ραδιοφάσματος διαθέσιμη και επίσης απαιτείται από διάφορες εφαρμογές, όπως οι στρατιωτικές επικοινωνίες και η ραδιοαστρονομία. Υπάρχουν συνεπώς όρια ως προς το κατά πόσο αυτή η διαδικασία μπορεί να προχωρήσει.

Η τρίτη τεχνική, είναι να βελτιωθεί η τεχνολογία επικοινωνιών που χρησιμοποιούμε. Αυτό φέρνει αρκετά οφέλη: μας επιτρέπει να προσεγγίσουμε ακόμη πιο κοντά στην θεωρητική χωρητικότητα καναλιού, και μας επιτρέπει να εκμεταλλευτούμε τη μεγαλύτερη SINR και μεγαλύτερο εύρος ζώνης που διατίθενται από τις άλλες μεταβολές παραπάνω. Αυτή η προοδευτική βελτίωση στην τεχνολογία επικοινωνιών, υπήρξε ένα συνεχές θέμα στην ανάπτυξη της κινητής τηλεφωνίας και είναι ο κύριος λόγος για την εισαγωγή του LTE.

1.3.4 Επιπλέον Κίνητρα

Τρία άλλα ζητήματα οδηγούν τη μετάβαση στο LTE. Πρώτον, ένας χειριστής 2G ή 3G πρέπει να διατηρήσει δυο δίκτυα κορμού: τον τομέα CS για φωνή και τον τομέα PS για τα δεδομένα. Υπό την προϋπόθεση ότι το δίκτυο δεν είναι πάρα πολύ συνωστισμένο, ωστόσο, είναι επίσης δυνατό να μεταφέρει φωνητικές κλήσεις πάνω σε δίκτυα PS, χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως το *voice over IP* (VoIP). Με αυτό τον



Σχήμα 1.7 Χωρητικότητα Shannon ενός συστήματος επικοινωνιών, σε εύρη ζώνης των 5, 10 και 20 MHz.

τρόπο, οι διαχειριστές μπορούν να κινήσουν τα πάντα για την ενεργοποίηση του τομέα PS, και μπορούν να μειώσουν και τα κεφάλαια και τις λειτουργικές τους δαπάνες.

Σε ένα σχετικό ζήτημα, τα δίκτυα 3G εισάγουν καθυστερήσεις της τάξης των 100 milliseconds για εφαρμογές δεδομένων, στη μεταφορά πακέτων δεδομένων μεταξύ των στοιχείων δικτύου και σε ολόκληρη τη διεπαφή αέρα. Αυτό είναι μόλις αποδεκτό για τη φωνή και προκαλεί μεγάλες δυσκολίες για πιο απαιτητικές εφαρμογές όπως τα διαδραστικά παιχνίδια πραγματικού χρόνου. Έτσι, ένας δεύτερος οδηγός είναι η επιθυμία για μείωση της καθυστέρησης απ' άκρη σ' άκρη, ή του χρόνου αναμονής, στο δίκτυο.

Τρίτον, οι προδιαγραφές για τα UMTS και GSM έχουν γίνει όλο και πιο περίπλοκες με την πάροδο των χρόνων, λόγω της ανάγκης να προσθέσουν νέα χαρακτηριστικά στο σύστημα, διατηρώντας παράλληλα αντίστροφη συμβατότητα με παλαιότερες συσκευές. Ένα νέο ξεκίνημα βοηθά το έργο των σχεδιαστών, επιτρέποντάς τους να βελτιώσουν την απόδοση του συστήματος χωρίς την ανάγκη να υποστηρίξουν συσκευές παλαιού τύπου.

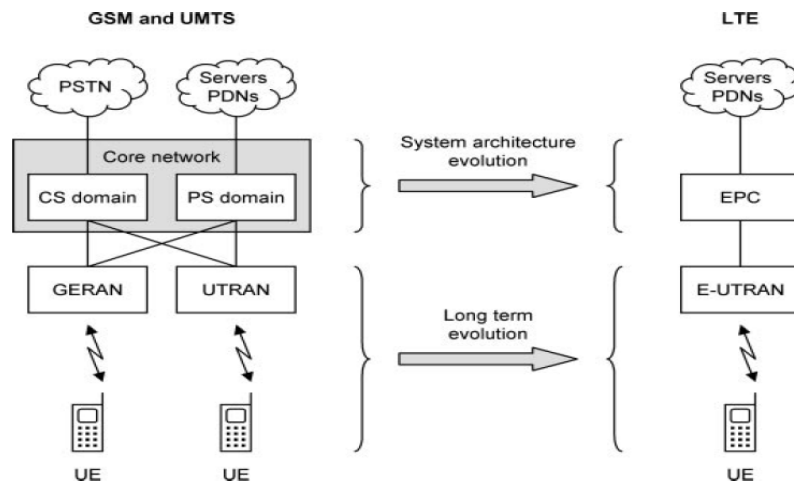
1.4 Από το UMTS στο LTE

1.4.1 Αρχιτεκτονική Υψηλού Επιπέδου του LTE

Το 2004, η 3GPP ξεκίνησε μια μελέτη στον LTE του UMTS. Ο στόχος ήταν να κρατήσει τα συστήματα κινητών επικοινωνιών της 3GPP ανταγωνιστικά, πάνω από τα χρονοδιαγράμματα των 10 ετών και μετά, με την παράδοση υψηλών ποσοστών δεδομένων και χαμηλών χρόνων αναμονής όπου οι μελλοντικοί χρήστες θα απαιτούσαν. Το Σχήμα 1.8 δείχνει την αρχιτεκτονική που προκύπτει και τον τρόπο με τον οποίο αναπτύχθηκε αυτή η αρχιτεκτονική, από εκείνη του UMTS.

Στη νέα αρχιτεκτονική, ο *εξελιγμένος πυρήνας πακέτου* (EPC), είναι μια άμεση αντικατάσταση για τον τομέα PS των UMTS και GSM. Διανέμει όλα τα είδη πληροφοριών στο χρήστη, φωνή καθώς και δεδομένα, χρησιμοποιώντας τις τεχνολογίες μεταγωγής πακέτου που έχουν χρησιμοποιηθεί παραδοσιακά για τα δεδομένα μόνο. Δεν υπάρχει ισοδύναμος με τον τομέα CS: αντ' αυτού, οι φωνητικές κλήσεις μεταφέρονται χρησιμοποιώντας VoIP. Το *εξελιγμένο επίγειο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης UMTS* (E-UTRAN) χειρίζεται τις ραδιοεπικοινωνίες του EPC με το κινητό, έτσι είναι μια άμεση αντικατάσταση για το UTRAN. Το κινητό είναι ακόμα γνωστό ως ο UE, αν και η εσωτερική λειτουργία του είναι πολύ διαφορετική από πριν.

Η νέα αρχιτεκτονική σχεδιάστηκε ως μέρος των δύο στοιχείων εργασίας 3GPP, δηλαδή της *εξέλιξης αρχιτεκτονικής συστήματος* (SAE), η οποία καλύπτει το δίκτυο κορμού, και του *long term evolution* (LTE), το οποίο καλύπτει το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης, τη διεπαφή αέρα και τα κινητά. Επίσημως, όλο το σύστημα είναι γνωστό ως το *εξελιγμένο σύστημα πακέτου* (EPS), ενώ το ακρωνύμιο LTE αναφέρεται μόνο στην εξέλιξη της διεπαφής αέρα. Παρά την επίσημη αυτή χρήση, το LTE έχει γίνει μια κοινή ονομασία για ολόκληρο το σύστημα, και χρησιμοποιείται τακτικά με αυτόν τον τρόπο από τη 3GPP. Θα χρησιμοποιήσουμε το LTE με αυτόν



Σχήμα 1.8 Εξέλιξη της αρχιτεκτονικής συστήματος από τα GSM και UMTS, στο LTE.

τον τρόπο καθομιλουμένης, σε όλο το βιβλίο.

1.4.2 Long Term Evolution

Το κύριο προϊόν της μελέτης σε LTE ήταν μια προδιαγραφή απαιτήσεων για τη διεπαφή αέρα [6], στην οποία οι πιο σημαντικές απαιτήσεις είχαν ως εξής.

Το LTE ήταν υποχρεωμένο να παραδώσει ένα μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων των 100 Mbps στην κάτω ζεύξη και 50 Mbps στην άνω ζεύξη. Η απαίτηση αυτή ξεπεράστηκε στο τελικό σύστημα, το οποίο προσφέρει μέγιστες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων 300 Mbps και 75 Mbps, αντίστοιχα. Συγκριτικά, η μέγιστη ταχύτητα δεδομένων του WCDMA, στην Έκδοση 6 των προδιαγραφών 3GPP, είναι 14 Mbps στην κάτω ζεύξη και 5.7 Mbps στην άνω ζεύξη. (Θα συζητήσουμε τις διάφορες εκδόσεις προδιαγραφών στο τέλος του κεφαλαίου).

Δε μπορεί να τονιστεί υπερβολικά έντονα, ωστόσο, ότι αυτές οι μέγιστες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων, μπορούν να επιτευχθούν μόνο σε ιδανικές συνθήκες, και είναι εντελώς ανέφικτο με οποιοδήποτε ρεαλιστικό σενάριο. Ένα καλύτερο μέτρο είναι η *φασματική απόδοση*, η οποία εκφράζει τη χαρακτηριστική ικανότητα μιας κυψέλης ανά μονάδα εύρους ζώνης. Το LTE ήταν υποχρεωμένο να στηρίξει μια φασματική απόδοση τρεις έως τέσσερις φορές μεγαλύτερη από εκείνη της Έκδοσης 6 του WCDMA στην κάτω ζεύξη και δύο έως τρεις φορές μεγαλύτερη, στην άνω ζεύξη.

Ο χρόνος αναμονής είναι ένα άλλο σημαντικό θέμα, ιδιαίτερα για τις χρονικά κρίσιμες εφαρμογές, όπως η φωνή και τα διαδραστικά παιχνίδια. Υπάρχουν δυο πτυχές σε αυτό. Πρώτον, οι απαιτήσεις δηλώνουν ότι ο χρόνος που απαιτείται για να ταξιδέψουν τα δεδομένα μεταξύ του κινητού τηλεφώνου και του σταθερού δικτύου, θα πρέπει να είναι λιγότερο από πέντε milliseconds, υπό την προϋπόθεση ότι η διεπαφή αέρα είναι μη κορεσμένη. Δεύτερον, θα δούμε στο Κεφάλαιο 2 ότι τα κινητά

τηλέφωνα μπορούν να λειτουργήσουν σε δύο καταστάσεις: μια ενεργή κατάσταση στην οποία μπορούν να επικοινωνούν με το δίκτυο και μια κατάσταση αναμονής χαμηλής ισχύος. Οι απαιτήσεις δηλώνουν ότι ένα τηλέφωνο θα πρέπει να μεταβεί από την κατάσταση αναμονής στην ενεργή κατάσταση, μετά από μια παρέμβαση του χρήστη, σε λιγότερο από 100 milliseconds.

Υπάρχουν, επίσης, απαιτήσεις σχετικά με την κάλυψη και την κινητικότητα. Το LTE έχει βελτιστοποιηθεί για μεγέθη κυψελών μέχρι 5 km, λειτουργεί με μειωμένη απόδοση έως και 30 km και υποστηρίζει μεγέθη κυψελών έως 100 km. Βελτιστοποιείται επίσης, για κινητές ταχύτητες έως 15 km⁻¹, δουλεύει με υψηλή απόδοση έως και 120 km⁻¹ και υποστηρίζει ταχύτητες έως 350 km⁻¹. Τέλος, το LTE σχεδιάστηκε να δουλεύει με μια ποικιλία διαφορετικών εύρων ζώνης, που κυμαίνονται από 1.4 MHz έως ένα μέγιστο των 20 MHz.

Η προδιαγραφή απαιτήσεων οδήγησε τελικά σε ένα λεπτομερή σχεδιασμό για την LTE διεπαφή αέρα, την οποία θα καλύψουμε στα Κεφάλαια 3 έως 10. Προς όφελος των όσων είναι εξοικειωμένοι με άλλα συστήματα, ο Πίνακας 1.1 συνοψίζει βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του, και τα συγκρίνει με εκείνα του WCDMA.

1.4.3 Εξέλιξη Αρχιτεκτονικής Συστήματος

Το κύριο προϊόν της μελέτης στην SAE ήταν μια προδιαγραφή απαιτήσεων για το σταθερό δίκτυο [7], στην οποία οι πιο σημαντικές απαιτήσεις είχαν ως εξής.

Ο EPC δρομολογεί τα πακέτα να χρησιμοποιούν το IP και υποστηρίζει συσκευές που χρησιμοποιούν IPv4, IPv6, ή διπλή στοίβα IPv4/ IPv6. Επιπλέον, ο EPC παρέχει στους χρήστες μια συνεχή συνδεσιμότητα με τον έξω κόσμο, με τη δημιουργία μιας βασικής σύνδεσης IP για μια συσκευή όταν ενεργοποιείται, και διατηρώντας αυτή τη σύνδεση μέχρι να απενεργοποιηθεί. Αυτό είναι διαφορετικό από τη συμπεριφορά των UMTS και GSM, στα οποία το δίκτυο θέτει μόνο μέχρι μια σύνδεση IP, κατόπιν αιτήματος και καταστρέφοντας τη σύνδεση όταν δεν απαιτείται πλέον.

Πίνακας 1.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά διεπαφών αέρα των WCDMA και LTE

Feature	WCDMA	LTE	Chapter
Multiple access scheme	WCDMA	OFDMA and SC-FDMA	4
Frequency re-use	100%	Flexible	4
Use of MIMO antennas	From Release 7	Yes	5
Bandwidth	5 MHz	1.4, 3, 5, 10, 15 or 20 MHz	6
Frame duration	10 ms	10 ms	6
Transmission time interval	2 or 10 ms	1 ms	6
Modes of operation	FDD and TDD	FDD and TDD	6
Uplink timing advance	Not required	Required	6
Transport channels	Dedicated and shared	Shared	6
Uplink power control	Fast	Slow	8

Ο EPC σχεδιάστηκε σαν ένας σωλήνας δεδομένων που απλά μεταφέρει πληροφορίες από και προς τον χρήστη: δεν ασχολείται με το περιεχόμενο των πληροφοριών ή με την εφαρμογή. Αυτή η συμπεριφορά είναι παρόμοια με αυτή του διαδικτύου, το οποίο μεταφέρει πακέτα που προέρχονται από οποιαδήποτε εφαρμογή λογισμικού, αλλά είναι διαφορετική από εκείνη ενός παραδοσιακού συστήματος τηλεπικοινωνιών, στην οποία η φωνητική εφαρμογή αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του συστήματος. Εξαιτίας αυτού, οι φωνητικές εφαρμογές δεν αποτελούν μέρος του LTE: αντίθετα, οι φωνητικές κλήσεις ελέγχονται από κάποια εξωτερική οντότητα όπως το *υποσύστημα πολυμέσων IP* (IMS). Ο EPC μεταφέρει απλά τα πακέτα φωνής με τον ίδιο τρόπο όπως και οποιοδήποτε άλλο ρεύμα δεδομένων.

Σε αντίθεση με το διαδίκτυο, ο EPC περιλαμβάνει μηχανισμούς για να προσδιορίσει και να ελέγξει το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, το ποσοστό σφάλματος και την καθυστέρηση που θα λάβει ένα ρεύμα δεδομένων. Δεν υπάρχει καμία ρητή απαίτηση στο μέγιστο χρόνο που απαιτείται για τα δεδομένα να ταξιδέψουν σε όλο το EPC, αλλά η σχετική προδιαγραφή προτείνει μια καθυστέρηση στο επίπεδο χρήστη από 10 milliseconds για ένα κινητό μη περιαγωγής, με αύξηση σε 50 milliseconds, σε ένα τυπικό σενάριο περιαγωγής [8]. Για τον υπολογισμό της συνολικής καθυστέρησης, πρέπει να προσθέσουμε την προηγούμενη εικόνα για την καθυστέρηση σε ολόκληρη τη διεπαφή αέρα, δίνοντας μια τυπική καθυστέρηση σε ένα σενάριο μη περιαγωγής περίπου 20 milliseconds.

Ο EPC απαιτείται επίσης για την υποστήριξη ενδοσυστηματικών μεταβιβάσεων ανάμεσα στο LTE και τις προηγούμενες τεχνολογίες 2G και 3G. Αυτές καλύπτουν όχι μόνο τα UMTS και GSM, αλλά και συστήματα non 3GPP, όπως τα cdma2000 και WiMAX.

Οι Πίνακες 1.2 και 1.3 συνοψίζουν τα βασικά χαρακτηριστικά του δικτύου ασύρματης πρόσβασης και του EPC, και τα συγκρίνουν με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του UMTS. Εμείς θα καλύψουμε τα αρχιτεκτονικά στοιχεία του σταθερού δικτύου στο Κεφάλαιο 2, και τις λειτουργικές πτυχές στα Κεφάλαια 11 έως 15.

1.5 Από το LTE στο LTE-Advanced

1.5.1 Οι Απαιτήσεις της ITU για 4G

Ο σχεδιασμός του LTE έλαβε χώρα την ίδια χρονική στιγμή με μια πρωτοβουλία από την ITU. Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, η ITU είχε βοηθήσει να οδηγήσει την ανάπτυξη των τεχνολογιών 3G δημοσιεύοντας μια σειρά απαιτήσεων για ένα σύστημα κινητών επικοινωνιών 3G, με την επωνυμία *Διεθνείς Κινητές Τηλεπικοινωνίες (IMT) 2000*. Τα συστήματα 3G που σημειώθηκαν νωρίτερα, είναι σήμερα τα κυριότερα αποδεκτά από την ITU καθώς πληρούν τις απαιτήσεις για το IMT-2000.

Η ITU ξεκίνησε μια παρόμοια διαδικασία το 2008, δημοσιεύοντας μια σειρά απαιτήσεων για ένα σύστημα επικοινωνίας *τέταρτης γενιάς* (4G) με το όνομα *IMT-Advanced* [9-11]. Σύμφωνα με τις εν λόγω απαιτήσεις, η μέγιστη ταχύτητα

Πίνακας 1.2 Βασικά χαρακτηριστικά δικτύων ασύρματης πρόσβασης των UMTS και LTE

Feature	UMTS	LTE	Chapter
Radio access network components	Node B, RNC	eNB	2
RRC protocol states	CELL_DCH, CELL_FACH, CELL_PCH, URA_PCH, RRC_IDLE	RRC_CONNECTED, RRC_IDLE	2
Handovers	Soft and hard	Hard	14
Neighbour lists	Always required	Not required	14

Πίνακας 1.3 Βασικά χαρακτηριστικά δικτύων κορμού των UMTS και LTE

Feature	UMTS	LTE	Chapter
IP version support	IPv4 and IPv6	IPv4 and IPv6	2
USIM version support	Release 99 USIM onwards	Release 99 USIM onwards	2
Transport mechanisms	Circuit & packet switching	Packet switching	2
CS domain components	MSC server, MGW	n/a	2
PS domain components	SGSN, GGSN	MME, S-GW, P-GW	2
IP connectivity	After registration	During registration	11
Voice and SMS	Included	External	16

δεδομένων ενός συμβατού συστήματος, πρέπει να είναι τουλάχιστον 600 Mbps στην κάτω ζεύξη και 270 Mbps στην άνω ζεύξη, με ένα εύρος ζώνης 40 MHz. Μπορούμε να δούμε αμέσως ότι τα στοιχεία αυτά υπερβαίνουν τις δυνατότητες του LTE.

1.5.2 Οι Απαιτήσεις του LTE-Advanced

Καθοδηγούμενο από τις απαιτήσεις της ITU για την IMT-Advanced, το 3GPP άρχισε να μελετά πώς να ενισχύσει τις δυνατότητες του LTE. Η κύρια παραγωγή από τη μελέτη ήταν μια προδιαγραφή για ένα σύστημα, γνωστό ως LTE-Advanced [12], στο οποίο οι κύριες απαιτήσεις είχαν ως εξής.

Το LTE-Advanced ήταν υποχρεωμένο να παραδώσει ένα μέγιστο ρυθμό δεδομένων 1000 Mbps στην κάτω ζεύξη, και 500 Mbps στην άνω ζεύξη. Στην πράξη, το σύστημα έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί τελικά να παραδώσει μέγιστους ρυθμούς δεδομένων 3000 και 1500 Mbps αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας ένα συνολικό εύρος ζώνης των 100 MHz, το οποίο γίνεται από πέντε ξεχωριστές συνιστώσες των 20 MHz η καθεμιά. Να σημειώσουμε, όπως και πριν, ότι τα στοιχεία αυτά είναι ακατόρθωτα σε οποιοδήποτε ρεαλιστικό σενάριο.

Η προδιαγραφή επίσης περιλαμβάνει στόχους για την αποτελεσματική χρήση του ραδιοφάσματος σε ορισμένα δοκιμαστικά σενάρια. Συγκριτικά με τα αντίστοιχα

στοιχεία για το WCDMA [13] συνεπάγεται μια φασματική απόδοση 4.5 έως 7 φορές μεγαλύτερη από ό,τι της Έκδοσης 6 WCDMA στην κάτω ζεύξη, και 3.5 έως 6 φορές μεγαλύτερη στην άνω ζεύξη. Τέλος, το LTE-Advanced σχεδιάστηκε να είναι συμβατό με το LTE, με την έννοια ότι ένα κινητό LTE μπορεί να επικοινωνήσει με ένα σταθμό βάσης που λειτουργεί LTE-Advanced και αντίστροφα.

1.5.3 Επικοινωνιακά Συστήματα 4G

Κατόπιν της υποβολής και αξιολόγησης των προτάσεων, η ITU ανακοίνωσε τον Οκτώβριο του 2010, ότι δύο συστήματα πληρούσαν τις προϋποθέσεις του IMT-Advanced [14]. Ένα σύστημα ήταν το LTE-Advanced, ενώ το άλλο ήταν μια βελτιωμένη έκδοση του WiMAX κάτω από τις προδιαγραφές IEEE 802.16 m, γνωστό και ως κινητό WiMAX 2.0.

Η Qualcomm είχε αρχικά ως στόχο την ανάπτυξη ενός διαδόχου 4G του cdma2000, με την ονομασία *Ultra Mobile Broadband* (UMB). Ωστόσο, αυτό το σύστημα δεν διέθετε δύο από τα πλεονεκτήματα που ο προκάτοχός του είχε πράξει. Πρώτον, δεν ήταν συμβατό με το cdma2000, με τον τρόπο που το cdma2000 ήταν με το IS-95. Δεύτερον, δεν ήταν πλέον το μόνο σύστημα που θα μπορούσε να λειτουργήσει στο στενό εύρος ζώνης που κυριάρχησε στη Βόρεια Αμερική, λόγω της ευέλικτης υποστήριξης εύρους ζώνης του LTE. Χωρίς κάποιο πειστικό λόγο για να το κάνει, κανένας φορέας εκμετάλλευσης δικτύου δεν ανακοίνωσε ποτέ σχέδια για να υιοθετήσει την τεχνολογία, και το σχέδιο εγκαταλείφθηκε το 2008. Αντ' αυτού, οι περισσότεροι φορείς cdma2000 αποφάσισαν να στραφούν στο LTE.

Αυτό άφησε μια κατάσταση όπου υπήρχαν δύο εναπομένουσες διαδρομές για κινητές επικοινωνίες 4G: τα LTE και WiMAX. Από αυτές, το LTE έχει μακράν τη μεγαλύτερη υποστήριξη μεταξύ των φορέων εκμετάλλευσης του δικτύου και των κατασκευαστών εξοπλισμού και είναι πιθανό να είναι κυρίαρχη τεχνολογία κινητών επικοινωνιών στον κόσμο, για τα επόμενα χρόνια.

1.5.4 Η Σημασία του 4G

Αρχικά, η ITU προόριζε ότι ο όρος 4G θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο για συστήματα που πληρούν τις απαιτήσεις του IMT-Advanced. Το LTE δεν το έπραξε αλλά ούτε και η κινητή WiMAX 1.0 (IEEE 802.16e). Εξαιτίας αυτού, η κοινότητα μηχανικών ήρθε για να περιγράψει αυτά τα συστήματα ως 3.9 G. Οι σκέψεις αυτές, ωστόσο, δεν σταμάτησαν την κοινότητα μάρκετινγκ από το να περιγράψει το LTE και την κινητή WiMAX 1.0, ως τεχνολογίες 4G. Παρά το γεγονός ότι η περιγραφή ήταν αδικαιολόγητη από άποψη απόδοσης, υπήρχε πραγματικά κάτι που ακουγόταν λογικό σ' αυτό: υπάρχει σαφής τεχνική μετάβαση στην κίνηση από UMTS σε LTE, η οποία δεν υπάρχει στην κίνηση από LTE σε LTE-Advanced.

Δεν ήταν πολύ πριν η ITU παραδεχθεί την ήττα. Το Δεκέμβριο του 2010, η ITU έδωσε την ευλογία της στη χρήση του 4G για να περιγράψει όχι μόνο το LTE και

την κινητή WiMAX 1.0, αλλά και οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία με σημαντικά καλύτερη απόδοση από ό,τι τα πρώτα συστήματα 3G [15]. Δεν καθόρισαν τις λέξεις «σημαντικά καλύτερη», αλλά αυτό δεν είναι ένα ζήτημα για αυτό το βιβλίο: εμείς απλά πρέπει να γνωρίζουμε ότι το LTE είναι ένα σύστημα κινητών επικοινωνιών 4G.

1.6 Οι 3GPP Προδιαγραφές για το LTE

Οι προδιαγραφές για το LTE παράγονται από το 3GPP, με τον ίδιο τρόπο όπως και οι προδιαγραφές για τα UMTS και GSM. Είναι οργανωμένες σε εκδόσεις [16], καθεμιά από τις οποίες περιέχει ένα σταθερό και σαφώς καθορισμένο σύνολο χαρακτηριστικών. Η χρήση εκδόσεων επιτρέπει στους κατασκευαστές εξοπλισμού να φτιάξουν συσκευές χρησιμοποιώντας όλα ή ορισμένα από τα χαρακτηριστικά των προηγούμενων εκδόσεων, ενώ το 3GPP συνεχίζει να προσθέσει νέα χαρακτηριστικά στο σύστημα σε μια επόμενη έκδοση. Μέσα σε κάθε έκδοση, οι προδιαγραφές εξελίσσονται μέσω ενός αριθμού διαφορετικών εκδόσεων. Νέες λειτουργίες μπορούν να προστεθούν σε διαδοχικές εκδόσεις μέχρι την ημερομηνία που η έκδοση πάγωσε, μετά από αυτή οι μόνες αλλαγές συνεπάγονται βελτίωση των τεχνικών λεπτομερειών, διορθώσεις και διευκρινίσεις.

Ο Πίνακας 1.4 παραθέτει τις εκδόσεις που το 3GPP έχει χρησιμοποιήσει από την εισαγωγή του UMTS, μαζί με τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της κάθε έκδοσης. Σημειώστε ότι το σύστημα αρίθμησης άλλαξε μετά την Έκδοση 99, έτσι ώστε οι μεταγενέστερες εκδόσεις να αριθμούνται από 4 έως 11.

Το LTE εισήχθη για πρώτη φορά στην Έκδοση 8, που σταμάτησε το Δεκέμβριο του 2008. Αυτή η έκδοση περιέχει τα περισσότερα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του LTE και θα επικεντρώσουμε σε αυτό, σε όλα τα πρώτα κεφάλαια του βιβλίου. Για τον καθορισμό της Έκδοσης 8, ωστόσο, το 3GPP παρέλειψε ορισμένα από τα λιγότερο σημαντικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Τα χαρακτηριστικά αυτά τελικά περιλήφθησαν στην Έκδοση 9, την οποία θα καλύψουμε στο Κεφάλαιο 17. Η Έκδοση 10 περιλαμβάνει τις επιπλέον δυνατότητες που απαιτούνται για την LTE-Advanced και θα καλυφθούν στο Κεφάλαιο 18 μαζί με μια σύντομη εισαγωγή για την Έκδοση 11. Το 3GPP είχε, επίσης, συνεχίσει να προσθέτει νέα χαρακτηριστικά για UMTS σε όλες τις Εκδόσεις 8 έως 11. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων που προσκολλούνται με το UMTS να παραμείνουν ανταγωνιστικοί, ακόμα και όταν άλλοι φορείς κινούνται πάνω στο LTE.

Οι προδιαγραφές είναι επίσης οργανωμένες σε αρκετές *σειρές*, καθεμιά από τις οποίες καλύπτει ένα συγκεκριμένο συστατικό του συστήματος. Ο Πίνακας 1.5 συνοψίζει τα περιεχόμενα των σειρών 21 έως 37, οι οποίες περιέχουν όλες τις προδιαγραφές για τα LTE και UMTS, καθώς και προδιαγραφές που είναι κοινές σε LTE, UMTS και GSM. (Κάποιοι άλλοι αριθμοί σειράς χρησιμοποιούνται αποκλειστικά και μόνο για το GSM). Μέσα σε αυτές τις σειρές, η κατανομή μεταξύ των διαφόρων συστημάτων ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό. Η σειρά 36 είναι αφιερωμένη στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για ασύρματη μετάδοση και λήψη στο LTE και

είναι μια σημαντική πηγή πληροφοριών για αυτό το βιβλίο. Στις άλλες σειρές, κάποιες προδιαγραφές ισχύουν για το UMTS και μόνο, μερικές για LTE μόνο και μερικές και για τα δύο, έτσι ώστε να μπορεί να είναι δύσκολο να καθοριστεί ποιες προδιαγραφές είναι οι σχετικές. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το ζήτημα, το βιβλίο περιέχει αναφορές σε όλα τα σημαντικά χαρακτηριστικά που θα χρησιμοποιήσουμε. Ολογράφως, ένα παράδειγμα αριθμού προδιαγραφών είναι TS 23.401 v 8.13.0. Εδώ, το TS ξεχωρίζει για τις *τεχνικές προδιαγραφές*, 23 είναι ο αριθμός σειράς και 401 είναι ο αριθμός της προδιαγραφής εντός της εν λόγω σειράς. Το 8 είναι ο αριθμός της έκδοσης, το 13 είναι η τεχνική έκδοχή του αριθμού εντός της έκδοσης και το τελικό 0 αποτελεί ένα συντακτικό αριθμό έκδοσης που μερικές φορές αυξάνεται για μη-τεχνικές αλλαγές. Το 3GPP παράγει επίσης *τεχνικές εκθέσεις*, που συμβολίζονται με TR, οι οποίες είναι καθαρά ενημερωτικές και έχουν τριψήφιους αριθμούς προδιαγραφών που αρχίζουν με 8 ή 9.

Σε μια τελική διάσπαση, κάθε προδιαγραφή ανήκει σε ένα από τα τρία *στάδια*. Οι προδιαγραφές του 1^{ου} σταδίου καθορίζουν την υπηρεσία από την άποψη του χρήστη και ανήκουν αποκλειστικά στη σειρά 22. Οι προδιαγραφές του 2^{ου} σταδίου καθορίζουν την υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονική και λειτουργία του συστήματος, και βρίσκονται κυρίως (αλλά όχι αποκλειστικά) στη σειρά 23. Τέλος, οι προδιαγραφές του 3^{ου} σταδίου καθορίζουν όλες τις λειτουργικές λεπτομέρειες. Οι προδιαγραφές του 2^{ου} σταδίου είναι ιδιαίτερες χρήσιμες για την επίτευξη μιας υψηλού επιπέδου κατανόησης του συστήματος. Τα πιο χρήσιμα για το LTE είναι το TS 23.401 [17] και το TS 36.300 [18], τα οποία καλύπτουν αντίστοιχα τον EPC και τη διεπαφή αέρα. Υπάρχει, ωστόσο, μια σημαντική σημείωση να προσέξουμε: αυτές οι προδιαγραφές αντικαταστάθηκαν αργότερα και δε μπορούν να επικαλεστούν για απόλυτη ακρίβεια. Αντ'αυτού, οι λεπτομέρειες θα πρέπει να ελέγχονται, εάν είναι αναγκαίο, στις σχετικές προδιαγραφές του 3^{ου} σταδίου.

Οι επιμέρους προδιαγραφές μπορούν να κατεβούν από την ιστοσελίδα αρίθμησης προδιαγραφών του 3GPP [19] ή από τον FTP εξυπηρετητή τους [20]. Η ιστοσελίδα 3GPP έχει επίσης περιλήψεις των χαρακτηριστικών που καλύπτονται από κάθε μεμονωμένη έκδοση [21].

Πίνακας 1.4 3GPP εκδόσεις προδιαγραφών για UMTS και LTE

Release	Date frozen	New features
R99	March 2000	WCDMA air interface
R4	March 2001	TD-SCDMA air interface
R5	June 2002	HSDPA, IP multimedia subsystem
R6	March 2005	HSUPA
R7	December 2007	Enhancements to HSPA
R8	December 2008	LTE, SAE
R9	December 2009	Enhancements to LTE and SAE
R10	March 2011	LTE-Advanced
R11	September 2012	Enhancements to LTE-Advanced

Πίνακας 1.5 3GPP σειρά προδιαγραφών που χρησιμοποιούν τα UMTS και LTE

Series	Scope
21	High level requirements
22	Stage 1 service specifications
23	Stage 2 service and architecture specifications
24	Non access stratum protocols
25	WCDMA and TD-SCDMA air interfaces and radio access network
26	Codecs
27	Data terminal equipment
28	Tandem free operation of speech codecs
29	Core network protocols
30	Programme management
31	UICC and USIM
32	Operations, administration, maintenance, provisioning and charging
33	Security
34	UE test specifications
35	Security algorithms
36	LTE air interface and radio access network
37	Multiple radio access technologies

Αναφορές

1. 3rd Generation Partnership Project (2011) *3GPP*. Available at: <http://www.3gpp.org> (accessed 12 December, 2011).
2. 4G Americas (May 2010) *MIMO and Smart Antennas for 3G and 4G Wireless Systems*, section 2.
3. 3rd Generation Partnership Project 2 (2010) *Welcome to the 3GPP2 Homepage*. Available at: <http://www.3gpp2.org> (accessed 12 December, 2011).
4. Ericsson (November 2011) *Traffic and Market Data Report*.
5. Shannon, C. E. (1948) A mathematical theory of communication, *The Bell System Technical Journal*, **27**, 379–428 and 623–656.
6. 3GPP TS 25.913 (January 2009) *Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN)*, Release 8.
7. 3GPP TS 22.278 (December 2009) *Service Requirements for the Evolved Packet System (EPS)*, Release 8.
8. 3GPP TS 23.203 (June 2011) *Policy and Charging Control Architecture*, Release 10, section 6.1.7.2.
9. International Telecommunication Union (2008) *Requirements, Evaluation Criteria and Submission Templates for the Development of IMT-Advanced*, ITU report ITU-R M.2133.
10. International Telecommunication Union (2008) *Requirements Related to Technical Performance for IMT Advanced Radio Interface(s)*, ITU report ITU-R M.2134.
11. International Telecommunication Union (2008) *Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-Advanced*, ITU report ITU-R M.2135.
12. 3GPP TS 36.913 (April 2011) *Requirements for Further Advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced)*, Release 10.
13. 3GPP TS 25.912 (April 2011) *Feasibility Study for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)*, Release 10, section 13.5.
14. International Telecommunication Union (2010) *ITU Paves Way for Next-Generation 4G Mobile Technologies*. Available at: http://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2010/40.aspx (accessed 12 December, 2011).
15. International Telecommunication Union (2010) *ITU World Radiocommunication Seminar Highlights Future Communication Technologies*. Available at:

- http://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2010/48.aspx (accessed 12 December, 2011).
16. 3rd Generation Partnership Project (2011) *3GPP – Releases*. Available at: <http://www.3gpp.org/releases> (accessed 12 December, 2011).
 17. 3GPP TS 23.401 (September 2011) *General Packet Radio Service (GPRS) Enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Access*, Release 10.
 18. 3GPP TS 36.300 (October 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall Description; Stage 2*, Release 10.
 19. 3rd Generation Partnership Project (2011) *3GPP - Specification Numbering*, Available at: <http://www.3gpp.org/specification-numbering> (accessed 12 December, 2011).
 20. 3rd Generation Partnership Project (2011) *FTP Directory*. Available at: <ftp://ftp.3gpp.org/specs/latest/> (accessed 12 December, 2011).
 21. 3rd Generation Partnership Project (2011) *FTP Directory*. Available at: ftp://ftp.3gpp.org/Information/WORK_PLAN/DescriptionReleases/ (accessed 12 December, 2011).

2

Εξέλιξη Αρχιτεκτονικής Συστήματος

Αυτό το κεφάλαιο καλύπτει την υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονική του LTE. Ξεκινάμε περιγράφοντας τις συνιστώσες υλικού υπολογιστών, σε ένα δίκτυο LTE και αναθεωρώντας τα πρωτοκόλλα λογισμικού που χρησιμοποιούν αυτές οι συνιστώσες για να επικοινωνούν. Μπορούμε στη συνέχεια να εξετάσουμε πιο λεπτομερώς τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά δεδομένων στο LTE, πριν συζητήσουμε την κατάσταση των διαγραμμάτων και τη χρήση του ραδιοφάσματος. Θα αφήσουμε κάποια πιο εξειδικευμένα θέματα αρχιτεκτονικής μέχρι τα επόμενα κεφάλαια, κυρίως εκείνα που σχετίζονται με την ποιότητα των υπηρεσιών, τη φόρτιση και την ενδοσυστηματική λειτουργία.

Διάφορες προδιαγραφές σχετίζονται σε αυτό το κεφάλαιο. Οι TS 23.401 [1] και TS 36.300 [2] είναι οι προδιαγραφές του 2^{ου} σταδίου που περιλαμβάνουν περιγραφές της αρχιτεκτονικής του συστήματος, ενώ οι σχετικές προδιαγραφές του 3^{ου} σταδίου [3, 4] περιέχουν τις αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες. Θα σημειώσουμε επίσης μερικές άλλες σημαντικές προδιαγραφές, καθώς προχωράμε.

2.1 Η Αρχιτεκτονική του LTE

2.1.1 Αρχιτεκτονική Υψηλού Επιπέδου

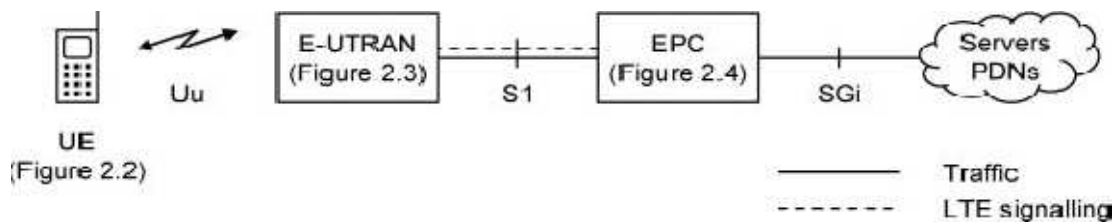
Το Σχήμα 2.1 εξετάζει την υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονική του EPS. Υπάρχουν τρία βασικά συστατικά, δηλαδή ο UE, το E-UTRAN και ο EPC. Με τη σειρά του, ο EPC επικοινωνεί με PDNs στον έξω κόσμο όπως το διαδίκτυο, τα ιδιωτικά εταιρικά δίκτυα ή το IMS. Οι διασυνδέσεις μεταξύ των διάφορων τμημάτων του συστήματος συμβολίζονται Uu, S1 και SGI.

Οι EE, E-UTRAN και EPC έχουν το καθένα τις δικές τους εσωτερικές αρχιτεκτονικές και θα τις συζητήσουμε τώρα μια προς μια.

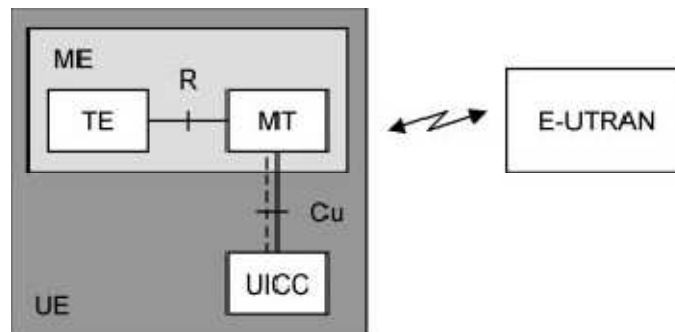
2.1.2 Ο Εξοπλισμός του Χρήστη

Το Σχήμα 2.2 δείχνει την εσωτερική αρχιτεκτονική του UE [5]. Η αρχιτεκτονική του είναι ταυτόσημη με εκείνη που χρησιμοποιείται από τα UMTS και GSM.

Η πραγματική συσκευή επικοινωνίας είναι γνωστή ως ο *κινητός εξοπλισμός* (ME). Στην περίπτωση ενός voice mobile ή ενός smartphone, αυτό είναι μόνο μια ενιαία συσκευή. Ωστόσο, ο κινητός εξοπλισμός μπορεί επίσης να διαιρεθεί σε δύο συνιστώσες, δηλαδή στο *κινητό τερματισμό* (MT), το οποίο χειρίζεται όλες τις λειτουργίες επικοινωνίας, και στον *τερματικό εξοπλισμό* (TE), ο οποίος τερματίζει τις



Σχήμα 2.1 Αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου του LTE.



Σχήμα 2.2 Εσωτερική αρχιτεκτονική του UE. Ανατύπωση με την άδεια του ETSI.

ροές δεδομένων. Ο MT θα μπορούσε να είναι μια συνδεδετική LTE κάρτα για ένα φορητό υπολογιστή, για παράδειγμα, στην οποία περίπτωση ο TE θα ήταν ο ίδιος ο φορητός υπολογιστής.

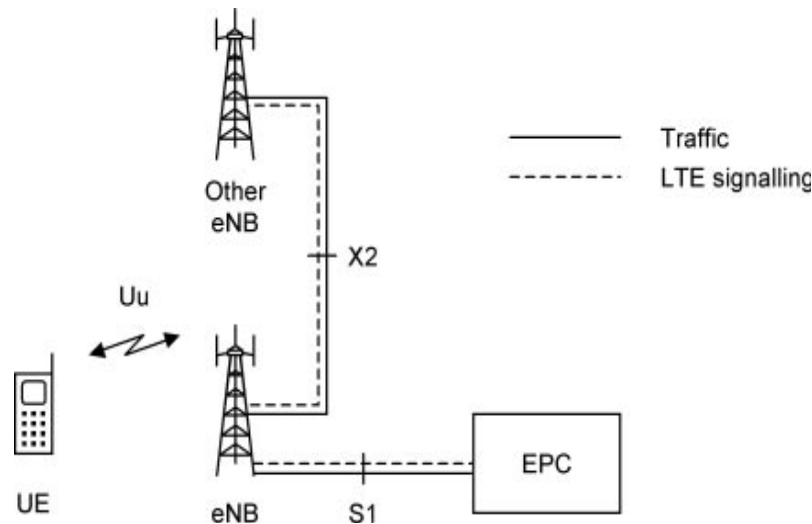
Η *universal integrated circuit card* (UICC) είναι μια έξυπνη κάρτα, κοινώς γνωστή ως κάρτα SIM. Εκτελεί μια εφαρμογή γνωστή ως *παγκόσμια μονάδα ταυτότητας συνδρομητή* (USIM) [6], η οποία αποθηκεύει δεδομένα ειδικά για το χρήστη, όπως τον αριθμό τηλεφώνου του χρήστη και την ταυτότητα οικείου δικτύου. Η USIM πραγματοποιεί επίσης διάφορους υπολογισμούς σχετικά με την ασφάλεια, χρησιμοποιώντας ασφαλή κλειδιά που αποθηκεύει η έξυπνη κάρτα. Το LTE υποστηρίζει κινητά που χρησιμοποιούν μια USIM από την Έκδοση 99 ή μετέπειτα, αλλά δεν υποστηρίζει τη *μονάδα ταυτότητας συνδρομητή* (SIM) που χρησιμοποιήθηκε από προηγούμενες εκδόσεις του GSM.

Επιπλέον, το LTE υποστηρίζει κινητά που χρησιμοποιούν IP έκδοση 4 (IPv4), IP έκδοση 6 (IPv6), ή διπλή στοίβα IPv4/ IPv6. Ένα κινητό λαμβάνει μία διεύθυνση IP για κάθε δίκτυο πακέτων δεδομένων με το οποίο επικοινωνεί, για παράδειγμα ένα για το διαδίκτυο και ένα για κάθε ιδιωτικό εταιρικό δίκτυο. Εναλλακτικά, το κινητό μπορεί να λάβει μια διεύθυνση IPv4 καθώς και μια διεύθυνση IPv6, αν το κινητό και το δίκτυο, υποστηρίζουν και τα δύο τις δύο εκδοχές του πρωτοκόλλου.

Τα κινητά μπορούν να έχουν μια ευρεία ποικιλία ασύρματων δυνατοτήτων [7], που καλύπτουν ζητήματα όπως το μέγιστο ρυθμό δεδομένων που μπορούν να χειριστούν, τους διαφορετικούς τύπους τεχνολογίας ασύρματης πρόσβασης που υποστηρίζουν και τις φέρουσες συχνότητες στις οποίες μπορούν να μεταδίδουν και να λαμβάνουν. Τα κινητά περνούν αυτές τις δυνατότητες στο δίκτυο ασύρματης

Πίνακας 2.1 Κατηγορίες UE. Ανατύπωση με την άδεια του ETSI.

UE category	Release	Maximum # DL bits per ms	Maximum # UL bits per ms	Maximum # DL layers	Maximum # UL layers	Support of UL 64-QAM?
1	R8	10 296	5 160	1	1	No
2	R8	51 024	25 456	2	1	No
3	R8	102 048	51 024	2	1	No
4	R8	150 752	51 024	2	1	No
5	R8	299 552	75 376	4	1	Yes
6	R10	301 504	51 024	4	1	No
7	R10	301 504	102 048	4	2	No
8	R10	2 998 560	1 497 760	8	4	Yes



Σχήμα 2.3 Αρχιτεκτονική του E-UTRAN.

πρόσβασης μέσω μηνυμάτων σηματοδότησης, έτσι ώστε το E-UTRAN να ξέρει πώς να τα ελέγχει σωστά. Οι πιο σημαντικές ικανότητες ομαδοποιούνται μαζί στην *κατηγορία UE*. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1, η κατηγορία UE καλύπτει κυρίως το μέγιστο ρυθμό δεδομένων με τον οποίο το κινητό μπορεί να μεταδώσει και να λάβει. Καλύπτει επίσης ορισμένα τεχνικά ζητήματα που παρατίθενται στις τρεις τελευταίες στήλες του πίνακα, τα οποία θα καλύψουμε στα Κεφάλαια 3 και 5.

2.1.3 Εξελεγμένο Επίγειο Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης UMTS

Το E-UTRAN [8] απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3. Το E-UTRAN χειρίζεται τις ασύρματες επικοινωνίες μεταξύ του κινητού και του EPC και έχει ένα μόνο

συστατικό, τον *εξελιγμένο κόμβο Β* (eNB).

Κάθε eNB είναι ένας σταθμός βάσης που ελέγχει τα κινητά σε μία ή περισσότερες κυψέλες. Ένα κινητό επικοινωνεί με έναν μόνο σταθμό βάσης και μία κυψέλη κάθε φορά, οπότε δεν υπάρχει ισοδύναμη της κατάστασης ομαλής μεταπομπής από το UMTS. Ο σταθμός βάσης που επικοινωνεί με ένα κινητό είναι γνωστός ως ο *eNB εξυπηρετήσης* του.

Ο eNB έχει δύο κύριες λειτουργίες. Πρώτον, ο eNB στέλνει ασύρματες μεταδόσεις σε όλα τα κινητά του στην κάτω ζεύξη και δέχεται μεταδόσεις από αυτά στην άνω ζεύξη, χρησιμοποιώντας τις αναλογικές και τις ψηφιακές λειτουργίες επεξεργασίας σήματος της LTE διεπαφής αέρα. Δεύτερον, ο eNB ελέγχει τη χαμηλού επιπέδου λειτουργία όλων των κινητών του, στέλνοντάς τους μηνύματα σηματοδότησης, όπως εντολές μεταβίβασης που σχετίζονται με τις ασύρματες μεταδόσεις. Κατά την εκτέλεση αυτών των καθηκόντων, ο eNB συνδυάζει τις προηγούμενες λειτουργίες του κόμβου Β και του ελεγκτή ασύρματου δικτύου, για να μειώσει την καθυστέρηση που προκύπτει όταν το κινητό ανταλλάσσει πληροφορίες με το δίκτυο.

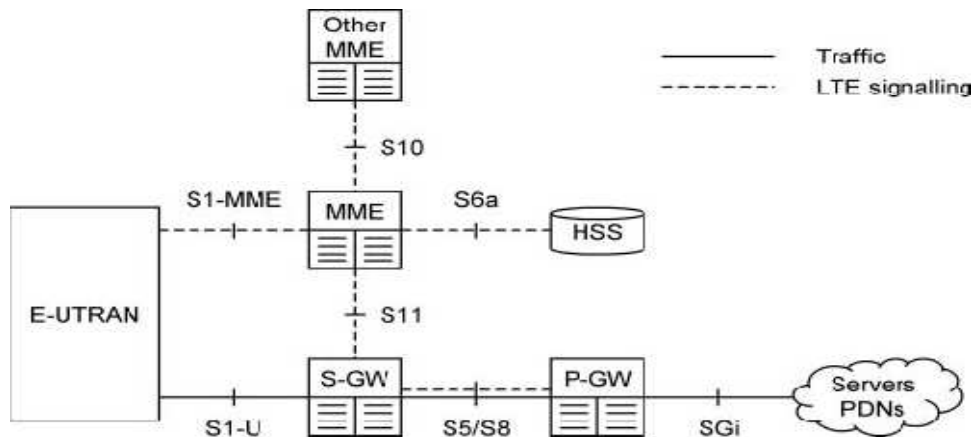
Κάθε σταθμός βάσης είναι συνδεδεμένος με τον EPC μέσω της διεπαφής S1. Μπορεί επίσης να συνδεθεί σε κοντινούς σταθμούς βάσης από τη διεπαφή X2, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για σηματοδότηση και προώθηση πακέτων κατά τη διάρκεια της παράδοσης. Η διεπαφή X2 είναι προαιρετική, στο ότι η διεπαφή S1 μπορεί επίσης να χειριστεί όλες τις λειτουργίες της X2, έστω και έμμεσα και πιο αργά. Συνήθως, οι διεπαφές S1 και X2 δεν έχουν άμεσες φυσικές συνδέσεις: αντ' αυτού, οι πληροφορίες δρομολογούνται σε μια βαθύτερη IP που βασίζεται στο δίκτυο μεταφοράς με τον τρόπο που φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Το ίδιο θέμα θα ισχύει για τις διεπαφές του EPC, παρακάτω.

Ένας *οικείος eNB* (HeNB) είναι ένας σταθμός βάσης που έχει αγοραστεί από έναν χρήστη για να παρέχει κάλυψη femtocell μέσα στο σπίτι [9]. Ένας HeNB ανήκει σε μια *κλειστή ομάδα συνδρομητή* (CSG) και μπορεί να προσεγγιστεί μόνο από κινητά με μία USIM που επίσης ανήκει στην CSG. Από μια αρχιτεκτονική άποψη, ένας HeNB μπορεί άμεσα να συνδεθεί στον EPC με τον ίδιο τρόπο όπως οποιοσδήποτε άλλος σταθμός βάσης, ή μπορεί να συνδεθεί μέσω μιας ενδιάμεσης συσκευής, γνωστή ως μια *πύλη HeNB* που συλλέγει τις πληροφορίες από διάφορους HeNB. Οι HeNB ελέγχουν μόνο μια κυψέλη, και δεν υποστηρίζουν τη διεπαφή X2 μέχρι την Έκδοση 10.

2.1.4 Εξελιγμένος Πυρήνας Πακέτου

Το Σχήμα 2.4 παρουσιάζει τα κύρια συστατικά του EPC [10, 11]. Έχουμε ήδη δει ένα συστατικό, τον HSS, ο οποίος είναι μια κεντρική βάση δεδομένων που περιέχει πληροφορίες για όλους τους συνδρομητές φορέων εκμετάλλευσης δικτύου. Αυτό είναι ένα από τα λίγα συστατικά του LTE που έχει μεταφερθεί από τα UMTS και GSM.

Η *πύλη δικτύου πακέτων δεδομένων* (PDN) (P-GW) είναι το σημείο επαφής



Σχήμα 2.4 Κύρια συστατικά του EPC.

του EPC με τον έξω κόσμο. Μέσω της διεπαφής SGi, κάθε πύλη PDN ανταλλάσει δεδομένα με μία ή περισσότερες εξωτερικές συσκευές ή PDNs, όπως οι συνδρομητές φορέων εκμετάλλευσης δικτύου, το διαδίκτυο ή το IMS. Κάθε δίκτυο πακέτων δεδομένων προσδιορίζεται από ένα όνομα σημείου πρόσβασης (APN) [12]. Ένας φορέας εκμετάλλευσης δικτύου συνήθως χρησιμοποιεί ελάχιστα διαφορετικά APNs, για παράδειγμα ένα για τους δικούς του διακομιστές και ένα για το διαδίκτυο.

Κάθε κινητό εκχωρείται σε μια προεπιλεγμένη πύλη PDN, όταν ενεργοποιείται για πρώτη φορά, να δίνει πάντα ενεργή σύνδεση σε ένα προεπιλεγμένο δίκτυο πακέτων δεδομένων, όπως το διαδίκτυο. Αργότερα, ένα κινητό μπορεί να εκχωρηθεί σε μια ή περισσότερες πρόσθετες πύλες PDN, αν επιθυμεί να συνδεθεί σε πρόσθετα PDNs, όπως τα ιδιωτικά εταιρικά δίκτυα. Κάθε πύλη PDN παραμένει η ίδια καθ' όλη τη διάρκεια της σύνδεσης δεδομένων.

Η πύλη εξυπηρέτησης (S-GW) ενεργεί σαν ένας δρομολογητής, και προωθεί τα δεδομένα μεταξύ του σταθμού βάσης και της πύλης PDN. Ένα τυπικό δίκτυο μπορεί να περιέχει ελάχιστες S-GWs, καθεμιά από τις οποίες καλύπτει τα κινητά σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Κάθε κινητό εκχωρείται σε μια ενιαία S-GW, αλλά η S-GW μπορεί να αλλάξει αν το κινητό μετατοπίζεται αρκετά μακριά.

Ο φορέας διαχείρισης κινητικότητας (MME) ελέγχει την υψηλού επιπέδου λειτουργία του κινητού, στέλνοντάς του μηνύματα σηματοδότησης σχετικά με θέματα όπως η ασφάλεια και η διαχείριση ροών δεδομένων που δεν σχετίζονται με ραδιοεπικοινωνίες. Όπως και με την S-GW, ένα τυπικό δίκτυο μπορεί να περιέχει ελάχιστους MMEs, καθένας από τους οποίους καλύπτει μια ορισμένη γεωγραφική περιοχή. Κάθε κινητό εκχωρείται σε έναν ενιαίο MME, ο οποίος είναι γνωστός ως ο MME εξυπηρέτησης του, αλλά αυτό μπορεί να αλλάξει αν το κινητό κινείται αρκετά μακριά. Ο MME ελέγχει επίσης τα άλλα στοιχεία του δικτύου, μέσω των μηνυμάτων σηματοδότησης που είναι στο εσωτερικό του EPC.

Σε σύγκριση με το UMTS και το GSM φαίνεται ότι η πύλη PDN έχει τον ίδιο ρόλο ως GGSN, ενώ η S-GW και ο MME χειρίζονται τη δρομολόγηση δεδομένων και τη σηματοδότηση λειτουργιών του SGSN. Διαχωρίζοντας τον SGSN σε δύο, καθιστά ευκολότερο για έναν χειριστή να αναβαθμίσει το δίκτυο ως απάντηση σε ένα

αυξημένο φορτίο: ο χειριστής μπορεί να προσθέσει περισσότερες S-GWs καθώς αυξάνεται η κίνηση, ενώ προσθέτει περισσότερους MMEs, για να χειριστεί μια αύξηση στον αριθμό των κινητών. Για την υποστήριξη αυτού του διαχωρισμού, η διεπαφή S1 έχει δύο συνιστώσες: η διεπαφή S1-U μεταφέρει κίνηση για την S-GW, ενώ η διεπαφή S1-MME μεταφέρει μηνύματα σηματοδότησης για τον MME.

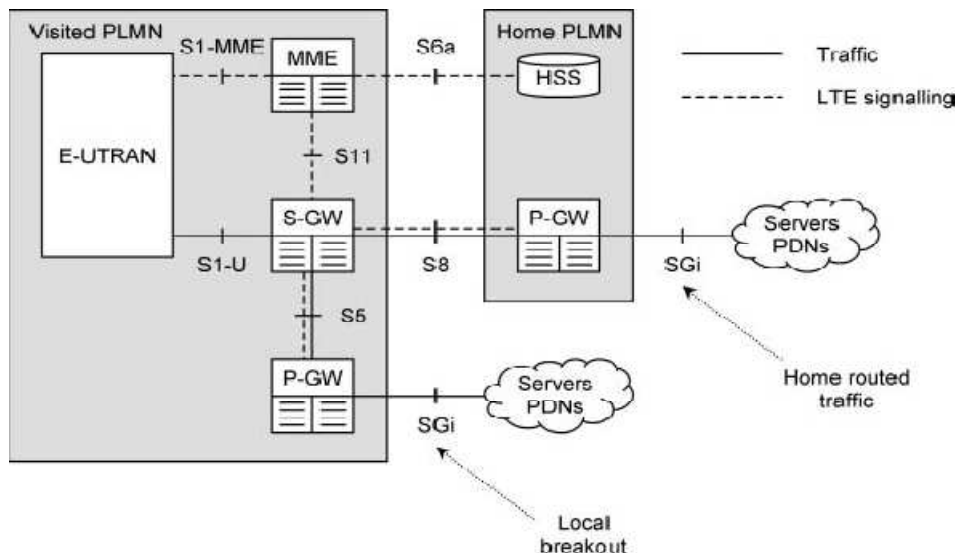
Ο EPC έχει κάποια άλλα συστατικά που δε φαίνονται στο Σχήμα 2.4. Πρώτον, το κέντρο εκπομπής κυψέλης (CBC) χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως από το UMTS για τη σπάνια εφαρμοσμένη υπηρεσία εκπομπής κυψέλης (CBS). Στο LTE, ο εξοπλισμός επαναχρησιμοποιείται για μια υπηρεσία γνωστή ως το σύστημα προειδοποίησης σεισμού και τσουνάμι (ETWS) [13]. Δεύτερον, ο καταχωρητής ταυτότητας εξοπλισμού (EIR) επίσης κληρονομήθηκε από το UMTS, και καταγράφει τις λεπτομέρειες των χαμένων ή κλεμμένων κινητών. Εμείς θα εισάγουμε περαιτέρω στοιχεία αργότερα στο βιβλίο, όταν εξετάσουμε τη διαχείριση της ποιότητας των υπηρεσιών, και της διαλειτουργικότητας μεταξύ LTE και άλλων συστημάτων κινητών επικοινωνιών.

2.1.5 Αρχιτεκτονική Περιαγωγής

Η περιαγωγή επιτρέπει στους χρήστες να κινούνται εκτός περιοχής κάλυψης των φορέων εκμετάλλευσης δικτύου τους, χρησιμοποιώντας τους πόρους από δύο διαφορετικά δίκτυα. Βασίζεται στην ύπαρξη μιας συμφωνίας περιαγωγής, η οποία καθορίζει πώς οι φορείς θα μοιράσουν τα προκύπτοντα έσοδα. Υπάρχουν δύο πιθανές αρχιτεκτονικές [14], οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.5.

Αν ένας χρήστης είναι σε περιαγωγή, τότε ο HSS είναι πάντα στο οικείο δίκτυο, ενώ το κινητό, το E-UTRAN, ο MME και η S-GW είναι πάντα στο επισκεπτόμενο δίκτυο. Η πύλη PDN, ωστόσο, μπορεί να είναι σε δύο θέσεις. Στη συνηθισμένη κατάσταση της οικείας δρομολογημένης κυκλοφορίας, η πύλη PDN βρίσκεται στο οικείο δίκτυο, μέσω του οποίου ολόκληρη η κίνηση του χρήστη είναι δρομολογημένη. Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει στο χειριστή του οικείου δικτύου να δει όλη την κίνηση και να χρεώσει άμεσα το χρήστη για αυτό, αλλά μπορεί να είναι ανεπαρκής αν ο χρήστης ταξιδεύει στο εξωτερικό, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια μιας φωνητικής κλήσης με έναν άλλο χρήστη σε κοντινή απόσταση. Για την αντιμετώπιση αυτής της κατάστασης, οι προδιαγραφές υποστηρίζουν επίσης το *local breakout*, στο οποίο η πύλη PDN βρίσκεται στο επισκεπτόμενο δίκτυο. Το HSS υποδεικνύει ότι το οικείο δίκτυο θα επιτρέψει ή όχι το *local breakout*, για κάθε συνδυασμό του χρήστη και του APN [15].

Η διεπαφή μεταξύ των πυλών εξυπηρέτησης και PDN είναι γνωστή ως S5/S8. Αυτό έχει δύο ελαφρώς διαφορετικές εφαρμογές, δηλαδή το S5, αν οι δύο συσκευές είναι στο ίδιο δίκτυο, και το S8 αν είναι σε διαφορετικά δίκτυα. Για τα κινητά που δεν χρησιμοποιούν την υπηρεσία περιαγωγής, οι πύλες εξυπηρέτησης και PDN μπορούν να ενσωματωθούν σε μια ενιαία συσκευή, έτσι ώστε η διεπαφή S5/S8 να εξαφανίζεται εντελώς. Αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο λόγω της σχετικής μείωσης της καθυστέρησης.



Σχήμα 2.5 Αρχιτεκτονική LTE για ένα κινητό περιαγωγής.

2.1.6 Περιοχές Δικτύου

Ο EPC χωρίζεται σε τρεις διαφορετικούς τύπους γεωγραφικής περιοχής [16], οι οποίοι απεικονίζονται στο Σχήμα 2.6.

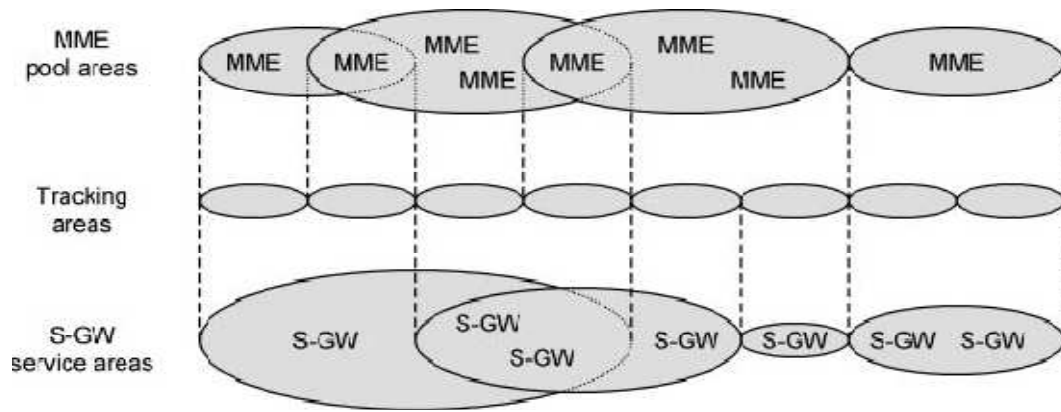
Μια *MME pool area* είναι μια περιοχή μέσω της οποίας το κινητό μπορεί να κινηθεί χωρίς αλλαγή για τον MME εξυπηρέτησης. Κάθε pool area ελέγχεται από έναν ή περισσότερους MMES, ενώ κάθε σταθμός βάσης είναι συνδεδεμένος με όλους τους MMES σε μία pool area μέσω της διεπαφής S1-MME. Οι pool areas μπορούν επίσης να εξέχουν. Τυπικά, ένας φορέας εκμετάλλευσης δικτύου θα μπορούσε να διαμορφώσει μία pool area για να καλύψει μια μεγάλη περιοχή δικτύου, όπως μια μεγάλη πόλη, και να προσθέσει MMES στην pool καθώς το φορτίο σηματοδότησης αυξάνεται σε αυτή την πόλη.

Ομοίως, μια *περιοχή υπηρεσιών S-GW* είναι μια περιοχή που εξυπηρετείται από μία ή περισσότερες S-GWs, μέσω της οποίας το κινητό μπορεί να κινηθεί χωρίς μια αλλαγή στην S-GW. Κάθε σταθμός βάσης είναι συνδεδεμένος με όλες τις S-GWs σε μια περιοχή εξυπηρέτησης, μέσω της διεπαφής S1-U. Οι περιοχές εξυπηρέτησης S-GW δεν αντιστοιχούν απαραίτητα σε MME pool areas.

Οι MME pool areas και οι περιοχές εξυπηρέτησης S-GW είναι και οι δύο κατασκευασμένες από μικρότερες, μη-επικαλυπτόμενες μονάδες, γνωστές ως *περιοχές εντοπισμού (TAs)*. Αυτές χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των θέσεων των κινητών τηλεφώνων που είναι σε κατάσταση αναμονής και είναι παρόμοιες στη θέση και τις περιοχές δρομολόγησης από τα UMTS και GSM.

2.1.7 Αρίθμηση, Διευθυνσιοδότηση και Ταυτοποίηση

Τα συστατικά του δικτύου συνδέονται με αρκετές διαφορετικές ταυτότητες [17].



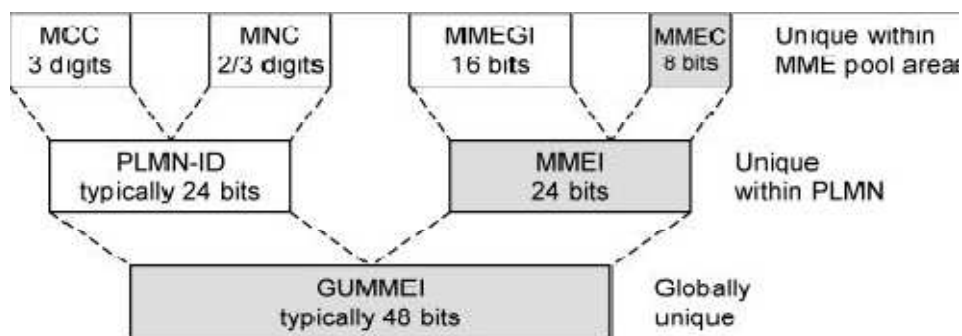
Σχήμα 2.6 Σχέση μεταξύ TAs, MME pool areas και περιοχών εξυπηρέτησης S-GW.

Όπως στα προηγούμενα συστήματα, κάθε δίκτυο συνδέεται με μια ταυτότητα δικτύου κινητών επικοινωνιών (PLMN-ID). Αυτή περιλαμβάνει έναν τριψήφιο κωδικό χώρας κινητής τηλεφωνίας (MCC) και έναν κωδικό δικτύου κινητής τηλεφωνίας (MNC) δύο ή τριών ψηφίων. Για παράδειγμα, ο MCC για το Ηνωμένο Βασίλειο είναι 234, ενώ το δίκτυο της βρετανικής Vodafone, χρησιμοποιεί έναν MNC των 15.

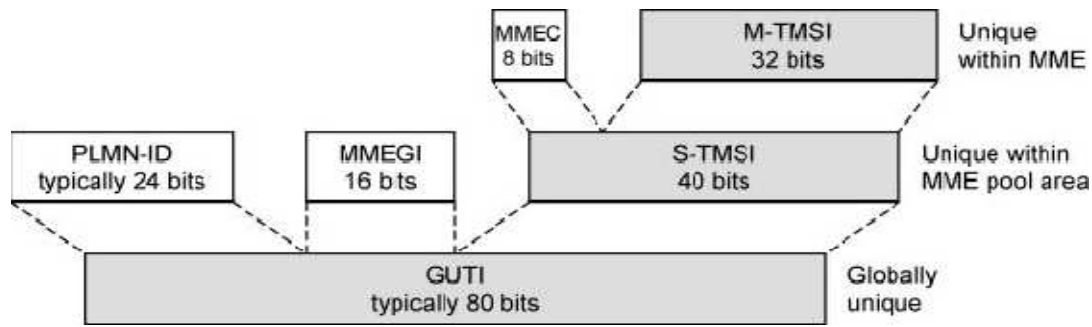
Κάθε MME έχει τρεις βασικές ταυτότητες, οι οποίες εμφανίζονται ως τα σκιασμένα τμήματα του Σχήματος 2.7. Ο MME κώδικας των 8 bit (MMEC) προσδιορίζει με μοναδικό τρόπο τον MME σε όλες τις pool areas που ανήκει. Συνδυάζοντας αυτό με μια ομάδα ταυτότητας MME των 16 bit (MMEGI), καταλήγουμε σε ένα αναγνωριστικό MME των 24-bit (MMEI), το οποίο προσδιορίζει μοναδικά τον MME μέσα σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο. Εισάγοντας την ταυτότητα του δικτύου, καταλήγουμε στο παγκοσμίως μοναδικό αναγνωριστικό MME (GUMMEI), το οποίο καθορίζει τον MME οπουδήποτε στον κόσμο.

Ομοίως, κάθε περιοχή εντοπισμού έχει δύο βασικές ταυτότητες. Ο 16-bit κωδικός περιοχής εντοπισμού (TAC) προσδιορίζει μια περιοχή εντοπισμού μέσα σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο. Συνδυάζοντας αυτό με την ταυτότητα δικτύου δίνει την παγκοσμίως μοναδική ταυτότητα περιοχής εντοπισμού (TAI).

Οι κυψέλες έχουν τρία είδη ταυτότητας. Η 28-bit E-UTRAN ταυτότητα κυψέλης (ECI) εντοπίζει μία κυψέλη μέσα σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο, ενώ η E-



Σχήμα 2.7 Ταυτότητες που χρησιμοποιούνται από το MME.

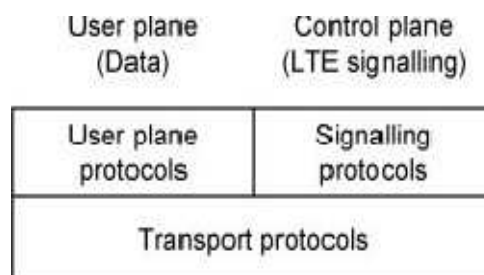


Σχήμα 2.8 Προσωρινές ταυτότητες που χρησιμοποιούνται από το κινητό.

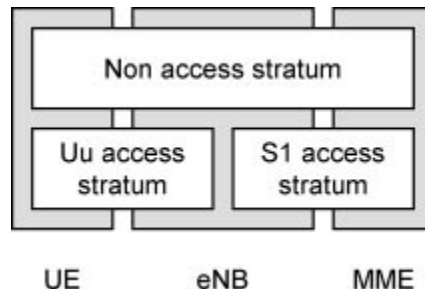
UTRAN cell global identifier (ECGI) προσδιορίζει μία κυψέλη οπουδήποτε στον κόσμο. Επίσης, σημαντικό για τη διεπαφή αέρα είναι η φυσική ταυτότητα κυψέλης, η οποία είναι ένας αριθμός από το 0 έως το 503 που διακρίνει μία κυψέλη από τους άμεσους γείτονές της.

Ένα κινητό συνδέεται επίσης με αρκετές διαφορετικές ταυτότητες. Οι πιο σημαντικές είναι η διεθνής ταυτότητα εξοπλισμού του κινητού (IMEI), η οποία είναι μια μοναδική ταυτότητα για τον ME, και η διεθνής ταυτότητα συνδρομητή του κινητού (IMSI), η οποία είναι μια μοναδική ταυτότητα για την UICC και την USIM.

Η IMSI είναι μία από τις ποσότητες που ένας εισβολέας χρειάζεται για να κλωνοποιήσει ένα κινητό, έτσι μπορούμε να αποφύγουμε τη μετάδοσή του σε όλη τη διεπαφή αέρα, όπου είναι δυνατόν. Αντ' αυτού, ένας MME εξυπηρέτησης προσδιορίζει κάθε κινητό που χρησιμοποιεί προσωρινές ταυτότητες, το οποίο ενημερώνει σε τακτά χρονικά διαστήματα. Τρεις τύποι προσωρινής ταυτότητας είναι σημαντικοί, και εμφανίζονται ως τα σκιασμένα τμήματα του Σχήματος 2.8. Η *M προσωρινή ταυτότητα συνδρομητή του κινητού* των 32 bit (M-TMSI) προσδιορίζει ένα κινητό για τον MME εξυπηρέτησής του. Προσθέτοντας τα αποτελέσματα του MMEC στην *S προσωρινή ταυτότητα συνδρομητή του κινητού* των 40 bit (S-TMSI), η οποία προσδιορίζει το κινητό μέσα σε μία MME pool area. Τέλος, προσθέτοντας τη MMEGI και τα PLMN αποτελέσματα ταυτότητας στην πιο σημαντική ποσότητα, την παγκοσμίως μοναδική προσωρινή ταυτότητα (GUTI).



Σχήμα 2.9 Αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου πρωτοκόλλου του LTE.



Σχήμα 2.10 Σχέση μεταξύ του AS και του NAS επί της διεπαφής αέρα.

2.2 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας

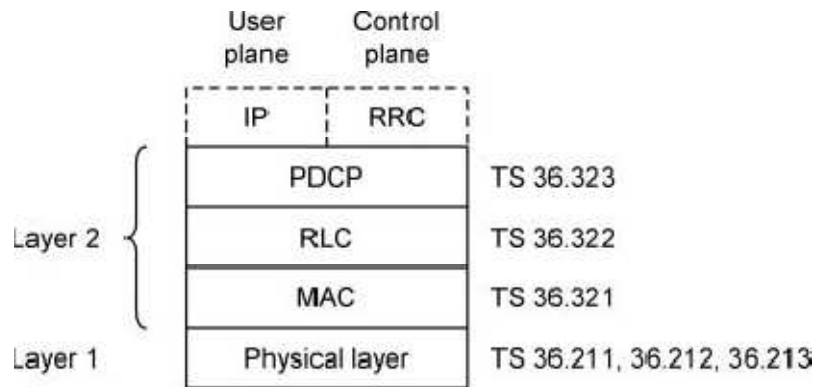
2.2.1 Μοντέλο Πρωτοκόλλου

Κάθε διεπαφή από την προηγούμενη ενότητα, συνδέεται με μια στοίβα πρωτοκόλλων, την οποία χρησιμοποιούν τα στοιχεία δικτύου για ανταλλαγή δεδομένων και μηνυμάτων σηματοδότησης. Το Σχήμα 2.9 δείχνει την υψηλού επιπέδου δομή αυτών των στοιβών πρωτοκόλλου.

Η στοίβα πρωτοκόλλου έχει δύο επίπεδα. Τα πρωτόκολλα στο *επίπεδο χρήστη* χειρίζονται δεδομένα που έχουν ενδιαφέρον για τον χρήστη, ενώ τα πρωτόκολλα στο *επίπεδο ελέγχου* χειρίζονται μηνύματα σηματοδότησης που είναι ενδιαφέροντα μόνο για τα ίδια τα στοιχεία δικτύου τους. Η στοίβα πρωτοκόλλου έχει επίσης δύο κύρια στρώματα. Το ανώτερο στρώμα χειρίζεται πληροφορίες με έναν τρόπο ειδικό για LTE, ενώ το κάτω στρώμα μεταφέρει πληροφορίες από το ένα σημείο στο άλλο. Στο E-UTRAN, είναι γνωστά ως το *στρώμα ασύρματου δικτύου* και το *στρώμα μεταφοράς δικτύου* αντίστοιχα.

Υπάρχουν λοιπόν τρία είδη πρωτοκόλλων. Τα *πρωτόκολλα σηματοδότησης* ορίζουν μια γλώσσα με την οποία δύο συσκευές μπορούν να ανταλλάσσουν μηνύματα σηματοδότησης μεταξύ τους. Τα *πρωτόκολλα επιπέδου χρήστη* χειρίζονται τα δεδομένα στο επίπεδο χρήστη, πιο συχνά για να βοηθήσουν τη διαδρομή των δεδομένων εντός του δικτύου. Τέλος, τα *βασικά πρωτόκολλα μεταφοράς*, μεταφέρουν δεδομένα και μηνύματα σηματοδότησης από το ένα μέρος στο άλλο.

Στη διεπαφή αέρα, υπάρχει ένα επιπλέον επίπεδο πολυπλοκότητας, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 2.10 [18]. Όπως σημειώθηκε νωρίτερα, ο MME ελέγχει την υψηλού επιπέδου συμπεριφορά του κινητού, στέλνοντάς του μηνύματα σηματοδότησης. Ωστόσο, δεν υπάρχει άμεση διαδρομή μεταξύ του MME και του κινητού, μέσω των οποίων αυτά τα μηνύματα μπορούν να μεταφερθούν. Για να το χειριστεί αυτό, η διεπαφή αέρα διαιρείται σε δύο επίπεδα, γνωστά ως το *access stratum* (AS) και το *non access stratum* (NAS). Τα υψηλού επιπέδου μηνύματα σηματοδότησης βρίσκονται στο NAS και μεταφέρονται χρησιμοποιώντας τα πρωτόκολλα AS των διεπαφών S1 και Uu.



Σχήμα 2.11 Πρωτόκολλα μεταφοράς που χρησιμοποιούνται για τη διεπαφή αέρα. Ανατύπωση με την άδεια του ETSI.

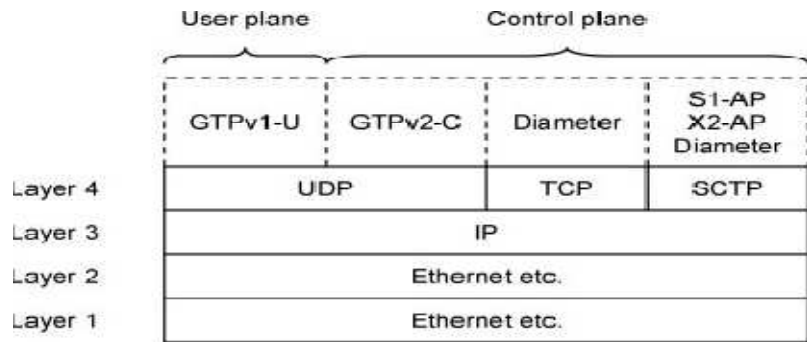
2.2.2 Πρωτόκολλα Μεταφοράς Διεπαφής Αέρα

Η διεπαφή αέρα, επίσημα γνωστή ως η διεπαφή Uu, βρίσκεται μεταξύ του κινητού και του σταθμού βάσης. Το Σχήμα 2.11 παρουσιάζει τα πρωτόκολλα μεταφοράς διεπαφής αέρα. Ξεκινώντας από το κάτω μέρος, το φυσικό στρώμα διεπαφής αέρα περιέχει τις ψηφιακές και αναλογικές λειτουργίες επεξεργασίας σήματος που χρησιμοποιούν το κινητό και ο σταθμός βάσης για να στέλνουν και να λαμβάνουν πληροφορίες. Το φυσικό στρώμα περιγράφεται από διάφορες προδιαγραφές που παρατίθενται στο Κεφάλαιο 6: το σχήμα δείχνει τις πιο σημαντικές.

Τα επόμενα τρία πρωτόκολλα αποτελούν το στρώμα ζεύξης δεδομένων, το στρώμα 2 του μοντέλου OSI. Το πρωτόκολλο *ελέγχου πρόσβασης στο μέσο* (MAC) [19] πραγματοποιεί έλεγχο χαμηλού επιπέδου του φυσικού επιπέδου, ιδιαίτερα από τις μεταδόσεις δεδομένων χρονοδιαγράμματος μεταξύ του κινητού και του σταθμού βάσης. Το πρωτόκολλο *ελέγχου ραδιοζεύξης* (RLC) [20] διατηρεί τη ζεύξη δεδομένων μεταξύ των δύο συσκευών, για παράδειγμα εξασφαλίζοντας αξιόπιστη παράδοση για ροές δεδομένων που πρέπει να φτάσουν σωστά. Τέλος, το *πρωτόκολλο σύγκλισης πακέτων δεδομένων* (PDCP) [21] πραγματοποιεί λειτουργίες μεταφοράς υψηλότερου επιπέδου, που σχετίζονται με την συμπίεση κεφαλίδας και την ασφάλεια.

2.2.3 Πρωτόκολλα Μεταφοράς Σταθερού Δικτύου

Κάθε διεπαφή στο σταθερό δίκτυο χρησιμοποιεί το πρότυπο IETF πρωτοκόλλων μεταφοράς, τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 2.12. Σε αντίθεση με την διεπαφή αέρα, οι διεπαφές αυτές χρησιμοποιούν πρωτόκολλα από τα στρώματα 1 έως 4 του συνηθισμένου μοντέλου OSI. Στο κάτω μέρος της στοίβας πρωτοκόλλου, το δίκτυο μεταφοράς μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε κατάλληλα πρωτόκολλα για τα στρώματα 1 και 2, όπως το Ethernet. Κάθε στοιχείο του δικτύου στη συνέχεια συνδέεται με μια διεύθυνση IP, και το σταθερό δίκτυο χρησιμοποιεί το IP για να διευθύνει πληροφορίες από το ένα στοιχείο στο άλλο, σε όλο το βασικό δίκτυο



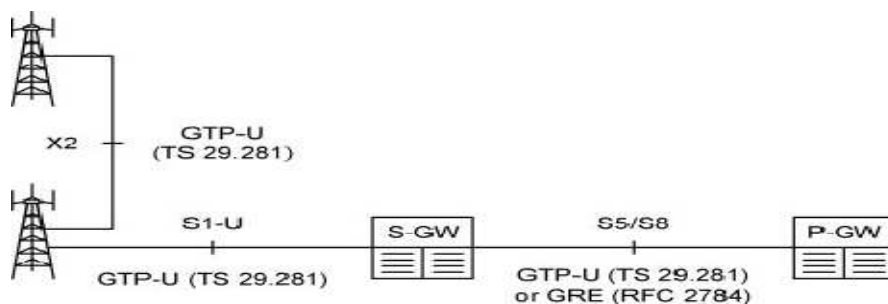
Σχήμα 2.12 Πρωτόκολλα μεταφοράς που χρησιμοποιούνται από το σταθερό δίκτυο.

μεταφοράς. Το LTE υποστηρίζει τόσο την IPv4 [22] όσο και την IPv6 [23] για το έργο αυτό. Στον EPC, η υποστήριξη της IPv4 είναι υποχρεωτική και η υποστήριξη της έκδοσης 6 συνιστάται, ενώ το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης μπορεί να χρησιμοποιήσει τόσο το ένα όσο και τα δύο πρωτόκολλα [25, 26].

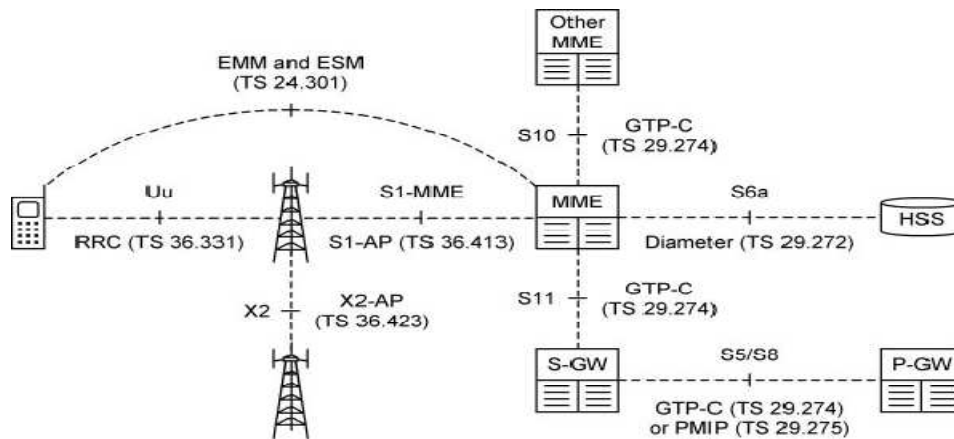
Πάνω από την IP, υπάρχει ένα πρωτόκολλο στρώματος μετάδοσης δια μέσου της διεπαφής μεταξύ κάθε επιμέρους ζεύγους στοιχείων του δικτύου. Χρησιμοποιούνται τρία πρωτόκολλα μετάδοσης. Το UDP [27] απλά στέλνει πακέτα δεδομένων από το ένα στοιχείο δικτύου στο άλλο, ενώ το TCP [28] μεταδίδει εκ νέου πακέτα αν φτάσουν λανθασμένα. Το πρωτόκολλο ελέγχου ροής μετάδοσης (SCTP) [29] βασίζεται στο TCP, αλλά περιλαμβάνει επιπλέον χαρακτηριστικά που το καθιστούν περισσότερο κατάλληλο για την παράδοση μηνυμάτων σηματοδότησης. Το επίπεδο χρήστη χρησιμοποιεί πάντα το UDP ως πρωτόκολλο μετάδοσής του, για να αποφευχθεί η καθυστέρηση των δεδομένων. Η επιλογή του επιπέδου ελέγχου εξαρτάται από το πρωτόκολλο σηματοδότησης υπερκείμενου, με τον τρόπο που φαίνεται.

2.2.4 Πρωτόκολλα Επιπέδου Χρήστη

Το LTE επίπεδο χρήστη περιλαμβάνει μηχανισμούς για να διαβιβάσει σωστά τα δεδομένα ανάμεσα στο κινητό και την πύλη PDN, και για να ανταποκρίνεται γρήγορα



Σχήμα 2.13 Πρωτόκολλα επιπέδου χρήστη που χρησιμοποιείται από το LTE.



Σχήμα 2.14 Πρωτόκολλα Σηματοδότησης που χρησιμοποιούνται από LTE.

στις αλλαγές της θέσης του κινητού. Οι μηχανισμοί αυτοί εφαρμόζονται από τα πρωτόκολλα επιπέδου χρήστη, που φαίνονται στο Σχήμα 2.13. Οι περισσότερες από τις διεπαφές του επιπέδου χρήστη χρησιμοποιούν ένα 3GPP πρωτόκολλο γνωστό ως, *GPRS tunnelling protocol user part* (GTP-U) [30]. Για να είμαστε ακριβείς, το LTE χρησιμοποιεί την έκδοση 1 του πρωτοκόλλου, που συμβολίζεται GTPv1-U, μαζί με τους τομείς PS 2G και 3G από την Έκδοση 99. Τα παλαιότερα δίκτυα 2G χρησιμοποιούσαν την έκδοση 0, η οποία συμβολιζόταν GTPv0-U. Μεταξύ της S-GW και της πύλης PDN, το επίπεδο χρήστη S5/S8 έχει μια εναλλακτική υλοποίηση. Αυτό βασίζεται σε ένα πρωτόκολλο πρότυπου IETF, γνωστό ως γενική ενσωμάτωση δρομολόγησης (GRE) [31].

Τα GTP-U και GRE προωθούν πακέτα από το ένα στοιχείο δικτύου στο άλλο, χρησιμοποιώντας μια τεχνική γνωστή ως *σηράγγωση*. Τα δύο πρωτόκολλα εφαρμόζουν σηράγγωση με ελαφρώς διαφορετικούς τρόπους, τους οποίους θα καλύψουμε ως μέρος της Ενότητας 2.4.

2.2.5 Πρωτόκολλα Σηματοδότησης

Το LTE χρησιμοποιεί ένα μεγάλο αριθμό πρωτοκόλλων σηματοδοσίας, τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 2.14.

Στη διεπαφή αέρα, ο σταθμός βάσης ελέγχει τις ασύρματες επικοινωνίες ενός κινητού μέσω των μηνυμάτων σηματοδοσίας που είναι γραμμένα χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο *ελέγχου ραδιοπόρων* (RRC) [32]. Στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης, ένας MME ελέγχει τους σταθμούς βάσης εντός της pool area του, χρησιμοποιώντας το *πρωτόκολλο εφαρμογής S1* (S1-AP) [33], ενώ δύο σταθμοί βάσης μπορούν να επικοινωνούν χρησιμοποιώντας το *πρωτόκολλο εφαρμογής X2* (X2-AP) [34].

Την ίδια στιγμή, ο MME ελέγχει την υψηλού επιπέδου συμπεριφορά ενός κινητού χρησιμοποιώντας δύο πρωτόκολλα που βρίσκονται στο NAS της διεπαφής αέρα [35]. Αυτά τα πρωτόκολλα είναι το *διαχείρισης συνόδου EPS* (ESM), που ελέγχει τα ρεύματα δεδομένων μέσω των οποίων ένα κινητό επικοινωνεί με τον έξω

κόσμο, και το *διαχείρισης κινητικότητας EPS* (EMM), το οποίο χειρίζεται εσωτερικά λογιστικά εντός του EPC. Το δίκτυο μεταδίδει μηνύματα EMM και ESM ενσωματώνοντάς τα σε χαμηλότερου επιπέδου RRC και S1-AP μηνυμάτων και στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας μηχανισμούς μετάδοσης των διεπαφών Uu και S1.

Μέσα στο EPC, τα HSS και MME επικοινωνούν χρησιμοποιώντας ένα πρωτόκολλο βασισμένο στη *Διάμετρο*. Το βασικό πρωτόκολλο Διαμέτρου [36] είναι ένα πρωτόκολλο πρότυπου IETF για πιστοποίηση, εξουσιοδότηση και λογιστική, το οποίο βασιζόταν σε ένα παλαιότερο πρωτόκολλο, γνωστό ως *Υπηρεσία Απομακρυσμένου Ελέγχου Ταυτότητας Χρηστών Εισερχομένων Κλήσεων* (RADIUS) [37, 38]. Το βασικό πρωτόκολλο Διαμέτρου μπορεί να ενισχυθεί για χρήση σε συγκεκριμένες εφαρμογές: η εφαρμογή της Διαμέτρου στη διεπαφή S6a [39], είναι μία τέτοια εφαρμογή.

Οι περισσότερες από τις άλλες διεπαφές EPC χρησιμοποιούν ένα 3GPP πρωτόκολλο γνωστό ως, το *GPRS tunnelling protocol control part* (GTP-C) [40]. Το πρωτόκολλο αυτό περιλαμβάνει διαδικασίες για ομότιμες επικοινωνίες μεταξύ των διάφορων στοιχείων του EPC, και για τη διαχείριση των GTP-U σηράγγων που παρουσιάσαμε παραπάνω. Το LTE χρησιμοποιεί τη 2^η έκδοση του πρωτοκόλλου, η οποία δηλώνεται GTPv2-C. Οι τομείς PS 2G και 3G χρησιμοποιούσαν την 1^η έκδοση του πρωτοκόλλου, την GTPv1-C, από την Έκδοση 99 και μετά, ενώ τα νωρίτερα δίκτυα 2G εφαρμόζαν την GTPv0-C. Αν το επίπεδο χρήστη S5/S8 χρησιμοποιεί το GRE, τότε επίπεδο ελέγχου του, χρησιμοποιεί ένα πρωτόκολλο σήματος γνωστό ως *πληρεξούσιο κινητής IP έκδοσης 6* (PMIPv6) [41, 42]. Το PMIPv6 είναι ένα πρωτόκολλο πρότυπου IETF για τη διαχείριση προώθησης πακέτων, σε υποστήριξη των κινητών συσκευών, όπως οι φορητοί υπολογιστές.

Τότε προκύπτει το ερώτημα, από ποια επιλογή πρωτοκόλλου να επιλεγεί για τη διεπαφή S5/S8. Οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων 3GPP παλαιού τύπου, είναι πιθανό να προτιμούν τα GTP-U και GTP-C, για συνέπεια με τα προηγούμενα συστήματά τους και με τις άλλες διεπαφές σηματοδότησης στον EPC. Το TS 23.401 περιγράφει την αρχιτεκτονική του συστήματος και την υψηλού επιπέδου λειτουργία του LTE, υπό την προϋπόθεση ότι η διεπαφή S5/S8 χρησιμοποιεί αυτά τα πρωτόκολλα. Γενικά, θα κάνουμε την ίδια υπόθεση σε αυτό το βιβλίο. Οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων non 3GPP μπορεί να προτιμούν GRE και PMIP, τα οποία είναι πρωτόκολλα πρότυπου IETF, και τα οποία χρησιμοποιούνται επίσης για τη διαλειτουργικότητα μεταξύ του LTE και των non 3GPP τεχνολογιών. Το TS 23.402 [43] είναι μια συνοδευτική προδιαγραφή για το TS 23.401, το οποίο περιγράφει τις διαφορές στην αρχιτεκτονική και τη λειτουργία ενός δικτύου που χρησιμοποιεί αυτά τα πρωτόκολλα.

2.3 Παράδειγμα Ροών Πληροφοριών

2.3.1 Σηματοδότηση AS

Τώρα που έχουμε εισαγάγει τα στοιχεία δικτύου και τις στοίβες πρωτοκόλλου, είναι

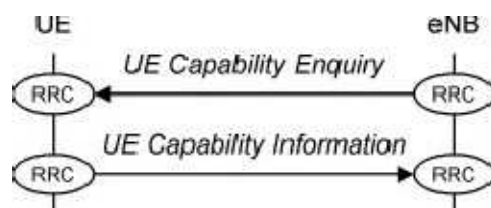
χρήσιμο να δείξουμε μερικά παραδείγματα για το πώς οι διάφορες συνιστώσες ταιριάζουν μαζί. Ας εξετάσουμε πρώτα μια ανταλλαγή μηνυμάτων σηματοδότησης RRC μεταξύ του κινητού και του σταθμού βάσης. Το Σχήμα 2.15 είναι η ακολουθία μηνύματος για μια RRC διαδικασία, γνωστή ως *UE Ικανότητα Μετάδοσης* [44]. Εδώ, ο eNB εξυπηρέτησης επιθυμεί να ανακαλύψει τις δυνατότητες ασύρματης πρόσβασης του κινητού, όπως το μέγιστο ρυθμό δεδομένων που μπορεί να χειριστεί και την έκδοση προδιαγραφής με την οποία είναι σύμφωνο. Για να γίνει αυτό, το πρωτόκολλο RRC συνθέτει ένα μήνυμα που ονομάζεται *Ικανότητα Έρευνας UE*, και το στέλνει προς το κινητό. Το κινητό αποκρίνεται με ένα μήνυμα RRC που ονομάζεται *Ικανότητα Πληροφοριών UE*, στο οποίο απαριθμεί τις απαιτούμενες ικανότητες.

Οι αντίστοιχες στρώσεις πρωτοκόλλων φαίνονται στο Σχήμα 2.16. Ο σταθμός βάσης συνθέτει την ικανότητα έρευνάς του χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο RRC, το επεξεργάζεται χρησιμοποιώντας τα PDCP, RLC και MAC και το μεταδίδει χρησιμοποιώντας τη διεπαφή αέρα φυσικού στρώματος. Το κινητό λαμβάνει τη μετάδοση του σταθμού βάσης και επεξεργάζεται τις πληροφορίες, περνώντας τον μέσα από την ίδια ακολουθία πρωτοκόλλων σε αντίστροφη. Κατόπιν διαβάζει το συνημμένο μήνυμα και συνθέτει την απάντησή του, η οποία μεταδίδεται και λαμβάνεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο.

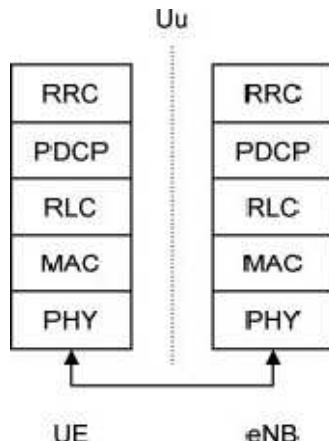
2.3.2 Σηματοδότηση NAS

Το επόμενο παράδειγμα σηματοδότησης είναι ελαφρώς πιο περίπλοκο. Το Σχήμα 2.17 (a) δείχνει την ακολουθία μηνυμάτων για μια διαδικασία EMM γνωστή ως *ανακατανομή GUTI* [45]. Χρησιμοποιώντας μία EMM *Εντολή Ανακατανομής GUTI*, ο MME μπορεί να δώσει στο κινητό μια νέα GUTI. Σε απάντηση, το κινητό στέλνει στον MME μια επιβεβαίωση χρησιμοποιώντας μια EMM *Πλήρη Ανακατανομή GUTI*.

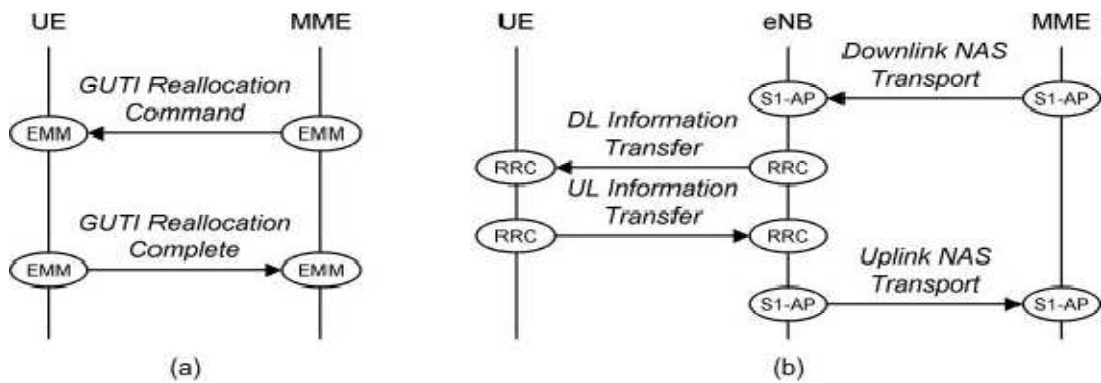
Το LTE μεταφέρει αυτά τα μηνύματα ενσωματώνοντάς τα σε μηνύματα S1-AP και RRC, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.17 (b). Τα συνηθισμένα μηνύματα S1-AP είναι γνωστά ως *Μετάδοση Άνω Ζεύξης NAS* και *Μετάδοση Κάτω Ζεύξης NAS* [46], ενώ τα συνηθισμένα μηνύματα RRC είναι γνωστά ως *UL Μετάδοση Πληροφοριών* και *DL Μετάδοση Πληροφοριών* [47]. Αποκλειστική λειτουργία τους είναι να μεταφέρουν μηνύματα EMM και ESM, όπως αυτά που παρουσιάζονται εδώ. Ωστόσο, το δίκτυο μπορεί επίσης να μεταφέρει μηνύματα NAS ενσωματώνοντάς τα σε άλλα μηνύματα S1-AP και RRC, τα οποία μπορεί να έχουν επιπλέον λειτουργίες AS από



Σχήμα 2.15 Διαδικασία ικανότητας μετάδοσης UE. Ανατύπωση με την άδεια του ETSI.



Σχήμα 2.16 Στοιβες πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται για την ανταλλαγή μηνυμάτων σηματοδότησης RRC μεταξύ του κινητού και του σταθμού βάσης. Ανατύπωση με την άδεια του ETSI.



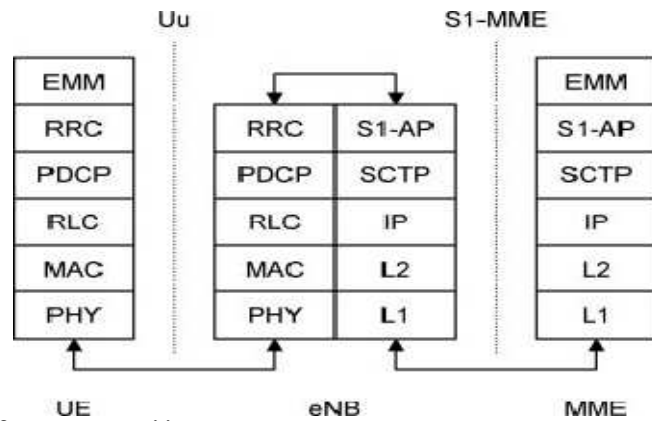
Σχήμα 2.17 Διαδικασία ανακατανομής GUTI. (a) Μηνύματα NAS. (b) Μήνυμα μετάδοσης που χρησιμοποιεί το AS.

μόνα τους. Θα δούμε μερικά παραδείγματα αργότερα στο βιβλίο.

Το Σχήμα 2.18 δείχνει τις στοιβες πρωτοκόλλου για αυτή την ακολουθία μηνυμάτων. Ο MME γράφει την *Εντολή Ανακατανομής GUTI* χρησιμοποιώντας το EMM πρωτόκολλό του, το ενσωματώνει στο S1-AP μήνυμα *Μετάδοσης Κάτω Ζεύξης NAS* και το στέλνει στο σταθμό βάσης χρησιμοποιώντας τους μηχανισμούς μεταφοράς της διεπαφής S1. Ο σταθμός βάσης ξεδιπλώνει το μήνυμα EMM, το ενσωματώνει σε μια RRC *Μετάδοσης Πληροφοριών DL* και το στέλνει στο κινητό χρησιμοποιώντας τα πρωτόκολλα διεπαφής αέρα που καλύψαμε νωρίτερα. Το κινητό διαβάζει το μήνυμα, ενημερώνει το GUTI του και στέλνει μια επιβεβαίωση χρησιμοποιώντας τις ίδιες στοιβες πρωτοκόλλου με αντίστροφη σειρά.

2.3.3 Μεταφορά Δεδομένων

Σαν ένα τελευταίο παράδειγμα, το Σχήμα 2.19 παρουσιάζει τις στοιβες πρωτοκόλλων



Σχήμα 2.18 Στοίβες πρωτοκόλλου που χρησιμοποιούνται για την ανταλλαγή μηνυμάτων σηματοδότησης NAS μεταξύ του κινητού και του MME. Ανατύπωση με την άδεια του ETSI.

που χρησιμοποιούνται για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του κινητού και ενός εξυπηρετητή, στον έξω κόσμο. Στο σχήμα έχουμε υποθέσει ότι η διεπαφή S5/S8 βασίζεται σε GTP αντί για PMIP.

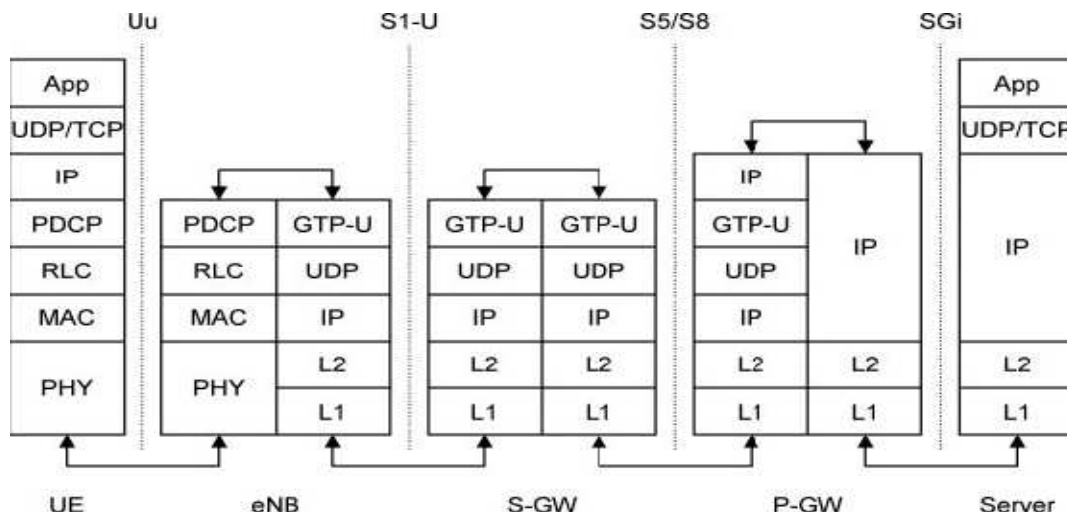
Ας εξετάσουμε την πορεία της κάτω ζεύξης, από τον εξυπηρετητή στο κινητό. Η διεύθυνση IP του κινητού βρίσκεται στο χώρο διευθύνσεων της πύλης PDN, έτσι το διαδίκτυο διευθύνει καθένα από τα πακέτα δεδομένων του κινητού προς αυτή την συσκευή. Χρησιμοποιώντας τους μηχανισμούς σηράγγωσης που περιγράφονται παρακάτω, η πύλη PDN προσδιορίζει την S-GW που φροντίζει το κινητό, τυλίγει το εισερχόμενο πακέτο στο εσωτερικό ενός δεύτερου πακέτου IP και στέλνει εκείνο το πακέτο στη διεύθυνση IP της S-GW. Με τη σειρά της, η S-GW ξεδιπλώνει το εισερχόμενο πακέτο, και επαναλαμβάνει τη διαδικασία της διεπαφής S1 προς τον σταθμό βάσης. Τέλος, ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί τους μηχανισμούς μετάδοσης της διεπαφής αέρα, για να παραδώσει το πακέτο στο κινητό.

2.4 Φορέας Διαχείρισης

2.4.1 Ο Φορέας EPS

Σε ένα υψηλό επίπεδο, το LTE μεταδίδει δεδομένα από το ένα τμήμα του συστήματος στο άλλο χρησιμοποιώντας *φορείς*. Η εφαρμογή των φορέων εξαρτάται από το αν η διεπαφή S5/S8 βασίζεται στο GTP ή στο PMIP. Θα ξεκινήσουμε περιγράφοντας τι συμβαίνει κατά τη χρήση του GTP [48, 49], και θα καλύψουμε αργότερα τις διαφορές στην περίπτωση του PMIP.

Ο πιο σημαντικός φορέας είναι ο *φορέας EPS*. Αυτή είναι η καλύτερη σκέψη ως ένας αμφίδρομος αγωγός δεδομένων, ο οποίος μεταφέρει πληροφορίες μεταξύ του κινητού και της πύλης PDN με μια συγκεκριμένη *ποιότητα υπηρεσιών* (QoS). Με τη σειρά της, η QoS καθορίζει πώς τα δεδομένα θα μεταφερθούν, χρησιμοποιώντας παραμέτρους όπως η ταχύτητα δεδομένων, το ποσοστό σφάλματος και η καθυστέρηση. Τα πρωτόκολλα GTP-U και GTP-C περιλαμβάνουν μηχανισμούς για



Σχήμα 2.19 Στοιβές πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του κινητού και ενός εξωτερικού εξυπηρετητή, όταν χρησιμοποιείται μια διεπαφή S5/S8 βασισμένη σε GTP. Ανατύπωση με την άδεια του ETSI.

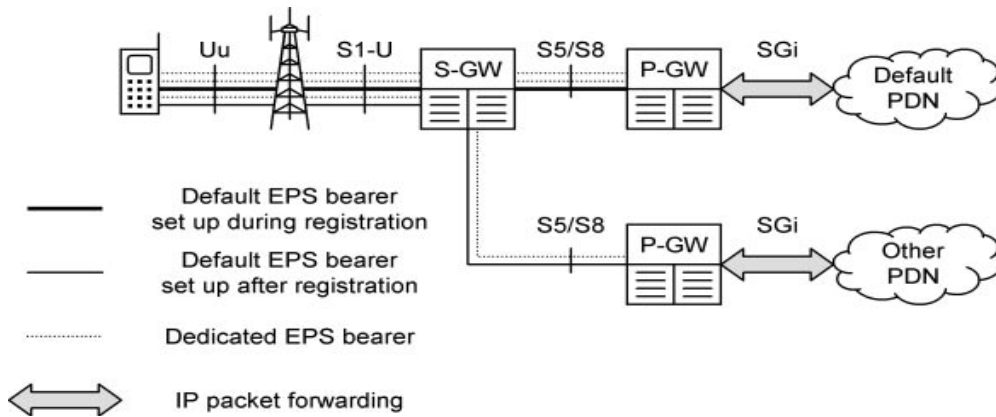
να δημιουργήσουν, να τροποποιήσουν και να καταστρέψουν φορείς EPS, και να ορίσουν και να εφαρμόσουν την QoS τους.

Οι πληροφορίες που μεταφέρονται από έναν φορέα EPS περιλαμβάνουν μια ή περισσότερες *υπηρεσίες ροών δεδομένων*, καθεμιά από τις οποίες μεταφέρει πακέτα για μια συγκεκριμένη υπηρεσία όπως μια εφαρμογή ροής βίντεο. Με τη σειρά της, κάθε υπηρεσία ροής δεδομένων περιλαμβάνει μια ή περισσότερες *ροές πακέτων*, όπως οι ροές ήχου και βίντεο που συνθέτουν αυτή την υπηρεσία. Το LTE προσφέρει την ίδια QoS σε όλες τις ροές πακέτων μέσα σε ένα συγκεκριμένο φορέα EPS.

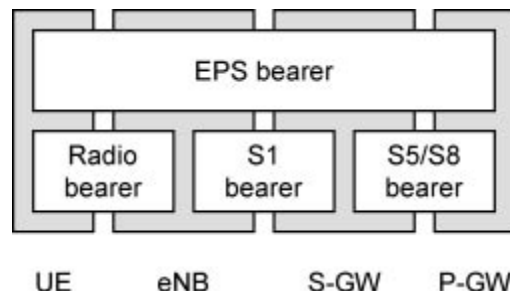
Οι φορείς EPS μπορούν να ταξινομηθούν με δύο τρόπους. Στην πρώτη ταξινόμηση, ένας *φορέας GBR* συνδέεται με έναν *εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης bit*, ο οποίος είναι ένας μακροπρόθεσμος μέσος ρυθμός δεδομένων που το κινητό μπορεί να περιμένει για να λάβει. Οι φορείς GBR είναι κατάλληλοι για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, όπως φωνή. Ένας *φορέας non GBR* δε λαμβάνει τέτοιες εγγυήσεις, έτσι είναι κατάλληλος για υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου, όπως η περιήγηση ιστού.

Στη δεύτερη ταξινόμηση, ο EPC φτιάχνει ένα φορέα EPS, γνωστό ως *φορέα προεπιλογής*, οποτεδήποτε ένα κινητό συνδέεται σε ένα δίκτυο πακέτων δεδομένων. Ένας φορέας προεπιλογής είναι πάντα ένας *φορέας non GBR*. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.20, ένα κινητό λαμβάνει ένα φορέα προεπιλογής αμέσως μόλις εγγραφεί με τον EPC, για να το παρέχει με συνεχή συνδεσιμότητα σε ένα δίκτυο δεδομένων προεπιλογής πακέτου, όπως το διαδίκτυο. Την ίδια στιγμή, το κινητό λαμβάνει μια διεύθυνση IP για να τη χρησιμοποιήσει κατά την επικοινωνία με αυτό το δίκτυο, ή, ενδεχομένως, μια διεύθυνση IPv4 και μια διεύθυνση IPv6. Αργότερα, το κινητό μπορεί να δημιουργήσει συνδέσεις με άλλα PDNs, για παράδειγμα, ιδιωτικά εταιρικά δίκτυα. Αν το κάνει, τότε λαμβάνει έναν επιπλέον φορέα προεπιλογής για κάθε δίκτυο με τον οποίο συνδέεται, μαζί με μια πρόσθετη διεύθυνση IP.

Μετά τη σύνδεση σε ένα δίκτυο πακέτων δεδομένων και την ίδρυση ενός φορέα προεπιλογής, ένα κινητό μπορεί επίσης να λάβει έναν ή περισσότερους



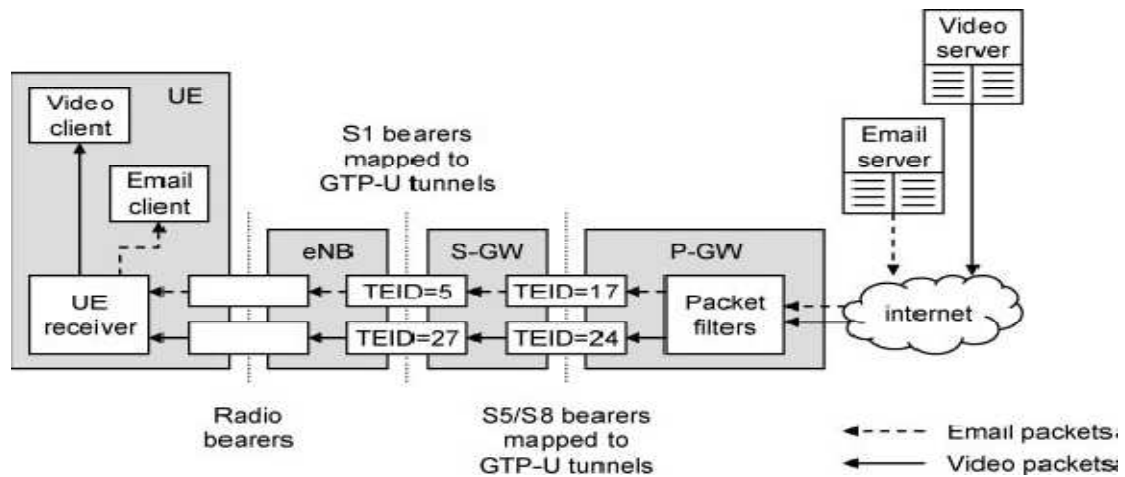
Σχήμα 2.20 Αποκλειστικοί φορείς και φορείς προεπιλογής EPS, όταν χρησιμοποιείται μια διεπαφή S5/S8 με βάση το GTP.



Σχήμα 2.21 Φορέας αρχιτεκτονικής του LTE, όταν χρησιμοποιείται μια διεπαφή S5/S8 με βάση το GTP. Ανατύπωση με την άδεια του ETSI.

αποκλειστικούς φορείς που το συνδέουν στο ίδιο δίκτυο. Αυτό δεν οδηγεί στην κατανομή τυχόν νέων διευθύνσεων IP: αντ' αυτού, κάθε αποκλειστικός φορέας μοιράζει μια διεύθυνση IP με το γονικό φορέα προεπιλογής του. Ένας αποκλειστικός φορέας έχει συνήθως μια καλύτερη QoS από ό,τι μπορεί να προσφέρει ο φορέας προεπιλογής και ειδικότερα μπορεί να έχει ένα εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης bit. Ένα κινητό μπορεί να έχει ένα ανώτατο όριο 11 φορέων EPS [50], για να του δώσει συνδεσιμότητα σε διάφορα δίκτυα χρησιμοποιώντας πολλές διαφορετικές ποιότητες υπηρεσιών.

Ο φορέας EPS συνδέει τρεις διαφορετικές διεπαφές, έτσι δεν μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος (Σχήμα 2.21), ο φορέας EPS είναι καταμεμημένος σε τρεις φορείς χαμηλότερου επιπέδου, δηλαδή τον *ραδιο-φορέα*, το *φορέα S1* και το *φορέα S5/S8*. Κάθε ένας από αυτούς συνδέεται επίσης με ένα σύνολο παραμέτρων QoS, και λαμβάνει ένα μερίδιο ποσοστού σφαλμάτων και καθυστέρησης του φορέα EPS. Ο ραδιο-φορέας στη συνέχεια, εφαρμόζεται με μια κατάλληλη διαμόρφωση των πρωτοκόλλων διεπαφής αέρα, ενώ οι φορείς S1 και S5/S8 εφαρμόζονται χρησιμοποιώντας σήραγγες GTP-U, με τον τρόπο που περιγράφεται παρακάτω. Ο συνδυασμός ενός ραδιο-φορέα και ενός φορέα S1 είναι μερικές φορές γνωστός ως ένας εξελιγμένος φορέας ασύρματης πρόσβασης



Σχήμα 2.22 Εφαρμογή σιηράγγωσθς στην κάτω ζεύξη, όταν χρησιμοποιείται μια διεπαφή S5/S8 με βάση το GTP. Ανατύπωση με την άδεια του ETSI.

(E-RAB).

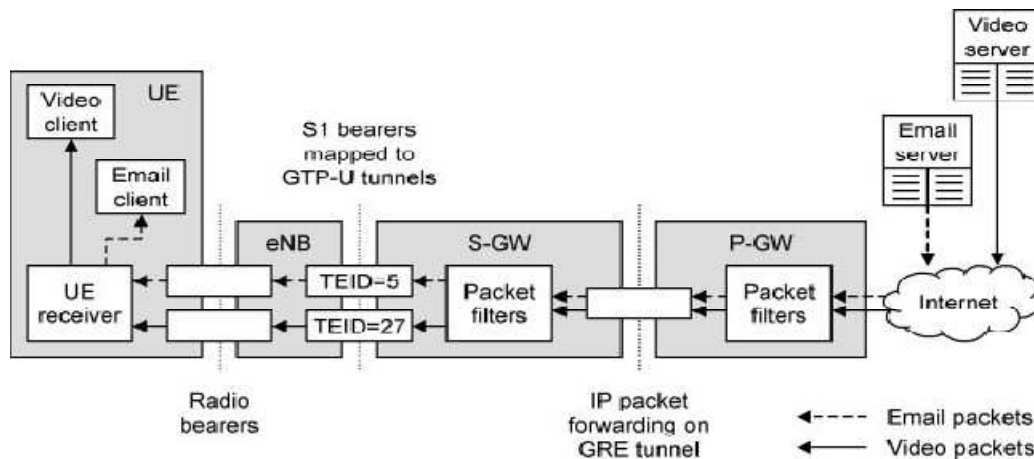
2.4.2 Σιηράγγωσθ με Χρήση GTP

Το πρωτόκολλο GTP-U πραγματοποιεί μια αντιστοίχιση ανάμεσα στους φορείς S1 και S5/S8 και στα πρωτόκολλα μετάδοσης σταθερού δικτύου, συνδέοντας κάθε φορέα με μια αμφίδρομη *σήραγγα* GTPU. Με τη σειρά της, κάθε σήραγγα σχετίζεται με δύο *αναγνωριστικά τελικού σημείου σήραγγας* (TEIDs), ένα για την άνω ζεύξη και ένα για την κάτω ζεύξη. Αυτά τα αναγνωριστικά έχουν στηθεί χρησιμοποιώντας GTP-C μηνύματα σηματοδότησης, και αποθηκεύονται από τα στοιχεία του δικτύου και στα δύο άκρα της σήραγγας.

Για να φανεί πώς χρησιμοποιούνται οι σήραγγες, ας εξετάσουμε τη ροή των πακέτων δεδομένων στην κάτω ζεύξη. Στο Σχήμα 2.22, ένα κινητό έχει δύο φορείς EPS, που μεταφέρουν βίντεο και πακέτα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου που απαιτούν διαφορετικές ποιότητες υπηρεσιών. Αυτά τα πακέτα φτάνουν στην πύλη PDN χρησιμοποιώντας τους φυσιολογικούς μηχανισμούς μετάδοσης στο διαδίκτυο.

Η πύλη PDN πρέπει τώρα να αντιστοιχίσει κάθε εισερχόμενο πακέτο στο σωστό φορέα EPS. Για να το πετύχει αυτό, κάθε φορέας EPS συνδέεται με ένα *πρότυπο ροής κίνησης* (TFT). Αυτό περιλαμβάνει ένα σύνολο *φίλτρων πακέτων*, ένα για κάθε μία από τις ροές πακέτων που απαρτίζουν το φορέα. Με τη σειρά του, κάθε φίλτρο πακέτου περιέχει πληροφορίες, όπως οι διευθύνσεις IP της πηγής και οι συσκευές προορισμού, και οι αριθμοί θυρών UDP ή TCP των εφαρμογών πηγής και προορισμού. Ελέγχοντας κάθε εισερχόμενο πακέτο και συγκρίνοντάς το με όλα τα φίλτρα πακέτων που έχουν εγκατασταθεί, η πύλη PDN μπορεί να αντιστοιχίσει κάθε πακέτο στο σωστό φορέα.

Η πύλη PDN τώρα αναζητά την αντίστοιχη σήραγγα GTP-U και προσθέτει μια κεφαλίδα GTP-U, η οποία περιέχει την κάτω ζεύξη TEID (17 για τα πακέτα



Σχήμα 2.23 Εφαρμογή σιράγγωσης στην κάτω ζεύξη, όταν χρησιμοποιείται διεπαφή S5/S8 με βάση το PMIP. Ανατύπωση με την άδεια του ETSI.

ηλεκτρονικού ταχυδρομείου στο παράδειγμα που φαίνεται). Αναζητά, επίσης, την S-GW του κινητού και προσθέτει μια κεφαλίδα IP που περιέχει τη διεύθυνση IP της S-GW. Μπορεί στη συνέχεια να προωθήσει το πακέτο στην S-GW.

Όταν το πακέτο φθάσει, η S-GW ανοίγει την κεφαλίδα GTP-U και διαβάζει την TEID της. Χρησιμοποιεί αυτή την πληροφορία για να προσδιορίσει τον αντίστοιχο φορέα EPS, και να αναζητήσει το σταθμό βάσης προορισμού και την επόμενη TEID (5 για ηλεκτρονικό ταχυδρομείο σε αυτό το παράδειγμα). Στη συνέχεια, προωθεί το πακέτο στο σταθμό βάσης με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω και ο σταθμός βάσης μεταδίδει το πακέτο προς τον κινητό. Μια παρόμοια διαδικασία συμβαίνει σε αντιστροφή στην άνω ζεύξη.

2.4.3 Σιράγγωση με Χρήση των GRE και PMIP

Το πρωτόκολλο GRE χρησιμοποιεί επίσης σήραγγες, καθεμιά από τις οποίες αναγνωρίζεται, χρησιμοποιώντας ένα πεδίο κλειδιού των 32 bit στην επικεφαλίδα του πακέτου GRE. Σε αντίθεση με το GTP-C, ωστόσο, το PMIP δεν περιλαμβάνει κανένα μηχανισμό για να καθορίσει την QoS μιας ροής δεδομένων.

Εάν το δίκτυο χρησιμοποιεί GRE και PMIP, τότε ο φορέας EPS εκτείνεται μόνο ως την S-GW [51]. Στη διεπαφή S5/S8, ένα κινητό έχει μόνο μια GRE σήραγγα (Σχήμα 2.23). Αυτή χειρίζεται όλα τα πακέτα δεδομένων που το κινητό μεταδίδει ή λαμβάνει, χωρίς καθόλου εγγυήσεις QoS. Η πύλη PDN εξακολουθεί να περιέχει μια σειρά από φίλτρα πακέτων, τα οποία χρησιμοποιεί για να κατευθύνει εισερχόμενα πακέτα στη σωστή GRE σήραγγα, και ως εκ τούτου στο σωστό κινητό. Ωστόσο, η S-GW τώρα περιέχει φίλτρα πακέτων, για να χειριστεί τη μια-προς-πολλές αντιστοίχιση από τις GRE σήραγγες στους φορείς EPS.

Πίνακας 2.2 SRBs

Signalling radio bearer	Configured by	Used by
SRB 0	System information	RRC messages before establishment of SRB 1
SRB 1	RRC message on SRB 0	Subsequent RRC messages NAS messages before establishment of SRB 2
SRB 2	RRC message on SRB 1	Subsequent NAS messages

2.4.4 Ραδιο-φορείς Σηματοδοσίας

Το LTE χρησιμοποιεί τρεις ειδικούς ραδιο-φορείς, γνωστούς ως *ραδιο-φορείς σηματοδοσίας* (SRBs), για να μεταφέρει μηνύματα σηματοδοσίας μεταξύ του κινητού και του σταθμού βάσης [52]. Οι SRBs περιλαμβάνονται στον Πίνακα 2.2. Κάθε ένας από αυτούς συνδέεται με μια ειδική διαμόρφωση των πρωτοκόλλων διεπαφής αέρα, έτσι ώστε το κινητό και ο σταθμός βάσης να μπορούν να συμφωνήσουν σχετικά με το πώς τα μηνύματα σηματοδοσίας πρέπει να μεταδίδονται και να λαμβάνονται.

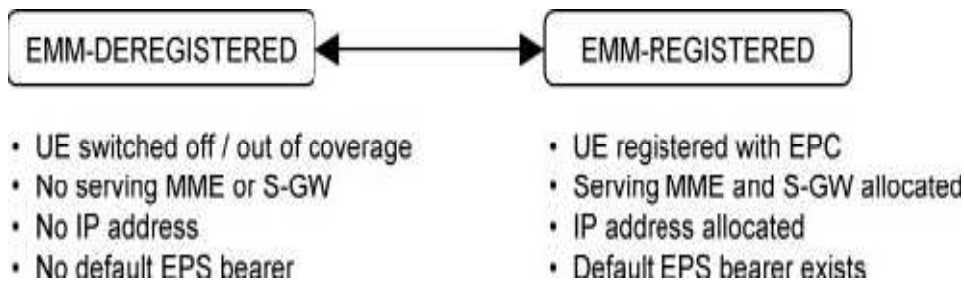
Ο SRB0 χρησιμοποιείται μόνο για μερικά μηνύματα σηματοδοσίας RRC, τα οποία το κινητό και ο σταθμός βάσης χρησιμοποιούν για να αποκαταστήσουν την επικοινωνία, με μια διαδικασία γνωστή ως *δημιουργία σύνδεσης RRC*. Η διαμόρφωσή της είναι πολύ απλή και ορίζεται σε ειδικά μηνύματα RRC γνωστά ως *μηνύματα πληροφοριών συστήματος*, τα οποία εκπέμπει ο σταθμός βάσης στο σύνολο της κυψέλης, για να πει στα κινητά για το πώς έχει ρυθμιστεί η κυψέλη.

Ο SRB1 διαμορφώνεται χρησιμοποιώντας μηνύματα σηματοδοσίας που ανταλλάσσονται στον SRB0, τη στιγμή που ένα κινητό καθορίζει επικοινωνίες με το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης. Χρησιμοποιείται για όλα τα μετέπειτα μηνύματα RRC, και μεταφέρει επίσης μερικά μηνύματα EMM και ESM που ανταλλάσσονται πριν από την ίδρυση του SRB2. Ο SRB2 διαμορφώνεται χρησιμοποιώντας μηνύματα σηματοδοσίας που ανταλλάσσονται στον SRB1, τη στιγμή που το κινητό καθιερώνει επικοινωνία με τον EPC. Χρησιμοποιείται για να μεταφέρει όλα τα υπόλοιπα μηνύματα EMM και ESM.

2.5 Διαγράμματα Κατάστασης

2.5.1 Διαχείριση Κινητικότητας EPS

Η συμπεριφορά ενός κινητού ορίζεται χρησιμοποιώντας τρία διαγράμματα κατάστασης [53-55], τα οποία περιγράφουν αν το κινητό είναι εγγεγραμμένο με τον EPC και αν είναι ενεργό ή αδρανές. Το πρώτο διάγραμμα κατάστασης είναι αυτό για



Σχήμα 2.24 Διάγραμμα κατάστασης EMM.

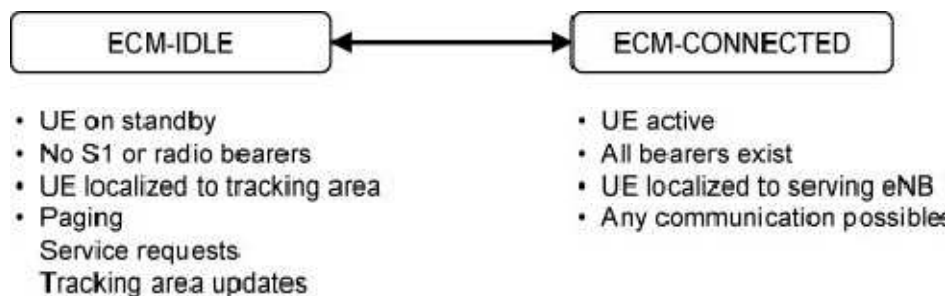
την EMM. Διοικείται από το πρωτόκολλο EMM στο κινητό και τον MME, και φαίνεται στο Σχήμα 2.24.

Η κατάσταση EMM του κινητού εξαρτάται από το αν είναι εγγεγραμμένο με τον EPC. Στην κατάσταση EMM-REGISTERED, το κινητό είναι ενεργοποιημένο, και είναι εγγεγραμμένο με έναν MME εξυπηρέτησης και μια S-GW. Το κινητό έχει μια διεύθυνση IP και ένα φορέα προεπιλογής EPS, τα οποία του δίνουν πάντα σύνδεση με ένα δίκτυο δεδομένων προεπιλογής πακέτου. Σε EMM-DEREGISTERED, το κινητό είναι απενεργοποιημένο ή εκτός κάλυψης και δεν έχει καμία από αυτές τις ιδιότητες.

2.5.2 Διαχείριση Σύνδεσης EPS

Το δεύτερο διάγραμμα κατάστασης (Σχήμα 2.25) είναι για τη διαχείριση σύνδεσης EPS (ECM). Για άλλη μια φορά, αυτές οι καταστάσεις διοικούνται από το πρωτόκολλο EMM. Κάθε κατάσταση έχει δύο ονόματα: το TS23.401 τις καλεί ECM-CONNECTED και ECM-IDLE, ενώ το TS 24.301 τις καλεί EMM-REGISTERED και EMM-IDLE. Θα χρησιμοποιήσουμε το πρώτο από αυτά.

Η κατάσταση ECM του κινητού εξαρτάται από το αν είναι ενεργό ή σε κατάσταση αναμονής, από την άποψη πρωτοκόλλων NAS και του EPC. Ένα ενεργό κινητό είναι σε κατάσταση ECM-CONNECTED. Σε αυτή την κατάσταση, όλοι οι φορείς δεδομένων και οι SRBs είναι σε ισχύ. Χρησιμοποιώντας τους, το κινητό



Σχήμα 2.25 Διάγραμμα κατάστασης ECM.

μπορεί να ανταλλάσσει ελεύθερα μηνύματα σηματοδοσίας με τον MME, μέσω μιας λογικής σύνδεσης που είναι γνωστή ως μια *σύνδεση σηματοδοσίας* και μπορεί ελεύθερα να ανταλλάσσει δεδομένα με την S-GW.

Σε κατάσταση αναμονής, ένα κινητό είναι σε ECM-IDLE. Σε αυτή την κατάσταση, θα ήταν ανάρμοστο να κρατήσει όλους τους φορείς σε ισχύ, επειδή το δίκτυο θα έπρεπε να τους αναδρομολογεί όποτε το κινητό μετακινείται από τη μία κυψέλη στην άλλη, ακόμη και αν δεν θα μετέφεραν καμία πληροφορία. Για να αποφευχθεί η προκύπτουσα επιβάρυνση σηματοδότησης, το δίκτυο καταστρέφει τους φορείς S1 και τους ασύρματους φορείς ενός κινητού κάθε φορά που το κινητό μπαίνει σε ECM-IDLE. Το κινητό μπορεί στη συνέχεια να κυκλοφορεί ελεύθερα από τη μία κυψέλη στην άλλη, χωρίς την ανάγκη να αναδρομολογεί τους φορείς κάθε φορά. Ωστόσο, οι φορείς EPS παραμένουν σε ισχύ, έτσι ώστε ένα κινητό να διατηρεί τις λογικές συνδέσεις του με τον έξω κόσμο. Οι φορείς S5/S8 επίσης παραμένουν σε ισχύ, καθώς το κινητό αλλάζει την S-GW του, μόνο περιστασιακά.

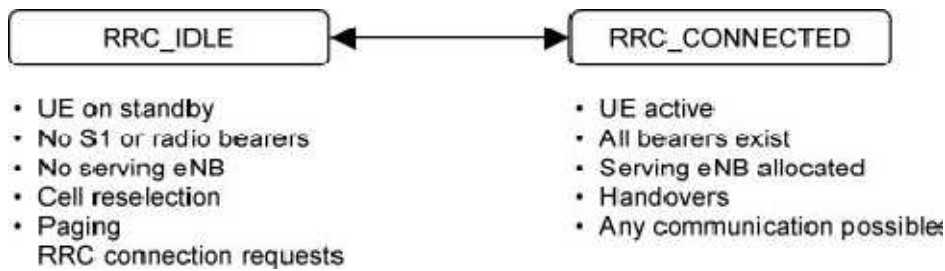
Επιπλέον, ο MMK δεν ξέρει ακριβώς που βρίσκεται ένα αδρανές κινητό: αντίθετα, γνωρίζει ακριβώς σε ποια περιοχή παρακολούθησης είναι το κινητό. Αυτό επιτρέπει στο κινητό να μετακινείται από τη μία κυψέλη στην άλλη χωρίς να ενημερώνει τον MME. Αντίθετα, το κάνει μόνο έτσι αν διασχίσει ένα σύνορο περιοχής εντοπισμού. Ο MME μπορεί επίσης να καταχωρήσει ένα κινητό σε περισσότερες από μία περιοχές εντοπισμού και μπορεί να πει στο κινητό να στείλει μια ειδοποίηση μόνο αν κινείται εκτός αυτών των TAs. Αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο αν το κινητό κινείται εμπρός και πίσω σε ένα όριο περιοχής εντοπισμού.

Κάποια περιορισμένη επικοινωνία εξακολουθεί, ωστόσο, να είναι δυνατή. Αν ο MME επιθυμεί να επικοινωνήσει με ένα αδρανές κινητό, τότε μπορεί να το κάνει αποστέλλοντας ένα μήνυμα *Αναζήτησης S1-AP* σε όλους τους σταθμούς βάσης στην περιοχή (ες) εντοπισμού του κινητού. Οι σταθμοί βάσης αντιδρούν με τη μετάδοση ενός μηνύματος *Αναζήτησης RRC*, με τον τρόπο που περιγράφεται παρακάτω. Εάν το κινητό επιθυμεί να επικοινωνήσει με το δίκτυο ή να απαντήσει σε ένα μήνυμα αναζήτησης, τότε στέλνει στον MME ένα μήνυμα EMM, που ονομάζεται μια *Αίτηση Υπηρεσιών* και ο MME αντιδρά με τη μετακίνηση του κινητού σε ECM-CONNECTED. Τέλος, το κινητό μπορεί να στείλει ένα *Αίτημα Ενημέρωσης Περιοχής Εντοπισμού* EMM στον MME, αν διαπιστώσει ότι έχει μετακινηθεί σε μια περιοχή εντοπισμού στην οποία, αυτή τη στιγμή, δεν έχει κατοχυρωθεί.

2.5.3 Έλεγχος Ασύρματων Πόρων

Το τελικό διάγραμμα κατάστασης (Σχήμα 2.26) είναι για τον RRC. Όπως υποδηλώνει το όνομα, αυτές οι καταστάσεις διοικούνται από το πρωτόκολλο RRC στο κινητό και τον eNB εξυπηρέτησης.

Η κατάσταση RRC του κινητού εξαρτάται από το αν είναι ενεργό ή αδρανές, από την άποψη των πρωτοκόλλων AS και του E-UTRAN. Ένα ενεργό κινητό είναι σε κατάσταση RRC_CONNECTED. Σε αυτή την κατάσταση, το κινητό έχει εκχωρηθεί σε έναν eNB εξυπηρέτησης, και μπορεί ελεύθερα να επικοινωνεί με αυτόν,



Σχήμα 2.26 Διάγραμμα κατάστασης RRC.

χρησιμοποιώντας μηνύματα σηματοδότησης στον SRB 1.

Όταν είναι σε κατάσταση αναμονής, ένα κινητό είναι σε RRC_IDLE. Σε αυτή την κατάσταση, ο SRB 1 έχει καταστραφεί, και δεν υπάρχει καταχωρημένος eNB εξυπηρέτησης. Όπως και πριν, ωστόσο, κάποια περιορισμένη επικοινωνία είναι ακόμα δυνατή. Αν το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης επιθυμεί να επικοινωνήσει με το κινητό, συνήθως επειδή έχει λάβει μια αίτηση αναζήτησης από τον EPC, τότε μπορεί να το κάνει χρησιμοποιώντας ένα μήνυμα *Αναζήτησης* RRC. Εάν το κινητό επιθυμεί να επικοινωνήσει με το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης ή να απαντήσει σε ένα μήνυμα αναζήτησης, τότε μπορεί να το κάνει από την έναρξη διαδικασίας εγκατάστασης της σύνδεσης RRC που παρουσιάσαμε παραπάνω. Με τη σειρά του, ο σταθμός βάσης αντιδρά μετακινώντας το κινητό σε RRC_CONNECTED.

Οι δύο καταστάσεις RRC χειρίζονται κινούμενες συσκευές με διαφορετικούς τρόπους. Ένα κινητό σε κατάσταση RRC_CONNECTED μπορεί να εκπέμπει και να λαμβάνει με έναν υψηλό ρυθμό δεδομένων, έτσι είναι σημαντικό για το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης να ελέγξει με ποια κυψέλη επικοινωνεί το κινητό. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μιας διαδικασίας γνωστής ως *μεταπομπή*, στην οποία το δίκτυο αλλάζει την πορεία επικοινωνίας του κινητού από τη μία κυψέλη στην άλλη. Εάν οι παλιές και οι νέες κυψέλες ελέγχονται από διαφορετικούς σταθμούς βάσης, τότε το δίκτυο αναδρομολογεί επίσης, τις διεπαφές S1-U και S1-MME του κινητού, έτσι ώστε να τρέξει άμεσα μεταξύ του νέου σταθμού βάσης και του EPC: ο παλιός σταθμός βάσης εγκαταλείπει εντελώς το δρόμο επικοινωνίας του κινητού. Επιπλέον, το δίκτυο θα αλλάξει την S-GW του κινητού και την διεπαφή (εξ) S5/S8 αν κινείται σε μια νέα περιοχή εξυπηρέτησης S-GW και θα αλλάξει τον MME εξυπηρέτησης του κινητού αν κινείται σε μία νέα MME pool area.

Στην κατάσταση RRC_IDLE το κύριο κίνητρο είναι η μείωση της σηματοδότησης. Για να επιτευχθεί αυτό, το κινητό αποφασίζει ποια κυψέλη θα ακούσει, χρησιμοποιώντας μια διαδικασία που είναι γνωστή ως *επανεπιλογή κυψέλης*. Το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης αγνοεί εντελώς τη θέση του, ενώ το EPC ενημερώνεται μόνο αν απαιτείται ενημέρωση μιας περιοχής εντοπισμού. Με τη σειρά της, η ενημέρωση περιοχής εντοπισμού μπορεί να οδηγήσει σε μια αλλαγή της S-GW ή του MME εξυπηρέτησης με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω.

Εκτός από ορισμένες μεταβατικές καταστάσεις, τα διαγράμματα κατάστασης ECM και RRC χρησιμοποιούνται πάντοτε μαζί. Ένα ενεργό κινητό είναι πάντα σε ECM-CONNECTED και RRC_CONNECTED, ενώ ένα κινητό σε κατάσταση

αναμονής είναι πάντα σε ECM-IDLE και RRC_IDLE.

2.6 Κατανομή Φάσματος

Οι προδιαγραφές του 3GPP επιτρέπουν στα κινητά τηλέφωνα και τους σταθμούς βάσης να χρησιμοποιήσουν ένα μεγάλο αριθμό ζωνών συχνοτήτων [56, 57]. Αυτές ορίζονται ως απάντηση στις αποφάσεις από την ITU και τις εθνικές ρυθμιστικές αρχές, σχετικά με την κατανομή του φάσματος σε κινητές τηλεπικοινωνίες. Ο Πίνακας 2.3 καταγράφει τις ζώνες που υποστηρίζουν την κατάσταση FDD, ενώ ο Πίνακας 2.4 καταγράφει τις ζώνες που υποστηρίζουν TDD.

Οι πίνακες δείχνουν επίσης, την πρώτη έκδοση στην οποία κάθε ζώνη εισήχθη. Σημειώστε, ωστόσο, ότι οι ζώνες προορίζονται να είναι ανεξάρτητης έκδοσης: ένα κινητό μπορεί να υποστηρίξει ζώνες που δεν εισήχθησαν μέχρι τις Εκδόσεις 9 και 10 των προδιαγραφών 3GPP, ακόμη και αν συμμορφώνεται έτσι κι αλλιώς με την Έκδοση 8. Επιπλέον, οι περισσότερες από τις ζώνες υποστηρίζονται επίσης από άλλα συστήματα όπως τα UMTS και GSM.

Μερικές από αυτές τις ζώνες συχνοτήτων, πρόσφατα κυκλοφόρησαν για χρήση των κινητών τηλεπικοινωνιών. Το 2008, για παράδειγμα, η αμερικανική Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) δημοπράτησε συχνότητες γύρω από 700 MHz (FDD ζώνες 12, 13, 14 και 17) που είχαν προηγουμένως χρησιμοποιηθεί για αναλογική τηλεοπτική μετάδοση. Στην Ευρώπη, παρόμοιες δημοπρασίες έχουν ήδη λάβει χώρα για συχνότητες περίπου 800 και 2600 MHz (FDD ζώνες 7 και 20, και TDD ζώνη 38). Οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων μπορούν επίσης να ανακατανεύμουν συχνότητες που έχουν προηγουμένως χρησιμοποιηθεί για άλλα συστήματα κινητών επικοινωνιών, καθώς οι χρήστες τους «μεταναστεύουν» στο LTE. Πιθανά παραδείγματα περιλαμβάνουν FDD ζώνες 1, 3 και 8 στην Ευρώπη (χρησιμοποιήθηκαν αρχικά από τα WCDMA, GSM 1800 και GSM 900 αντίστοιχα) και FDD ζώνες 2, 4 και 5, στις ΗΠΑ.

Το αποτέλεσμα είναι, ότι το LTE, είναι πιθανό να αναπτυχθεί σε ένα μεγάλο αριθμό ζωνών συχνοτήτων, με διαφορετικές ζώνες που χρησιμοποιούνται από διάφορες περιοχές, χώρες και φορείς εκμετάλλευσης δικτύων. Έρευνα από την Informa Telecoms & Media το 2011 [58], πρότεινε ότι οκτώ LTE συχνότητες θα ήταν ιδιαίτερα σημαντικές, δηλαδή 700, 800, 900, 1800, 2100 και 2600 MHz σε κατάσταση FDD, και 2300 και 2600 MHz σε κατάσταση TDD. Η κατάσταση εξελίσσεται ραγδαία, αλλά υπάρχουν μόνιμα ενημερωμένες λίστες αναπτύξεων LTE διαθέσιμες σε απευθείας σύνδεση [59].

Με τη σειρά της, αυτή η κατάσταση σημαίνει ότι μια συσκευή LTE θα πρέπει να στηρίζει ένα μεγάλο αριθμό φερόντων συχνοτήτων, εάν πρόκειται να είναι πραγματικά χρησιμοποιήσιμες σε όλο τον κόσμο. Αυτός ο πολλαπλασιασμός φερόντων συχνοτήτων, μπορεί να καθυστερήσει ακόμα την μεγάλης κλίμακας υιοθέτηση του LTE και θα προκαλέσει σίγουρα πολλούς πονοκεφάλους για τους σχεδιαστές των συσκευών κινητών επικοινωνιών.

Πίνακας 2.3 FDD ζώνες συχνοτήτων. Ανατύπωση με την άδεια του ETSI

Band	Release	Uplink band (MHz)	Downlink band (MHz)	Main regions	Notes
1	R99	1920–1980	2110–2170	Europe, Asia, Africa	WCDMA
2	R99	1850–1910	1930–1990	Americas	GSM 1900, CDMA
3	R5	1710–1785	1805–1880	Europe, Asia, Africa	GSM 1800
4	R6	1710–1755	2110–2155	Americas	
5	R6	824–849	869–894	Americas	GSM 850, CDMA
6	–	–	–	–	Not used by LTE
7	R7	2500–2570	2620–2690	Europe	
8	R7	880–915	925–960	Europe, Asia, Africa	GSM 900
9	R7	1749.9–1784.9	1844.9–1879.9	Japan	
10	R7	1710–1770	2110–2170	Americas	
11	R8	1427.9–1447.9	1475.9–1495.9	Japan	
12	R8	699–716	729–746	USA	Digital dividend
13	R8	777–787	746–756	USA	Digital dividend
14	R8	788–798	758–768	USA	Digital dividend
15	–	–	–	–	Not used by 3GPP
16	–	–	–	–	Not used by 3GPP
17	R8	704–716	734–746	USA	Digital dividend
18	R9	815–830	860–875	Japan	
19	R9	830–845	875–890	Japan	
20	R9	832–862	791–821	Europe	Digital dividend
21	R9	1447.9–1462.9	1495.9–1510.9	Japan	
22	R10	3410–3490	3510–3590	Europe	
23	R10	2000–2020	2180–2200	North America	
24	R10	1626.5–1660.5	1525–1559	North America	
25	R10	1850–1915	1930–1995	Americas	

Πίνακας 2.4 TDD ζώνες συχνοτήτων. Ανατύπωση με την άδεια του ETSI

Band	Release	Frequency band (MHz)	Main regions
33	R99	1900–1920	Europe, Asia
34	R99	2010–2025	Europe, Asia
35	R99	1850–1910	Americas
36	R99	1930–1990	Americas
37	R99	1910–1930	Americas
38	R7	2570–2620	Europe
39	R8	1880–1920	China
40	R8	2300–2400	China
41	R10	2496–2690	USA
42	R10	3400–3600	Europe
43	R10	3600–3800	Europe

Αναφορές

1. 3GPP TS 23.401 (September 2011) *General Packet Radio Service (GPRS) Enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Access*, Release 10.
2. 3GPP TS 36.300 (October 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall Description; Stage 2*, Release 10.
3. 3GPP TS 23.002 (September 2011) *Network Architecture*, Release 10.
4. 3GPP TS 36.401 (September 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Architecture Description*, Release 10.
5. 3GPP TS 27.001 (September 2011) *General on Terminal Adaptation Functions (TAF) for Mobile Stations (MS)*, Release 10, section 4.
6. 3GPP TS 31.102 (October 2011) *Characteristics of the Universal Subscriber Identity Module (USIM) Application*, Release 10.
7. 3GPP TS 36.306 (October 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) Radio Access Capabilities*, Release 10.
8. 3GPP TS 36.401 (September 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Architecture Description*, Release 10, section 6.
9. 3GPP TS 36.300 (October 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall Description; Stage 2*, Release 10, section 4.6.
10. 3GPP TS 23.401 (September 2011) *General Packet Radio Service (GPRS) Enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Access*, Release 10, sections 4.2.1, 4.4.
11. 3GPP TS 23.002 (September 2011) *Network Architecture*, Release 10, section 4.1.4.
12. 3GPP TS 23.003 (September 2011) *Numbering, Addressing and Identification*, Release 10, section 9.
13. 3GPP TS 22.168 (September 2011) *Earthquake and Tsunami Warning System (ETWS) Requirements; Stage 1*, Release 8.
14. 3GPP TS 23.401 (September 2011) *General Packet Radio Service (GPRS) Enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Access*, Release 10, section 4.2.2.
15. 3GPP TS 23.401 (September 2011) *General Packet Radio Service (GPRS) Enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Access*, Release 10, section 4.3.8.1.
16. 3GPP TS 23.401 (September 2011) *General Packet Radio Service (GPRS) Enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Access*, Release 10, section 3.1.
17. 3GPP TS 23.003 (September 2011) *Numbering, Addressing and Identification*, Release 10, sections 2, 6, 19.
18. 3GPP TS 36.401 (September 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Architecture Description*, Release 10, section 5.
19. 3GPP TS 36.321 (October 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) Protocol Specification*, Release 10.
20. 3GPP TS 36.322 (December 2010) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Link Control (RLC) Protocol Specification*, Release 10.
21. 3GPP TS 36.323 (March 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Packet Data Convergence Protocol (PDCP) Specification*, Release 10.
22. IETF RFC 791 (September 1981) *Internet Protocol*.
23. IETF RFC 2460 (December 1998), *Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification*.
24. 3GPP TS 29.281 (September 2011) *General Packet Radio System (GPRS) Tunnelling Protocol User Plane (GTPv1-U)*, Release 10, section 4.4.1.

25. 3GPP TS 36.414 (June 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); S1 Data Transport*, Release 10, section 5.3.
26. 3GPP TS 36.424 (June 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); X2 Data Transport*, Release 10, section 5.3.
27. IETF RFC 768 (August 1980) *User Datagram Protocol*.
28. IETF RFC 793 (September 1981) *Transmission Control Protocol*.
29. IETF RFC 4960 (September 2007) *Stream Control Transmission Protocol*.
30. 3GPP TS 29.281 (September 2011) *General Packet Radio System (GPRS) Tunnelling Protocol User Plane (GTPv1-U)*, Release 10.
31. IETF RFC 2784 (March 2000) *Generic Routing Encapsulation (GRE)*.
32. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10.
33. 3GPP TS 36.413 (September 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); S1 Application Protocol (SIAP)*, Release 10.
34. 3GPP TS 36.423 (September 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); X2 Application Protocol (X2AP)*, Release 10.
35. 3GPP TS 24.301 (September 2011) *Non-Access-Stratum (NAS) Protocol for Evolved Packet System (EPS); Stage 3*, Release 10.
36. IETF RFC 3588 (September 2003) *Diameter Base Protocol*.
37. IETF RFC 2865 (June 2000) *Remote Authentication Dial-In User Service (RADIUS)*.
38. IETF RFC 2866 (June 2000) *RADIUS Accounting*.
39. 3GPP TS 29.272 (September 2011) *Evolved Packet System (EPS); Mobility Management Entity (MME) and Serving GPRS Support Node (SGSN) Related Interfaces Based on Diameter Protocol*, Release 10.
40. 3GPP TS 29.274 (September 2011) *3GPP Evolved Packet System (EPS); Evolved General Packet Radio Service (GPRS) Tunnelling Protocol for Control Plane (GTPv2-C); Stage 3*, Release 10.
41. 3GPP TS 29.275 (September 2011) *Proxy Mobile IPv6 (PMIPv6) Based Mobility and Tunnelling Protocols; Stage 3*, Release 10.
42. IETF RFC 5213 (August 2008) *Proxy Mobile IPv6*.
43. 3GPP TS 23.402 (September 2011). *Architecture Enhancements for Non-3GPP Accesses*, Release 10.
44. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10, section 5.6.3.
45. 3GPP TS 24.301 (September 2011) *Non-Access-Stratum (NAS) Protocol for Evolved Packet System (EPS); Stage 3*, Release 10, section 5.4.1.
46. 3GPP TS 36.413 (September 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); S1 Application Protocol (SIAP)*, Release 10, section 8.6.2.
47. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10, sections 5.6.1, 5.6.2.
48. 3GPP TS 36.300 (October 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall Description; Stage 2*, Release 10, section 13.
49. 3GPP TS 23.401 (September 2011) *General Packet Radio Service (GPRS) Enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Access*, Release 10, section 4.7.
50. 3GPP TS 24.007 (March 2011) *Mobile Radio Interface Signalling Layer 3; General Aspects*, Release 10, section 11.2.3.1.5.
51. 3GPP TS 23.402 (September 2011) *Architecture Enhancements for Non-3GPP Accesses*, Release 10, section 4.10.
52. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10, section 4.2.2.

53. 3GPP TS 23.401 (September 2011) *General Packet Radio Service (GPRS) Enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Access*, Release 10, section 4.6.
54. 3GPP TS 24.301 (September 2011) *Non-Access-Stratum (NAS) Protocol for Evolved Packet System (EPS); Stage 3*, Release 10, section 3.1.
55. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10, section 4.2.8.
56. 3GPP TS 36.101 (October 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception*, Release 10, section 5.5.
57. 3GPP TS 36.104 (October 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) Radio Transmission and Reception*, Release 10, section 5.5.
58. Informa Telecoms & Media (2011) *Latest Research from Informa Telecoms & Media Identifies Eight Core LTE Bands*. Available at: <http://blogs.informatandm.com/2094/press-release-latest-research-from-informatelecoms> informa-telecoms-media-identifies-eight-core-lte-bands/ (accessed 12 December, 2011).
59. LteMaps (2011) *Mapping LTE Deployments*. Available at: <http://ltemaps.org> (accessed 12 December, 2011).

3

Ψηφιακές Ασύρματες Επικοινωνίες

Τα επόμενα τρία κεφάλαια περιγράφουν τις αρχές ασύρματης μετάδοσης και λήψης στο LTE. Εδώ, αρχίζουμε επανεξετάζοντας τις τεχνικές ασύρματης μετάδοσης που το LTE έχει κληρονομήσει από τα συστήματα επικοινωνιών 2G και 3G. Το κεφάλαιο καλύπτει τις αρχές διαμόρφωσης, τη λήψη σήματος και την εκτίμηση καναλιού, και δείχνει πώς το λαμβανόμενο σήμα μπορεί να υποβαθμιστεί σε ένα πολυδιαδρομικό περιβάλλον από τις διαλείψεις και τη διασυμβολική παρεμβολή. Στη συνέχεια, εξετάζει τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των λαθών στο λαμβανόμενο σήμα, ιδιαίτερα της εμπρόσθιας διόρθωσης λαθών, των αναμεταδόσεων και της υβριδικής αυτόματης αίτησης επανάληψης. Για ορισμένους λεπτομερείς λογαριασμούς του υλικού που καλύπτεται σε αυτό το κεφάλαιο, κοιτάξτε για παράδειγμα, τις Αναφορές [1-6].

3.1 Ασύρματη Μετάδοση και Λήψη

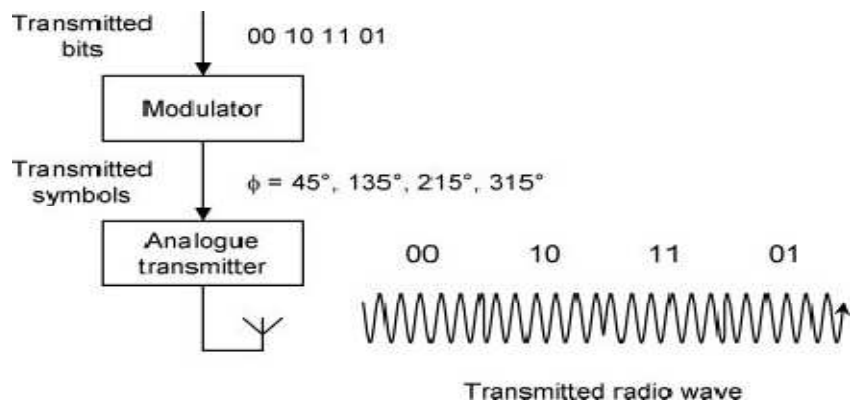
3.1.1 Μετάδοση του Σήματος

Το Σχήμα 3.1 παρουσιάζει τις πιο σημαντικές συνιστώσες ενός συστήματος ασύρματης μετάδοσης. Στο σχήμα, ο πομπός δέχεται ένα ρεύμα bits από το λογισμικό εφαρμογής. Στη συνέχεια κωδικοποιεί αυτά τα bits σε ένα ραδιοκύμα, γνωστό ως *έκτρον*, ρυθμίζοντας τις παραμέτρους του κύματος όπως το πλάτος ή φάση του.

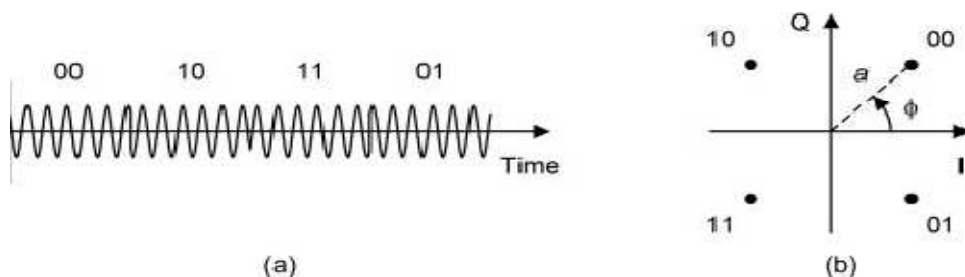
Όπως φαίνεται στο σχήμα, ο πομπός συνήθως επεξεργάζεται την πληροφορία σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, ένας *διαμορφωτής* δέχεται τα εισερχόμενα bits, και υπολογίζει *σύμβολα* που αντιπροσωπεύουν το πλάτος και τη φάση του εξερχόμενου κύματος. Στη συνέχεια τα περνά στον αναλογικό πομπό, ο οποίος παράγει το κύμα ραδιοφώνου.

Το σχέδιο διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται στο Σχήμα 3.1, είναι γνωστό ως *quadrature phase shift keying* (QPSK). Ένας διαμορφωτής QPSK λαμβάνει τα εισερχόμενα bits, δύο τη φορά, και τα μεταδίδει χρησιμοποιώντας ένα ραδιοκύμα που μπορεί να έχει τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις. Αυτές έχουν τις φάσεις των 45° , 135° , 225° και 315° (Σχήμα 3.2 (a)), οι οποίες αντιστοιχούν σε συνδυασμούς bit των 00, 10, 11 και 01 αντιστοίχως. Μπορούμε να αντιπροσωπεύσουμε τις τέσσερις καταστάσεις του QPSK χρησιμοποιώντας το *διάγραμμα αστερισμού* που φαίνεται στο Σχήμα 3.2 (b). Σε αυτό το διάγραμμα, η απόσταση της κάθε κατάστασης από την πηγή, αντιπροσωπεύει το πλάτος του μεταδιδόμενου κύματος, ενώ η γωνία (μετρούμενη αριστερόστροφα από τον x-άξονα) παριστάνει τη φάση του.

Συνήθως, είναι πιο βολικό να εκπροσωπεί κάθε σύμβολο χρησιμοποιώντας δύο άλλους αριθμούς, οι οποίοι είναι γνωστοί ως οι συνιστώσες «σε φάση» (I) και



Σχήμα 3.1 Αρχιτεκτονική ενός ασύρματου πομπού επικοινωνιών.



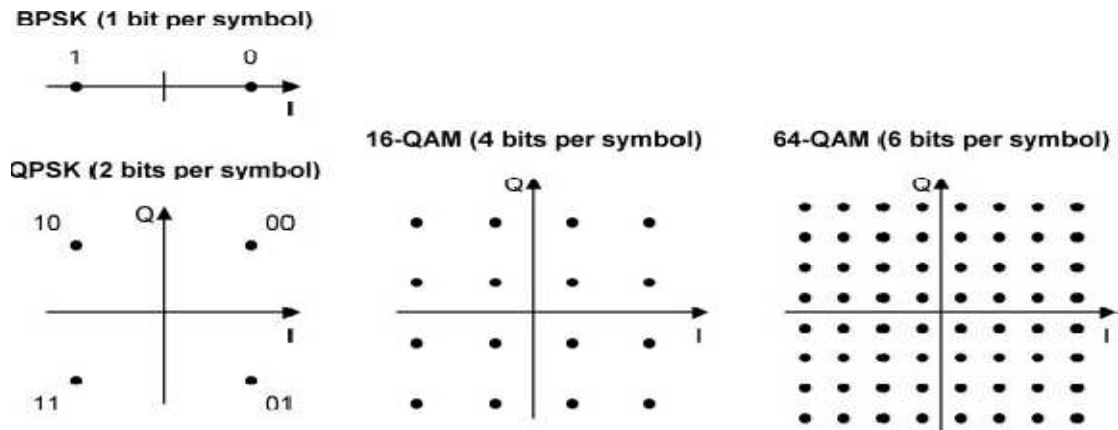
Σχήμα 3.2 QPSK. (a) Παράδειγμα κυματομορφής QPSK. (b) Διάγραμμα αστερισμού QPSK.

quadrature (Q). Αυτές υπολογίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} I &= a \cos \varphi \\ Q &= a \sin \varphi \end{aligned} \quad (3.1)$$

όπου a είναι το πλάτος του μεταδιδόμενου κύματος και φ είναι η φάση του. Οι μαθηματικοί θα αναγνωρίσουν τις «σε φάση» και τεταρτημορίου συνιστώσες, ως τα πραγματικά και φανταστικά μέρη ενός μιγαδικού αριθμού.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3, το LTE χρησιμοποιεί τέσσερα συστήματα διαμόρφωσης συνολικά. Το *binary phase shift keying* (BPSK) στέλνει bits, ένα τη φορά, χρησιμοποιώντας δύο καταστάσεις που μπορούν να ερμηνευτούν ως πρώτες φάσεις των 0° και 180° ή ως πλάτη σημάτων των $+1$ και -1 . Το LTE χρησιμοποιεί αυτό το σχέδιο για έναν περιορισμένο αριθμό ρευμάτων ελέγχου, αλλά δεν το χρησιμοποιεί για κανονική μετάδοση δεδομένων. Το *16 quadrature amplitude modulation* (16-QAM) στέλνει bits, τέσσερα τη φορά, χρησιμοποιώντας 16 καταστάσεις που έχουν διαφορετικά πλάτη και φάσεις. Παρομοίως, το 64-QAM στέλνει bits, έξι τη φορά, χρησιμοποιώντας 64 διαφορετικές καταστάσεις, έτσι έχει μία ταχύτητα δεδομένων έξι φορές καλύτερη από εκείνη του BPSK.



Σχήμα 3.3 Συστήματα διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται από LTE.

3.1.2 Λήψη Σήματος

Σε ένα σύστημα ασύρματων επικοινωνιών, το σήμα διαδίδεται καθώς ταξιδεύει από τον πομπό στο δέκτη, έτσι η λαμβανόμενη ισχύς P_R είναι μικρότερη από τη μεταδιδόμενη ισχύ P_T . Η *απώλεια διάδοσης* ή *απώλεια διαδρομής*, PL, είναι η αναλογία των δύο:

$$PL = P_R / P_T \quad (3.2)$$

Αν το σήμα ταξιδεύει στο κενό, τότε, σε μια απόσταση r από τον πομπό, καταλαμβάνει μια σφαιρική επιφάνεια με μια έκταση $4\pi r^2$. Η απώλεια διάδοσης είναι ανάλογη με r^2 . Σε ένα κυψελοειδές δίκτυο, το σήμα μπορεί επίσης να απορροφηθεί και αντανακλάται από εμπόδια όπως κτίρια και το έδαφος, το οποίο με τη σειρά του επηρεάζει την απώλεια διάδοσης. Πειραματικά, διαπιστώνουμε ότι η απώλεια διάδοσης σε ένα κυψελοειδές δίκτυο είναι κατά προσέγγιση ανάλογη με r^α , όπου το α τυπικά βρίσκεται μεταξύ 3.5 και 4.

Από μόνη της, η απώλεια διάδοσης δεν θα ήταν ένα πρόβλημα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4, ωστόσο, το λαμβανόμενο σήμα είναι επίσης παραμορφωμένο από το θερμικό θόρυβο και από τις παρεμβολές από άλλους πομπούς. Αυτά τα αποτελέσματα σημαίνουν ότι ο δέκτης δεν μπορεί να κάνει μια εντελώς ακριβή εκτίμηση του μεταδιδόμενου πλάτους και φάσης.

Ο δέκτης ασχολείται με το θέμα αυτό ως εξής. Το στάδιο *εκτίμησης συμβόλου* εξάγει το πλάτος και τη φάση του εισερχόμενου σήματος με τη μορφή συνεχώς μεταβαλλόμενων πραγματικών αριθμών. Ο *αποδιαμορφωτής* στη συνέχεια, χρησιμοποιεί αυτή την πληροφορία για να εκτιμήσει τα ληφθέντα bits, όπου μπορούν να λάβουν τη μορφή *δύσκολων αποφάσεων*, στις οποίες τα bits είναι είτε 1 είτε 0, ή *μαλακών αποφάσεων* που περιλαμβάνουν κάποιο μέτρο εμπιστοσύνης. Όπως φαίνεται στο σχήμα, ένας τυπικός αποδιαμορφωτής εκτιμάει πρώτα τις μαλακές αποφάσεις και στη συνέχεια τις μετατρέπει σε δύσκολες αποφάσεις για αργότερα.

Αν ο θόρυβος και οι παρεμβολές είναι αρκετά μεγάλες, τότε ένα bit του 1 μπορεί να παρερμηνευθεί ως ένα bit του 0 και το αντίστροφο, οδηγώντας σε

σφάλματα bit στον δέκτη. Το ποσοστό σφάλματος εξαρτάται από τον SINR στο δέκτη. Σε ένα γρήγορο σχέδιο διαμόρφωσης όπως το 64-QAM, το σήμα μπορεί να μεταδοθεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους, χρησιμοποιώντας καταστάσεις στο διάγραμμα αστερισμού που είναι συσκευασμένες στενά μεταξύ τους. Σαν αποτέλεσμα, το 64-QAM είναι ευάλωτο σε σφάλματα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο αν ο SINR είναι υψηλός. Αντίθετα, το QPSK έχει μόνο μερικές καταστάσεις, έτσι είναι λιγότερο ευάλωτο σε σφάλματα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε ένα χαμηλότερο SINR. Το LTE το εκμεταλλεύεται αυτό, αλλάζοντας δυναμικά μεταξύ των διαφόρων συστημάτων διαμόρφωσης: χρησιμοποιεί το 64-QAM σε υψηλό SINR για να δώσει έναν υψηλό ρυθμό δεδομένων, αλλά επανέρχεται σε 16-QAM ή σε QPSK σε χαμηλότερο SINR για να μειώσει τον αριθμό των σφαλμάτων.

3.1.3 Εκτίμηση Καναλιού

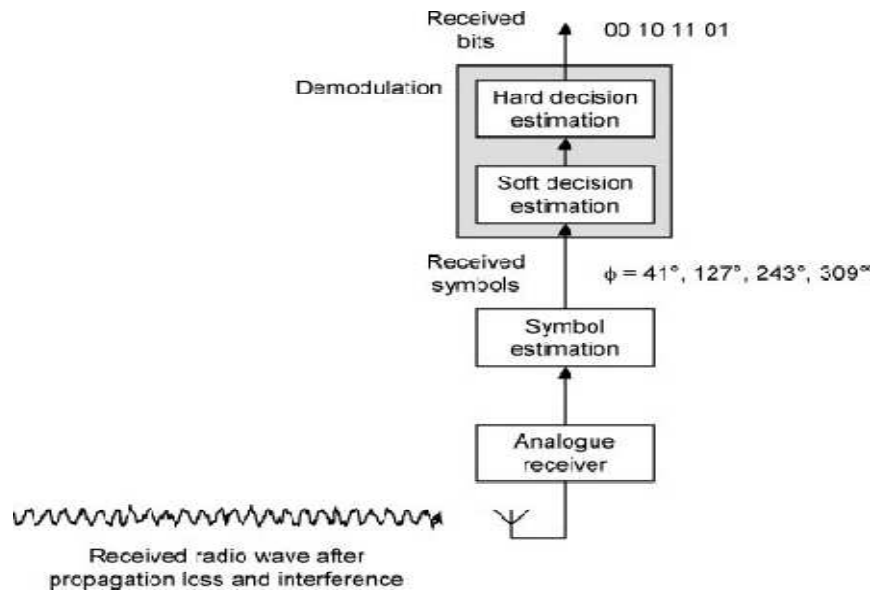
Εξακολουθεί να υπάρχει ένα πρόβλημα με τον δέκτη, από το Σχήμα 3.4. Η φάση του λαμβανόμενου σήματος εξαρτάται όχι μόνο από τη φάση του μεταδιδόμενου σήματος, αλλά επίσης και από την ακριβή θέση του δέκτη. Αν ο δέκτης κινείται μέσω ενός μισού μήκους κύματος του φέροντος σήματος (μια απόσταση των 10 cm σε μία συχνότητα φέροντος των 1500 MHz, για παράδειγμα), τότε η φάση του λαμβανόμενου σήματος αλλάζει κατά 180°. Κατά τη χρήση του QPSK, αυτή η αλλαγή φάσης μετατρέπει ζεύγη bit των 00 σε 11 και το αντίστροφο, και καταστρέφει πλήρως τις ληφθείσες πληροφορίες.

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, ο πομπός εισάγει τυχαία σύμβολα αναφοράς μέσα στο ρεύμα δεδομένων, τα οποία έχουν ένα προκαθορισμένο πλάτος και φάση. Στο δέκτη, μια λειτουργία *εκτίμησης καναλιού* μετρά τα σύμβολα αναφοράς, τα συγκρίνει με αυτά που μεταδίδονται και υπολογίζει τη μετατόπιση φάσης που εισήγαγε η διεπαφή αέρα. Μπορεί στη συνέχεια να αφαιρέσει τη μετατόπιση φάσης από τα σύμβολα πληροφοριών, και μπορεί να ανακτήσει τα δυαδικά bits.

Η προκύπτουσα αρχιτεκτονική του δέκτη φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Το εισερχόμενο σήμα φθάνει με μια διαφορετική γωνία φάσης από αυτή που παρουσιάστηκε νωρίτερα. Ωστόσο, ο εκτιμητής καναλιού ανιχνεύει αυτή τη μετατόπιση φάσης, η οποία επιτρέπει στο δέκτη να ανακατασκευάσει τα μεταδιδόμενα bits με τον ίδιο τρόπο όπως και πριν. Η μετατόπιση φάσης δεν αλλάζει πολύ από το ένα σύμβολο στο επόμενο, έτσι τα σύμβολα αναφοράς χρειάζεται μόνο να αναλάβουν ένα μικρό μέρος της ροής δεδομένων που διαβιβάζεται. Το αποτέλεσμα γενικά στο LTE, είναι περίπου 10%.

3.1.4 Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης

Οι τεχνικές που περιγράφηκαν μέχρι τώρα, λειτουργούν καλά για επικοινωνίες μία-προς-μία. Σε ένα κυψελοειδές δίκτυο, ωστόσο, ένας σταθμός βάσης πρέπει να



Σχήμα 3.4 Βασική αρχιτεκτονική ενός δέκτη ασύρματων επικοινωνιών.

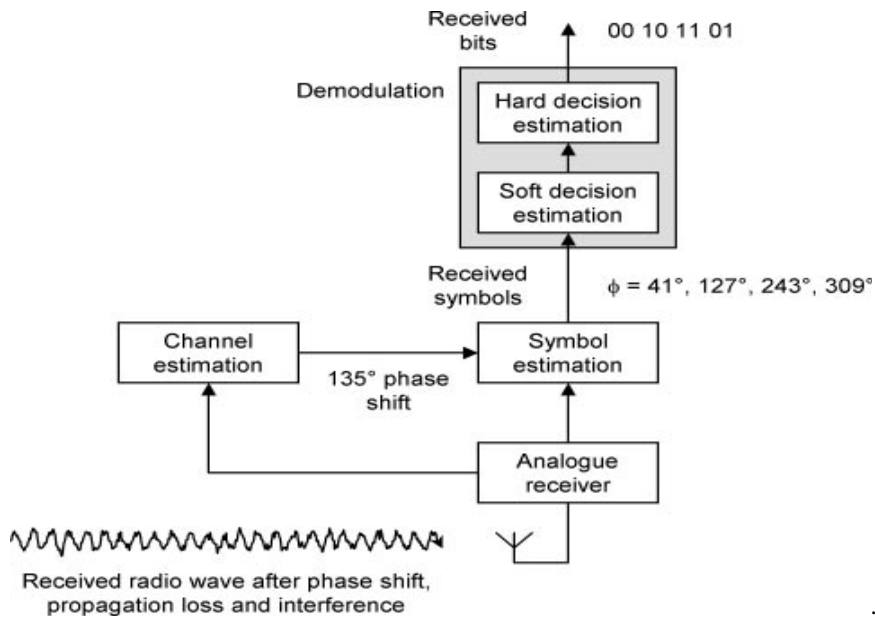
μεταδώσει σε πολλά διαφορετικά κινητά αμέσως. Αυτό το κάνει, μοιράζοντας τους πόρους της διεπαφής αέρα, με μία τεχνική γνωστή ως *πολλαπλή πρόσβαση*.

Τα συστήματα κινητών επικοινωνιών χρησιμοποιούν μερικές διαφορετικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης, δύο από τις οποίες φαίνονται στο Σχήμα 3.6. Η *πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας* (FDMA) χρησιμοποιήθηκε από τα αναλογικά συστήματα πρώτης γενιάς. Σε αυτή την τεχνική, κάθε κινητό λαμβάνει στη δική του φέρουσα συχνότητα, που τη διακρίνει από τις άλλες με τη χρήση αναλογικών φίλτρων. Οι φορείς χωρίζονται από αχρησιμοποίητες ζώνες προστασίας, που ελαχιστοποιούν την παρεμβολή μεταξύ τους. Στη *πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου* (TDMA), τα κινητά λαμβάνουν πληροφορίες στην ίδια φέρουσα συχνότητα αλλά σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

Το GSM χρησιμοποιεί ένα μείγμα FDMA και TDMA, στο οποίο κάθε κυψέλη έχει αρκετές φέρουσες συχνότητες που καθεμιά είναι μοιρασμένη ανάμεσα σε οκτώ διαφορετικά κινητά. Το LTE χρησιμοποιεί μια άλλη μικτή τεχνική, γνωστή ως *πολλαπλή πρόσβαση με ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας* (OFDMA), την οποία θα καλύψουμε στο Κεφάλαιο 4.

Τα συστήματα επικοινωνιών τρίτης γενιάς χρησιμοποίησαν μια εντελώς διαφορετική τεχνική, γνωστή ως *πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα* (CDMA). Σε αυτή την τεχνική, τα κινητά λαμβάνουν στην ίδια φέρουσα συχνότητα και την ίδια στιγμή, αλλά τα σήματα επισημαίνονται με τη χρήση κωδικών, οι οποίοι επιτρέπουν σε ένα κινητό να διαχωρίσει το δικό του σήμα από εκείνα των άλλων. Το LTE χρησιμοποιεί μερικές από τις ιδέες του CDMA για ορισμένα από τα σήματα ελέγχου του, αλλά δεν εφαρμόζει την τεχνική διαφορετικά.

Η πολλαπλή πρόσβαση είναι στην πραγματικότητα η γενίκευση μιας απλούστερης τεχνικής, γνωστής ως *πολύπλεξη*. Η διαφορά μεταξύ των δύο είναι ότι ένα σύστημα πολλαπλής πρόσβασης μπορεί να αλλάξει δυναμικά την κατανομή των



Σχήμα 3.5 Αρχιτεκτονική ενός δέκτη ασύρματων επικοινωνιών, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης της εκτίμησης καναλιού.

πόρων σε διαφορετικά κινητά τηλέφωνα, ενώ σε ένα σύστημα πολύπλεξης η κατανομή των πόρων είναι σταθερή.

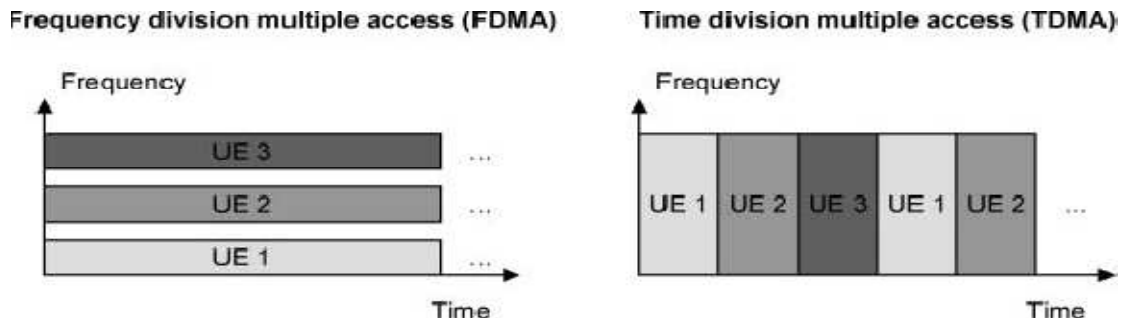
3.1.5 Καταστάσεις FDD και TDD

Χρησιμοποιώντας τις τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης που περιγράφονται παραπάνω, ένας σταθμός βάσης μπορεί να διακρίνει τις μεταδόσεις από και προς των επιμέρους κινητών στην κυψέλη. Ωστόσο, εξακολουθούμε να χρειαζόμαστε έναν τρόπο να διακρίνουμε τις μεταδόσεις των κινητών από εκείνες των ίδιων των σταθμών βάσεως.

Για να γίνει αυτό, ένα σύστημα κινητών επικοινωνιών μπορεί να λειτουργήσει στις καταστάσεις μετάδοσης που παρουσιάσαμε στο Κεφάλαιο 1 (Σχήμα 3.7). Κατά τη χρήση FDD, ο σταθμός βάσης και το κινητό μεταδίδουν και λαμβάνουν την ίδια στιγμή, αλλά χρησιμοποιώντας διαφορετικές φέρουσες συχνότητες. Χρησιμοποιώντας TDD, μεταδίδουν και λαμβάνουν στην ίδια φέρουσα συχνότητα αλλά σε διαφορετικούς χρόνους.

Οι καταστάσεις FDD και TDD έχουν διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Σε κατάσταση FDD, τα εύρη ζώνης της άνω και κάτω ζεύξης είναι σταθερά και συνήθως τα ίδια. Αυτό την καθιστά κατάλληλη για επικοινωνίες φωνής, στις οποίες οι ρυθμών δεδομένων άνω και κάτω ζεύξης, είναι πολύ όμοιοι. Σε κατάσταση TDD, το σύστημα μπορεί να ρυθμίσει πόσος χρόνος κατανέμεται στην άνω και κάτω ζεύξη. Αυτό την καθιστά κατάλληλη για εφαρμογές όπως η περιήγηση στο διαδίκτυο, στο οποίο η ταχύτητα δεδομένων κάτω ζεύξης μπορεί να είναι πολύ καλύτερη από την ταχύτητα στην άνω ζεύξη.

Η κατάσταση TDD μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά από τις παρεμβολές εάν,



Σχήμα 3.6 Παράδειγμα τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης.

για παράδειγμα, ένας σταθμός βάσης εκπέμπει ενώ ένας γειτονικός σταθμός βάσης λαμβάνει. Για να αποφευχθεί αυτό, οι γειτονικοί σταθμοί βάσης πρέπει να είναι προσεκτικά συγχρονισμένοι στο χρόνο και πρέπει να χρησιμοποιούν τις ίδιες κατανομές για την άνω και την κάτω ζεύξη, έτσι ώστε όλοι να μεταδίδουν και να λαμβάνουν την ίδια στιγμή. Αυτό καθιστά την TDD κατάλληλη για δίκτυα που γίνονται από απομονωμένα hotspots, επειδή κάθε hotspot μπορεί να έχει ένα διαφορετικό χρονοδιάγραμμα και κατανομή πόρων. Σε αντίθεση, η FDD συχνά προτιμάται για δίκτυα ευρείας περιοχής που δεν έχουν καμία απομονωμένη περιοχή.

Όταν λειτουργεί σε κατάσταση FDD, το κινητό πρέπει συνήθως να περιέχει ένα αμφίδρομο φίλτρο υψηλής εξασθένησης που απομονώνει τον πομπό άνω ζεύξης από το δέκτη κάτω ζεύξης. Σε μία παραλλαγή γνωστή ως *ημιαμφίδρομη λειτουργία FDD*, ένας σταθμός βάσης μπορεί ακόμα να μεταδίδει και να λαμβάνει ταυτόχρονα, αλλά ένα κινητό μπορεί να κάνει μόνο το ένα ή το άλλο. Αυτό σημαίνει ότι το κινητό δε χρειάζεται να απομονώσει τον πομπό και το δέκτη στον ίδιο βαθμό, το οποίο διευκολύνει το σχεδιασμό του ασύρματου υλικού του.

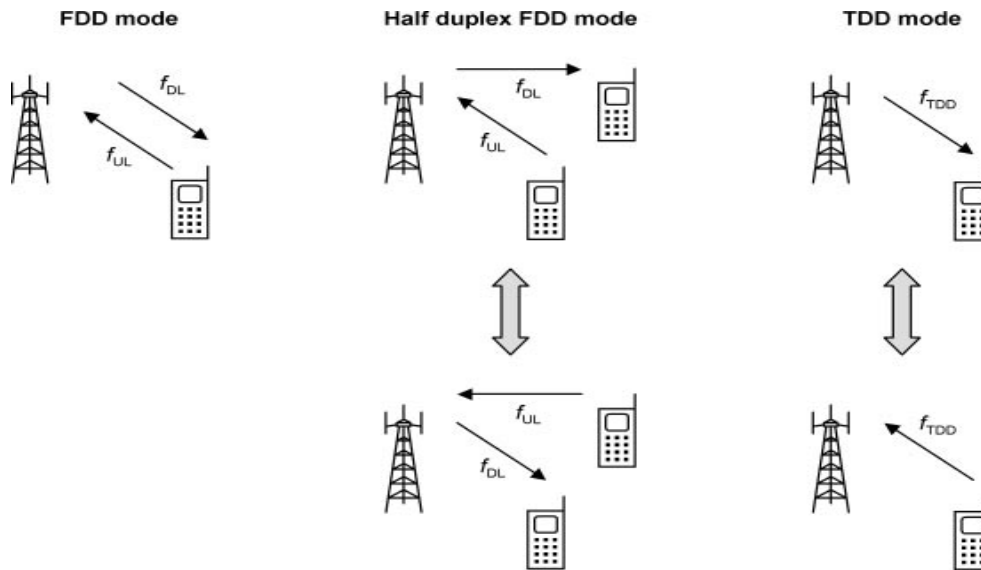
Το LTE υποστηρίζει καθεμιά από τις καταστάσεις που περιγράφονται παραπάνω. Μία κυψέλη μπορεί να χρησιμοποιήσει είτε FDD είτε TDD κατάσταση. Ένα κινητό μπορεί να υποστηρίξει οποιονδήποτε συνδυασμό πλήρως αμφίδρομου FDD, ημιαμφίδρομου FDD και TDD, αν και θα χρησιμοποιεί μόνο μία από αυτές τη φορά.

3.2 Πολυδιαδρομή, Εξασθένιση και Διασυμβολικές Παρεμβολές

3.2.1 Πολυδιαδρομή και Εξασθένιση

Η απώλεια διάδοσης και ο θόρυβος δεν είναι το μόνο πρόβλημα. Ως αποτέλεσμα των ανακλάσεων, οι ακτίνες μπορεί να πάρουν πολλές διαφορετικές διαδρομές από τον πομπό στο δέκτη. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως *πολυδιαδρομή*.

Στο δέκτη, οι εισερχόμενες ακτίνες μπορεί να προστεθούν μαζί, με διαφορετικούς τρόπους, που φαίνονται στο Σχήμα 3.8. Εάν οι κορυφές των εισερχόμενων ακτίνων συμπίπτουν, τότε αλληλοενισχύονται, μια κατάσταση γνωστή ως *εποικοδομητική παρεμβολή*. Εάν, ωστόσο, οι κορυφές της μιας ακτίνας συμπίπτουν



Σχήμα 3.7 Λειτουργία FDD και TDD καταστάσεων.

με τα χαμηλότερα σημεία μιας άλλης, τότε το αποτέλεσμα είναι καταστροφική παρεμβολή, στην οποία οι ακτίνες διαγράφουν. Η καταστροφική παρεμβολή μπορεί να κάνει τη λαμβανόμενη ισχύ σήματος να πέσει σε ένα πολύ χαμηλό επίπεδο, μια κατάσταση γνωστή ως εξασθένιση. Η προκύπτουσα αύξηση στο ποσοστό σφάλματος κάνει την εξασθένιση ένα σοβαρό πρόβλημα για κάθε σύστημα κινητών επικοινωνιών.

Αν το κινητό κινείται από το ένα μέρος στο άλλο, τότε αλλάζει η γεωμετρία ακτίνας, έτσι αλλάζει το πρότυπο παρεμβολής μεταξύ επικοινωνιακής και καταστροφικής. Η εξασθένιση είναι, επομένως, μια συνάρτηση του χρόνου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9 (α). Το πλάτος και η φάση του λαμβανόμενου σήματος μεταβάλλεται με την πάροδο ενός χρονικού διαστήματος που ονομάζεται χρόνος συνοχής, T_c , το οποίο μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

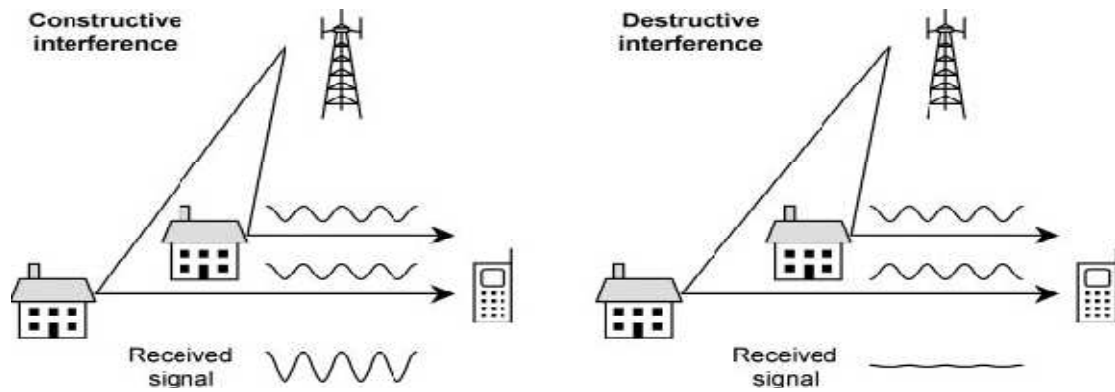
$$T_c \approx 1/f_D \quad (3.3)$$

Εδώ, f_D είναι η συχνότητα Doppler του κινητού:

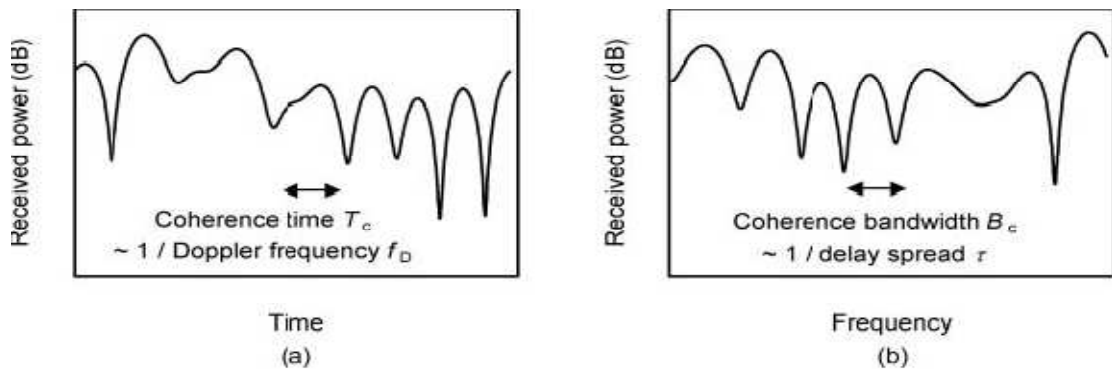
$$f_D = (u/c) f_c \quad (3.4)$$

όπου f_c είναι η φέρουσα συχνότητα, u είναι η ταχύτητα του κινητού και c είναι η ταχύτητα του φωτός ($3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$). Για παράδειγμα, ένας πεζός μπορεί να περπατήσει με ταχύτητα του 1 ms^{-1} (3.6 km hr^{-1}). Σε μια φέρουσα συχνότητα των 1500 MHz , η προκύπτουσα μετατόπιση Doppler είναι 5 Hz , δίνοντας ένα χρόνο συνοχής από περίπου 200 milliseconds . Τα ταχύτερα κινητά κινούνται μέσω του σχεδίου παρεμβολής πιο γρήγορα, έτσι ο χρόνος συνοχής τους είναι αντίστοιχα μικρότερος.

Αν η φέρουσα συχνότητα αλλάζει, τότε αλλάζει και το μήκος κύματος του ραδιοσήματος. Αυτό επίσης, καθιστά την αλλαγή σχεδίου παρεμβολής μεταξύ



Σχήμα 3.8 Παραγωγή εποικοδομητικής παρεμβολής, καταστροφική παρεμβολή και εξασθένηση σε ένα περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών.



Σχήμα 3.9 Εξασθένηση σαν συνάρτηση του (a) χρόνου και (b) της συχνότητας.

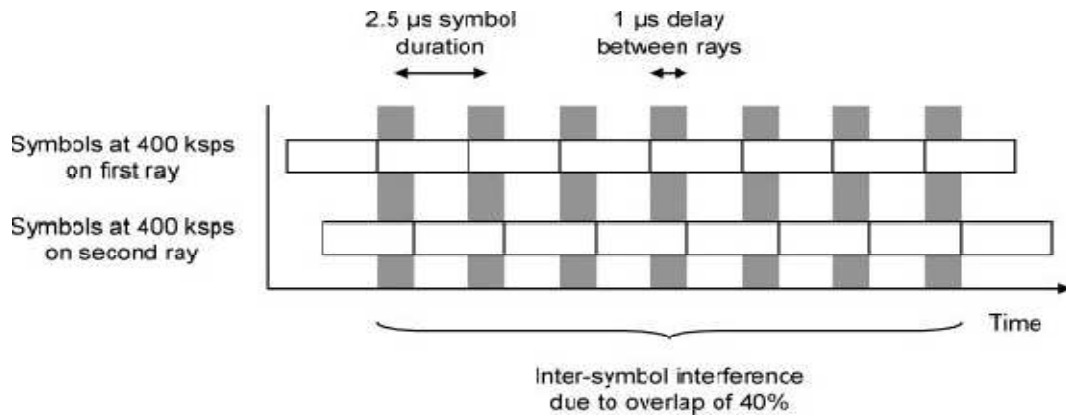
εποικοδομητικής και καταστροφικής, έτσι η εξασθένηση είναι μία συνάρτηση της συχνότητας, επίσης (Σχήμα 3.9(b)). Το πλάτος και η φάση του λαμβανόμενου σήματος μεταβάλλονται με την πάροδο μιας κλίμακας συχνότητας που ονομάζεται *εύρος ζώνης συνοχής*, B_c , το οποίο μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$B_c \approx 1/\tau \quad (3.5)$$

Εδώ, τ είναι η *καθυστέρηση διάδοσης* του ασύρματου καναλιού, που είναι η διαφορά μεταξύ των χρόνων άφιξης από τις πρώτες και τις τελευταίες ακτίνες. Μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\tau = \Delta L/c \quad (3.6)$$

όπου ΔL είναι η διαφορά μεταξύ των μηκών διαδρομής των μεγαλύτερων και μικρότερων ακτίνων. Σε μία μακροκυψέλη, μια τυπική διαφορά διάδοσης θα μπορούσε να είναι περίπου 300 μέτρα, δίνοντας μια καθυστέρηση διάδοσης του 1 μ s και ένα εύρος ζώνης συνοχής περίπου 1 MHz. Μικρότερες κυψέλες έχουν μια μικρότερη καθυστέρηση διάδοσης, έτσι έχουν ένα μεγαλύτερο εύρος ζώνης συνοχής.



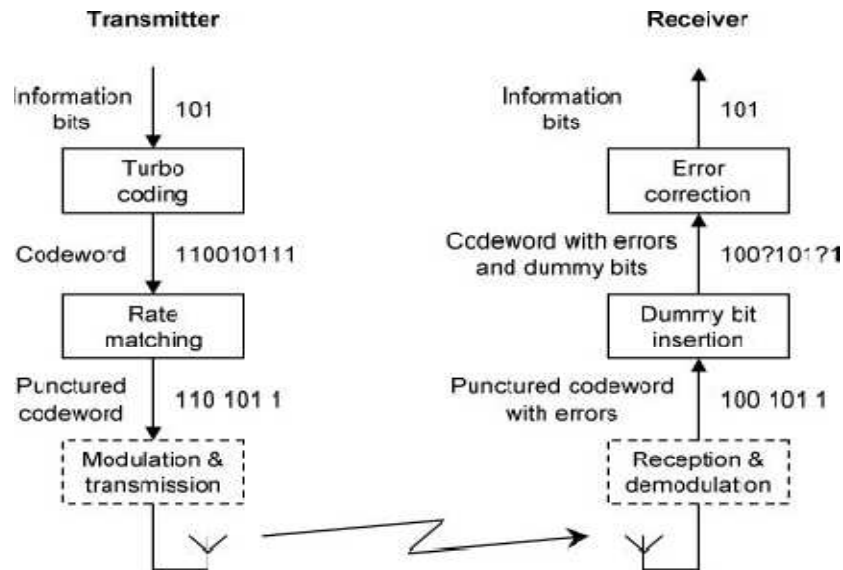
Σχήμα 3.10 Παραγωγή ISI σε ένα πολυδιαδρομικό περιβάλλον.

3.2.2 Διασυμβολική Παρεμβολή

Εάν τα μήκη διάδοσης των μεγαλύτερων και μικρότερων ακτίνων είναι διαφορετικά, τότε τα σύμβολα που ταξιδεύουν με αυτές τις ακτίνες, θα φθάσουν στο δέκτη σε διαφορετικούς χρόνους. Ειδικότερα, ο δέκτης μπορεί να αρχίσει να λαμβάνει ένα σύμβολο για μια σύντομη άμεση ακτίνα, ενώ εξακολουθεί να λαμβάνει το προηγούμενο σύμβολο σε μια μεγαλύτερη ακτίνα ανάκλασης. Τα δύο σύμβολα συνεπώς επικαλύπτονται στο δέκτη (Σχήμα 3.10), προκαλώντας ένα άλλο πρόβλημα γνωστό ως *διασυμβολική παρεμβολή (ISI)*.

Ας συνεχίσουμε το προηγούμενο παράδειγμα, στο οποίο η καθυστέρηση διάδοσης τ ήταν $1\mu\text{s}$. Αν ο ρυθμός συμβόλου είναι 400 ksps , τότε η διάρκεια συμβόλου είναι $2.5\mu\text{s}$, έτσι τα σύμβολα των μεγαλύτερων και μικρότερων ακτίνων επικαλύπτονται κατά 40% . Αυτό προκαλεί μια μεγάλη ποσότητα ISI, πράγμα που θα αυξήσει σημαντικά το ποσοστό σφάλματος στο δέκτη. Καθώς αυξάνεται ο ρυθμός δεδομένων, η διάρκεια συμβόλου πέφτει και το πρόβλημα επιδεινώνεται σταδιακά. Αυτό καθιστά την ISI ένα πρόβλημα για κάθε σύστημα επικοινωνίας υψηλού ρυθμού δεδομένων.

Σε αυτές τις συζητήσεις, έχουμε δει ότι η εξαρτώμενη από τη συχνότητα εξασθένιση και η ISI, είναι εξίσου σημαντικές, αν η καθυστέρηση διάδοσης είναι μεγάλη. Στην πραγματικότητα είναι διαφορετικοί τρόποι που ψάχνουν το ίδιο συγκεκριμένο φαινόμενο: μια μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης προκαλεί και εξαρτώμενη από τη συχνότητα εξασθένιση και ISI. Τα συστήματα επικοινωνίας 2G και 3G συχνά καταπολεμούν τις δύο επιδράσεις χρησιμοποιώντας μια συσκευή γνωστή ως *ισοσταθμιστής*, ο οποίος περνά το λαμβανόμενο σήμα μέσω ενός φίλτρου που προσπαθεί να διαμορφώσει τις χρονικές καθυστερήσεις και να αναιρέσει την επίδρασή τους. Δυστυχώς, οι ισοσταθμιστές είναι πολύπλοκες συσκευές και απέχουν πολύ από το τέλειο. Στο Κεφάλαιο 4, θα δούμε πώς η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης OFDMA μπορεί να ασχοληθεί με αυτά τα θέματα με ένα πολύ πιο άμεσο τρόπο.



Σχήμα 3.11 Λογικό διάγραμμα ενός πομπού και δέκτη χρησιμοποιώντας εμπρόσθια διόρθωση λαθών και προσαρμογή ρυθμού.

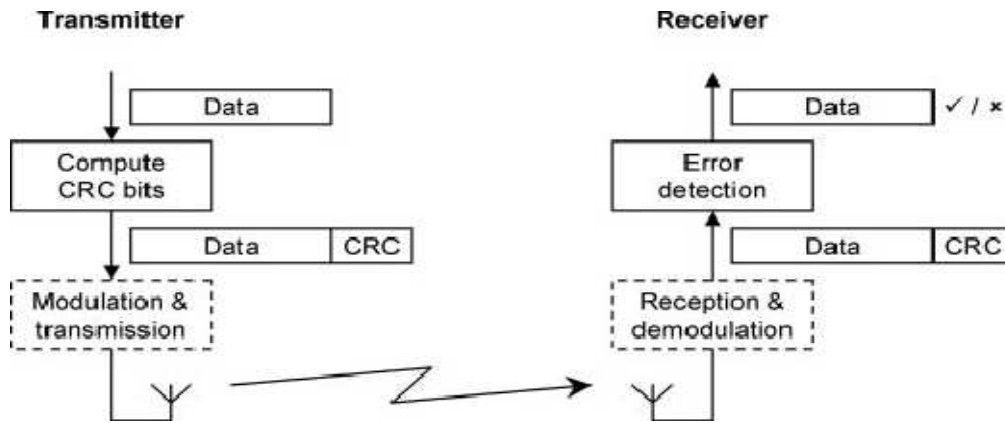
3.3 Διαχείριση Λαθών

3.3.1 Εμπρόσθια Διόρθωση Λαθών

Στις προηγούμενες ενότητες, είδαμε ότι θόρυβος και παρεμβολές οδηγούν σε λάθη σε έναν δέκτη ασύρματων επικοινωνιών. Αυτά είναι αρκετά άσχημα, κατά τη διάρκεια φωνητικών κλήσεων, αλλά είναι ακόμη πιο επιζήμια για σημαντικές πληροφορίες, όπως ιστοσελίδες και μηνύματα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου. Ευτυχώς υπάρχουν αρκετοί τρόποι για να λυθεί το πρόβλημα.

Η πιο σημαντική τεχνική είναι *εμπρόσθια διόρθωση λαθών*. Στην τεχνική αυτή, οι μεταδιδόμενες πληροφορίες παριστάνονται με μια *κωδική λέξη* που είναι κατά κανόνα δύο ή τρεις φορές μεγαλύτερη. Τα πρόσθετα bits παρέχουν επιπλέον, πλεονάζοντα δεδομένα που επιτρέπουν στο δέκτη να ανακτήσει την αρχική ακολουθία πληροφοριών. Για παράδειγμα, ένας πομπός μπορεί να αντιπροσωπεύει την ακολουθία πληροφοριών 101 χρησιμοποιώντας την κωδική λέξη 110010111. Μετά από ένα σφάλμα στο δεύτερο bit, ο δέκτης μπορεί να ανακτήσει την κωδική λέξη 100010111. Αν το σύστημα κωδικοποίησης έχει σχεδιαστεί καλά, τότε ο δέκτης μπορεί να συμπεράνει ότι αυτό δεν είναι μια έγκυρη κωδική λέξη, και ότι η πλέον πιθανή μεταδιδόμενη κωδική λέξη ήταν 110010111. Ο δέκτης έχει διορθώσει, ως εκ τούτου, το bit λάθους και μπορεί να ανακτήσει την αρχική πληροφορία. Το αποτέλεσμα είναι πολύ σαν τα γραπτά αγγλικά, το οποίο περιέχει περιττά γράμματα που επιτρέπουν στον αναγνώστη να κατανοήσει τις βασικές πληροφορίες, ακόμη και με την παρουσία ορθογραφικών λαθών.

Το *ποσοστό κωδικοποίησης* είναι ο αριθμός των bits πληροφοριών, διαιρεμένος με τον αριθμό των μεταδιδόμενων bits ($\frac{1}{3}$ στο παραπάνω παράδειγμα). Συνήθως, οι αλγόριθμοι εμπρόσθιας διόρθωσης λαθών, λειτουργούν με έναν σταθερό



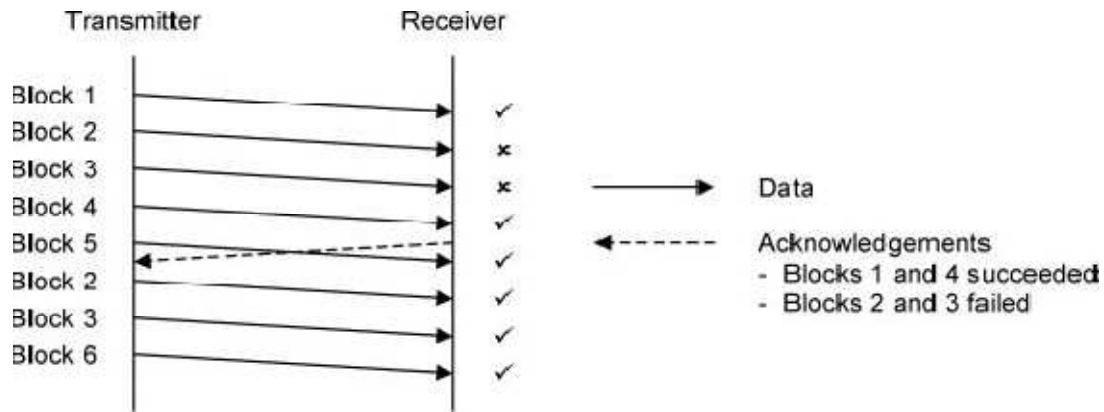
Σχήμα 3.12 Λογικό διάγραμμα ενός πομπού και δέκτη χρησιμοποιώντας την ARQ.

ρυθμό κωδικοποίησης. Παρά το γεγονός αυτό, ένας ασύρματος πομπός μπορεί ακόμα να ρυθμίσει το ποσοστό κωδικοποίησης χρησιμοποιώντας τη διαδικασία δύο σταδίων που φαίνεται στο Σχήμα 3.11. Στο πρώτο στάδιο, τα bits πληροφοριών διέρχονται μέσω ενός κωδικοποιητή σταθερού ρυθμού. Ο κύριος αλγόριθμος που χρησιμοποιείται από το LTE, είναι γνωστός ως *turbo κωδικοποίηση* και έχει ένα σταθερό ρυθμό κωδικοποίησης του $\frac{1}{3}$. Στο δεύτερο στάδιο, που ονομάζεται *ρυθμός κωδικοποίησης*, μερικά από τα κωδικοποιημένα bits επιλέγονται για μετάδοση, ενώ τα άλλα απορρίπτονται με μία διεργασία γνωστή ως *διάτρηση*. Ο δέκτης έχει ένα αντίγραφο του αλγορίθμου διάτρησης, έτσι ώστε να μπορεί να εισάγει εικονικά bits στα σημεία όπου οι πληροφορίες απορρίφθηκαν. Μπορεί, στη συνέχεια, να περάσει το αποτέλεσμα μέσω ενός turbo αποκωδικοποιητή για διόρθωση λάθους.

Οι αλλαγές στο ρυθμό κωδικοποίησης έχουν ένα παρόμοιο αποτέλεσμα με τις αλλαγές στο σχήμα διαμόρφωσης. Εάν το ποσοστό κωδικοποίησης είναι χαμηλό, τότε τα μεταδιδόμενα δεδομένα περιέχουν πολλά περιττά bits. Αυτό επιτρέπει στο δέκτη να διορθώσει ένα μεγάλο αριθμό λαθών και να λειτουργεί επιτυχώς σε ένα χαμηλό SINR, αλλά εις βάρος ενός χαμηλού ρυθμού πληροφοριών. Αν η κωδικοποίηση είναι κοντά στο 1, τότε ο ρυθμός πληροφοριών είναι υψηλότερος, αλλά το σύστημα είναι πιο ευάλωτο σε λάθη. Το LTE το εκμεταλλεύεται αυτό με μια παρόμοια ανταλλαγή που απέχει από αυτό που είδαμε νωρίτερα, μεταδίδοντας με ένα υψηλό ρυθμό κωδικοποίησης αν ο ληφθείς SINR είναι υψηλός και αντιστρόφως.

3.3.2 Αυτόματη Αίτηση Επανάληψης

Η *αυτόματη αίτηση επανάληψης* (ARQ) είναι μια άλλη τεχνική διαχείρισης λαθών, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 3.12. Εδώ, ο πομπός λαμβάνει μια ομάδα bits πληροφοριών και τα χρησιμοποιεί για να υπολογίσει κάποια επιπλέον bits που είναι γνωστά ως ένας *κυκλικός έλεγχος πλεονασμού* (CRC). Αυτά τα προσάπτει στις ομάδες πληροφοριών και στη συνέχεια μεταδίδει τα δύο σύνολα δεδομένων με το συνηθισμένο τρόπο.



Σχήμα 3.13 Λειτουργία ενός επιλεκτικού συστήματος αναμετάδοσης ARQ.

Ο δέκτης διαχωρίζει τα δύο πεδία και χρησιμοποιεί τα bits πληροφοριών για τον υπολογισμό των αναμενόμενων CRC bits. Εάν τα τηρούμενα και αναμενόμενα CRC bits είναι τα ίδια, τότε καταλήγει στο ότι οι πληροφορίες έχουν ληφθεί σωστά και στέλνει μια θετική επιβεβαίωση πίσω στον πομπό. Αν τα CRC bits είναι διαφορετικά, καταλήγει στο ότι ένα σφάλμα έχει συμβεί και στέλνει μια αρνητική επιβεβαίωση να ζητήσει μια αναμετάδοση. Θετικές και αρνητικές επιβεβαιώσεις είναι συχνά συντομογραφίες των ACK και NACK αντίστοιχα.

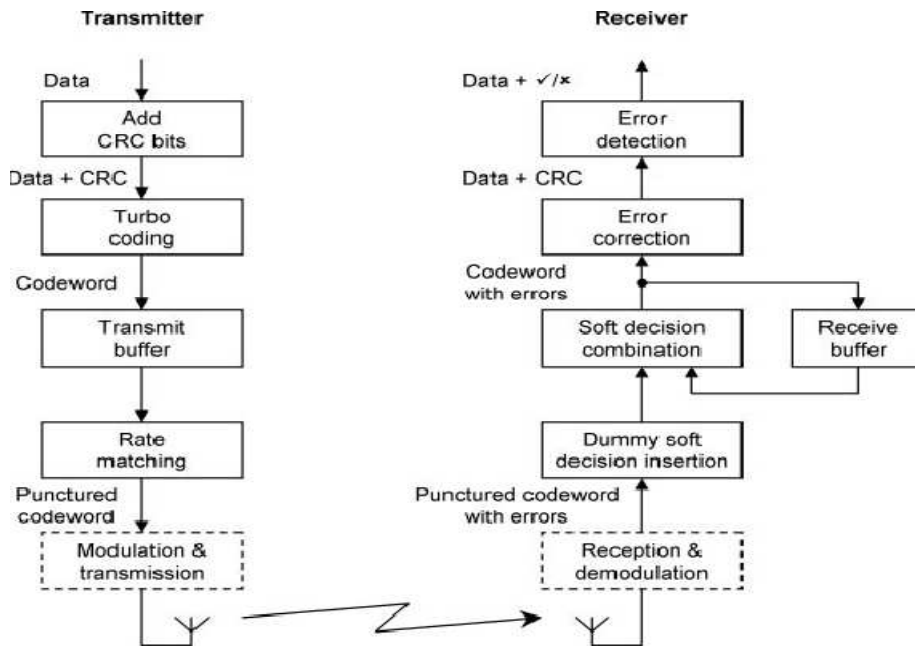
Ένα ασύρματο σύστημα επικοινωνιών συχνά συνδυάζει τις δύο τεχνικές διαχείρισης λαθών που έχουμε περιγράψει. Ένα τέτοιο σύστημα διορθώνει τα περισσότερα από τα bits λαθών με τη χρήση της εμπρόσθιας διόρθωσης λαθών και στη συνέχεια χρησιμοποιεί ARQs για να χειριστεί τα υπόλοιπα λάθη που διαρρέουν μέσα.

Κανονικά, η ARQ χρησιμοποιεί μια τεχνική που ονομάζεται επιλεκτική αναμετάδοση (Σχήμα 3.13), στην οποία ο δέκτης περιμένει για αρκετές ομάδες δεδομένων να φτάσουν πριν τα αναγνωρίσει όλα. Αυτό επιτρέπει στον πομπό να συνεχίσει την αποστολή δεδομένων χωρίς να περιμένει για μια επιβεβαίωση, αλλά αυτό σημαίνει ότι οποιαδήποτε δεδομένα που αναμεταδόθηκαν, μπορεί να πάρουν πολύ χρόνο για να φτάσουν. Κατά συνέπεια, αυτή η τεχνική είναι κατάλληλη μόνο για ρεύματα μη πραγματικού χρόνου, όπως ιστοσελίδες και μηνύματα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου.

3.3.3 Υβριδική Αυτόματη Αίτηση Επανάληψης

Η τεχνική ARQ από την προηγούμενη ενότητα λειτουργεί καλά, αλλά έχει μια ατέλεια: αν μια ομάδα δεδομένων παραλείψει τον CRC, τότε ο δέκτης τον απορρίπτει, παρά το γεγονός ότι περιέχει κάποια χρήσιμη ενέργεια σήματος. Αν μπορούσαμε να βρούμε έναν τρόπο να χρησιμοποιήσουμε αυτή την ενέργεια σήματος, τότε μπορεί να ήμασταν σε θέση να σχεδιάσουμε έναν πιο ισχυρό δέκτη.

Η ιδέα αυτή υλοποιείται με μία τεχνική γνωστή ως υβριδική ARQ (HARQ) η οποία φαίνεται στο Σχήμα 3.14. Εδώ, ο πομπός στέλνει τα δεδομένα όπως και



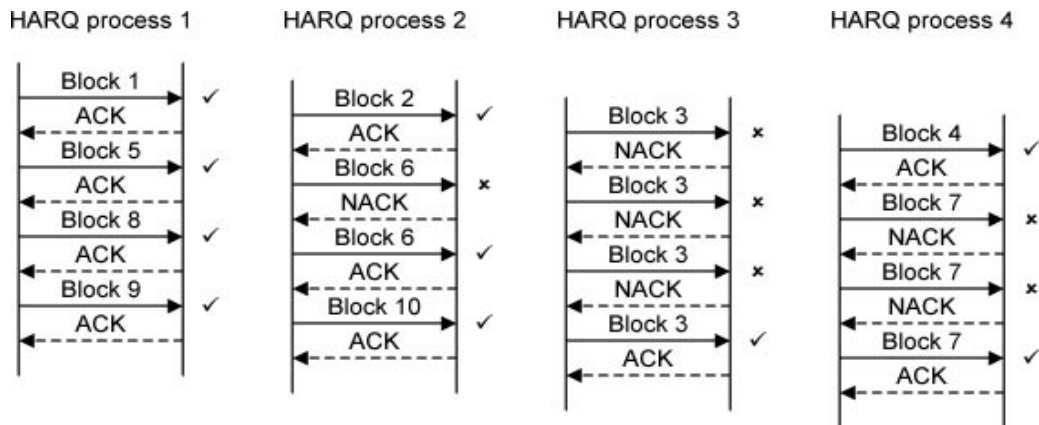
Σχήμα 3.14 Λογικό διάγραμμα ενός πομπού και δέκτη χρησιμοποιώντας HARQ.

προηγουμένως. Ο δέκτης αποδιαμορφώνει τα εισερχόμενα δεδομένα, αλλά αυτή τη φορά περνάει τις ομαλές αποφάσεις μέχρι το επόμενο στάδιο, αντί για τις δύσκολες αποφάσεις. Εισάγει μηδενικές ομαλές αποφάσεις να λογοδοτήσουν για τυχόν bits που απομάκρυνε ο πομπός και αποθηκεύει την προκύπτουσα κωδική λέξη σε έναν καταχωρητή. Έπειτα περνά την κωδική λέξη μέσω των σταδίων διόρθωσης λαθών και ανίχνευσης λαθών, και στέλνει μια επιβεβαίωση πίσω στον πομπό.

Εάν ο CRC αποτύχει, τότε ο πομπός στέλνει πάλι τα δεδομένα. Αυτή τη φορά, ωστόσο, ο δέκτης ενώνει τα δεδομένα από την πρώτη μετάδοση και αναμετάδοση, με την προσθήκη των ομαλών αποφάσεων. Αυτό αυξάνει την ενέργεια του σήματος στο δέκτη, έτσι αυξάνει την πιθανότητα μιας διάδοσης CRC. Ως αποτέλεσμα, το σύστημα αυτό αποδίδει καλύτερα από τη βασική τεχνική ARQ, στην οποία η πρώτη μετάδοση απορρίφθηκε.

Κανονικά, η HARQ χρησιμοποιεί μια τεχνική αναμετάδοσης που ονομάζεται *στάση- και- αναμονή*, στην οποία ο πομπός περιμένει για μια επιβεβαίωση πριν την αποστολή νέων δεδομένων ή μιας αναμετάδοσης. Αυτό απλοποιεί τη σχεδίαση και μειώνει τις χρονικές καθυστερήσεις στο σύστημα, το οποίο μπορεί να κάνει αποδεκτό την HARQ ακόμη και σε ρεύματα πραγματικού χρόνου, όπως η φωνή. Ωστόσο, αυτό επίσης σημαίνει ότι ο πομπός πρέπει να σταματήσει περιμένοντας την επιβεβαίωση, για να φτάσει. Για να προληφθεί η διακίνηση από την πτώση, το σύστημα μοιράζει τα δεδομένα μεταξύ πολλών *διεργασιών HARQ*, οι οποίες είναι πολλαπλά αντίγραφα του Σχήματος 3.14. Μία διεργασία μπορεί στη συνέχεια να μεταδώσει, ενώ οι άλλες περιμένουν για επιβεβαιώσεις, με τον τρόπο που φαίνεται στο σχήμα 3.15.

Η χρήση πολλαπλών διεργασιών HARQ σημαίνει ότι ο δέκτης αποκωδικοποιεί ομάδες δεδομένων με μία διαφορετική σειρά από εκείνη στην οποία μεταδόθηκαν. Στο Σχήμα 3.15, για παράδειγμα, η ομάδα 3 μεταδίδεται τέσσερις φορές και αποκωδικοποιείται μόνο κάποια στιγμή μετά την ομάδα 4. Για την



Σχήμα 3.15 Λειτουργία πολλαπλών διεργασιών HARQ σε συνδυασμό με ένα σύστημα αναμετάδοσης στάσης- και- αναμονής.

αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, ο δέκτης περιλαμβάνει μια συνάρτηση αναδιάταξης που δέχεται τις αποκωδικοποιημένες ομάδες και τις επιστρέφει στην αρχική τους σειρά.

Υπάρχει ένα τελευταίο πρόβλημα. Αν η αρχική μετάδοση είναι άσχημα κατεστραμμένη από παρεμβολές, τότε μπορεί να χρειαστούν αρκετές αναμεταδόσεις πριν ξεπεραστεί η παρεμβολή. Για τον περιορισμό των χρονικών καθυστερήσεων που προκύπτουν, μια διεργασία HARQ είναι συνήθως ρυθμισμένη έτσι ώστε να τα παρατάει μετά από μερικές ανεπιτυχείς προσπάθειες να μεταφέρει μια ομάδα δεδομένων. Σε ένα υψηλότερο επίπεδο, ένας βασικός δέκτης ARQ μπορεί να ανιχνεύσει το πρόβλημα, και να δώσει εντολή στον πομπό να στείλει την ομάδα και πάλι από την αρχή. Το LTE εφαρμόζει αυτήν την τεχνική, με τη χρήση HARQ στο φυσικό στρώμα, που υποστηρίζεται από ένα βασικό σύστημα ARQ στο πρωτόκολλο RLC.

Αναφορές

1. Goldsmith, A. (2005) *Wireless Communications*, Cambridge University Press.
2. Molisch, A. F. (2010) *Wireless Communications*, 2nd edn, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
3. Rappaport, T. S. (2001) *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd edn, Prentice Hall.
4. Tse, D. and Viswanath, P. (2005) *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press.
5. Parsons, J. D. (2000) *The Mobile Radio Propagation Channel*, 2nd edn, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
6. Saunders, S. and Arag'ón-Zavala, A. (2007) *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, 2nd edn, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.

4

Πολλαπλή Πρόσβαση με Ορθογωνική Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας

Η τεχνική που χρησιμοποιείται για την ασύρματη μετάδοση και λήψη στο LTE είναι γνωστή ως OFDMA. Η OFDMA εκτελεί τις ίδιες λειτουργίες όπως οποιαδήποτε άλλη τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, επιτρέποντας στο σταθμό βάσης να επικοινωνεί με πολλά διαφορετικά κινητά την ίδια στιγμή. Ωστόσο, είναι επίσης ένας ισχυρός τρόπος να ελαχιστοποιηθούν τα προβλήματα της εξασθένησης και της ISI, που παρουσιάσαμε στο Κεφάλαιο 3. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα περιγράψουμε τις βασικές αρχές της OFDMA, και θα δείξουμε πώς εφαρμόζεται σε ένα κυψελοειδές δίκτυο κινητών. Θα καλύψουμε επίσης μια τροποποιημένη τεχνική ασύρματης μετάδοσης, γνωστή ως ενιαία φέρουσα πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης συχνότητας (SC-FDMA), η οποία χρησιμοποιείται για την άνω ζεύξη του LTE.

Η OFDMA χρησιμοποιείται επίσης και από διάφορα άλλα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών, όπως τοπικά ασύρματα δίκτυα (IEEE 802.11 εκδόσεις a, g και n) και WiMAX (IEEE 802.16), καθώς και στην ψηφιακή τηλεόραση και τις ραδιοφωνικές εκπομπές. Ωστόσο, το LTE είναι το πρώτο σύστημα που έχει κάνει χρήση του SC-FDMA.

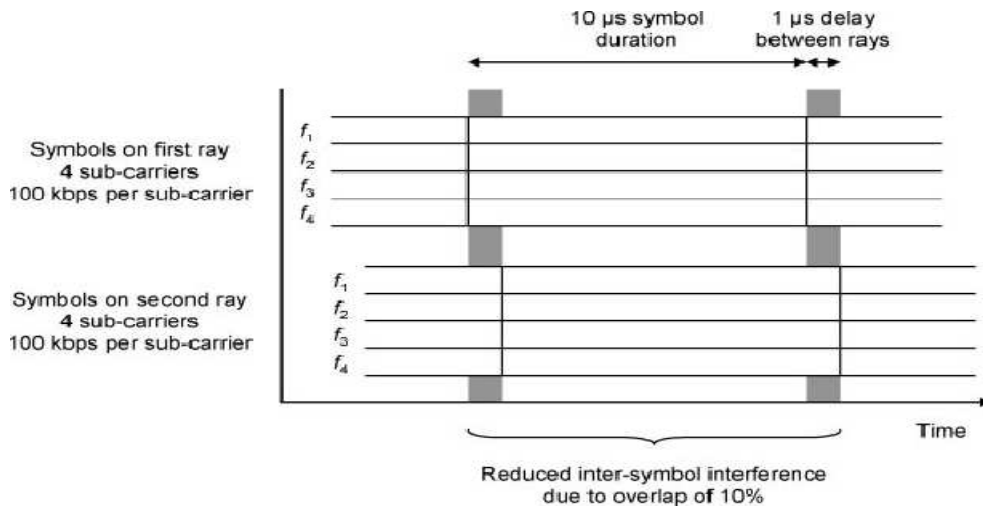
4.1 Ορθογώνια Πολύπλεξη Διαίρεσης Συχνότητας

4.1.1 Μείωση της ISI χρησιμοποιώντας OFDM

Στο τελευταίο κεφάλαιο, είδαμε πώς η υψηλού ρυθμού μετάδοση δεδομένων σε ένα πολυδιαδρομικό περιβάλλον, οδηγεί σε ISI. Στο Σχήμα 3.10, για παράδειγμα, η καθυστέρηση διάδοσης ήταν 1μs και ο ρυθμός δεδομένων ήταν 400 ksps, έτσι τα σύμβολα επικαλύπτονται στο δέκτη κατά 40%. Αυτό οδήγησε σε παρεμβολές και σφάλματα bit στον δέκτη.

Η ορθογώνια πολύπλεξη διαίρεσης συχνότητας (OFDM) είναι ένας ισχυρός τρόπος για να λυθεί το πρόβλημα. Αντί να στέλνει τις πληροφορίες ως ένα ενιαίο ρεύμα, ένας πομπός OFDM διαιρεί τις πληροφορίες σε διάφορες παράλληλες υποροές, και στέλνει κάθε υπό-ρεύμα σε διαφορετική συχνότητα γνωστή ως μια *υποφέρουσα*. Εάν ο συνολικός ρυθμός δεδομένων παραμένει ο ίδιος, τότε ο ρυθμός των δεδομένων για κάθε υπο-φέρουσα είναι μικρότερος από πριν, έτσι η διάρκεια συμβόλου είναι μεγαλύτερη. Αυτό μειώνει την ποσότητα της ISI, και μειώνει το ρυθμό λάθους.

Το Σχήμα 4.1 δείχνει ένα απλό παράδειγμα. Εδώ, έχουμε χωρίσει την αρχική



Σχήμα 4.1 Μείωση της ISI με διαβίβαση σε πολλαπλές υπό-φέρουσες.

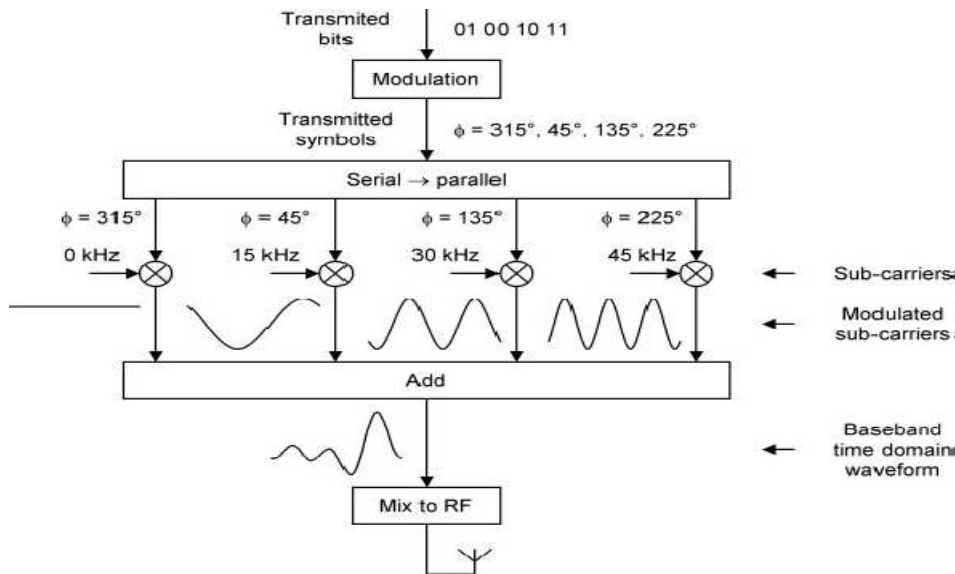
ροή δεδομένων ανάμεσα σε τέσσερις υπό-φέρουσες με συχνότητες f_1 έως f_4 . Ο ρυθμός δεδομένων σε κάθε υπό-φέρουσα είναι πλέον 100 ksps, έτσι η διάρκεια συμβόλου έχει αυξηθεί σε 10 μs . Αν η καθυστέρηση διάδοσης παραμένει στο 1 μs , τότε τα σύμβολα επικαλύπτονται μόνον κατά 10%. Αυτό μειώνει την ποσότητα της ISI στο ένα τέταρτο από αυτό που ήταν πριν και μειώνει τον αριθμό των λαθών στο δέκτη. Στην πράξη, το LTE μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα πολύ μεγάλο αριθμό υπό-φερουσών, μέχρι ένα μέγιστο των 1200 στην Έκδοση 8, ο οποίος μειώνει την ποσότητα της ISI σε ασήμαντα επίπεδα.

4.1.2 Ο Πομπός OFDM

Το Σχήμα 4.2 είναι ένα λογικό διάγραμμα ενός αναλογικού πομπού OFDM. Το διάγραμμα περιέχει ορισμένες απλοποιήσεις με τις οποίες θα ασχοληθούμε σύντομα, αλλά χρησιμεύει για την απεικόνιση των βασικών αρχών της τεχνικής.

Ο πομπός δέχεται ένα ρεύμα bits από πρωτόκολλα ανώτερου στρώματος και τα μετατρέπει σε σύμβολα, χρησιμοποιώντας το επιλεγμένο σύστημα διαμόρφωσης, για παράδειγμα την QPSK. Ο μετατροπέας σειριακού σε παράλληλο παίρνει στη συνέχεια μια ομάδα συμβόλων, τέσσερις σε αυτό το παράδειγμα, και αναμιγνύει κάθε σύμβολο με μια από τις υπο-φέρουσες ρυθμίζοντας το πλάτος και τη φάση του.

Το LTE χρησιμοποιεί μια σταθερή απόσταση υπο-φερουσας των 15 kHz, έτσι οι υπο-φέρουσες στο Σχήμα 4.2 έχουν συχνότητες των 0, 15, 30 και 45 kHz. (Θα αναμειξουμε τα σήματα μέχρι τη ραδιοσυχνότητα στο τέλος). Η διάρκεια συμβόλου είναι το αντίστροφο της απόστασης υπο-φερουσας, έτσι είναι περίπου 66.7 μs . Προς το παρόν, αυτό είναι απλώς μια αυθαίρετη επιλογή: οι λόγοι θα καταστούν σαφείς εν ευθέτω χρόνο. Ωστόσο, αυτό σημαίνει ότι η υπο-φέρουσα των 15 kHz περνά μέσα από ένα κύκλο κατά τη διάρκεια των 66.7 μs της διάρκειας συμβόλου, ενώ οι υπο-φέρουσες των 30 και 45 kHz διέρχονται από δύο και τρεις κύκλους αντίστοιχα.



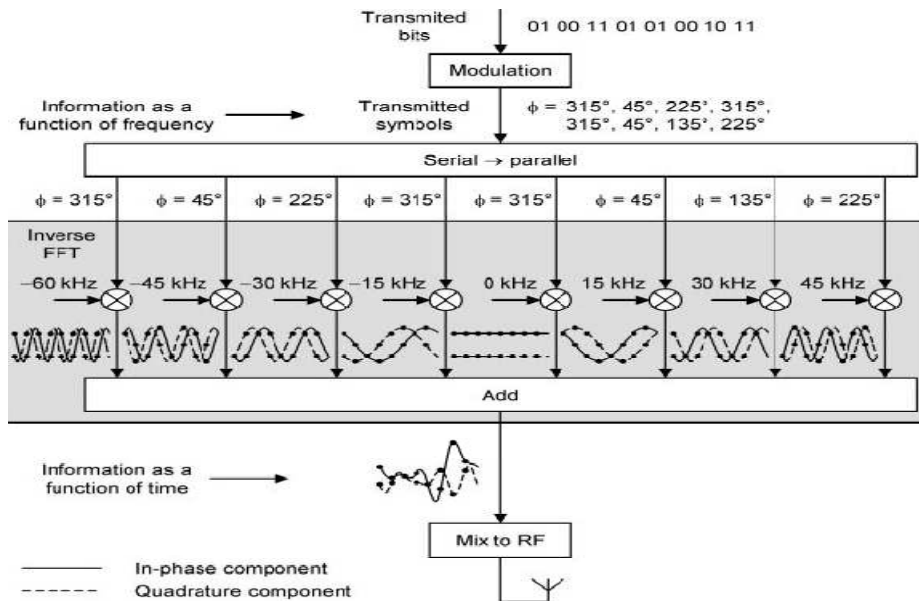
Σχήμα 4.2 Στάδια επεξεργασίας σε έναν απλοποιημένο αναλογικό πομπό OFDM.

Τώρα έχουμε τέσσερα κύματα ημιτόνου, στις συχνότητες των 0, 15, 30 και 45 kHz, τα πλάτη και οι φάσεις των οποίων αντιπροσωπεύουν τα οκτώ bits που μεταδίδονται. Προσθέτοντας αυτά τα κύματα ημιτόνου μαζί, μπορούμε να δημιουργήσουμε μια ενιαία κυματομορφή στο πεδίο του χρόνου, το οποίο είναι μια χαμηλή αναπαράσταση συχνότητας του σήματος που χρειάζεται να στείλουμε. Το μόνο που απομένει, είναι να αναμείξουμε την κυματομορφή μέχρι τη ραδιοσυχνότητα (RF) για μετάδοση.

Το Σχήμα 4.3 περιλαμβάνει τρεις επεκτάσεις. Πρώτον, έχουμε προσθέσει τέσσερις υπο-φέρουσες, στις συχνότητες των -15, -30, -45 και -60 kHz. Η διάκριση μεταξύ θετικών και αρνητικών συχνοτήτων είναι ότι οι τελευταίες τελικά μεταδίδονται κάτω από τη φέρουσα συχνότητα, όχι πάνω από αυτήν. Σε μια φέρουσα συχνότητα των 800 MHz, για παράδειγμα, η υπο-φέρουσα των 15 kHz καταλήγει στα 800.015 MHz, ενώ η υπο-φέρουσα των -15 kHz καταλήγει στα 799.985 MHz.

Δεύτερον, διακρίνουμε τις θετικές και τις αρνητικές συχνότητες διατηρώντας τις «σε φάση» και σε τετραγωνισμό συνιστώσες κάθε υπο-φέρουσας με το μεγαλύτερο μέρος της διαδικασίας μετάδοσης. Στο Σχήμα 4.3, για παράδειγμα, οι συνιστώσες των «σε φάση» σημάτων των 15 kHz και -15 kHz είναι ακριβώς οι ίδιες, αλλά μπορούμε να τις διακρίνουμε επειδή οι συνιστώσες τετραγωνισμού τους είναι διαφορετικές. Μετά την ανάμιξη των πληροφοριών μέχρι τις RF, όλες οι συχνότητες είναι θετικές και οι συνιστώσες τετραγωνισμού μπορεί να απορριφθούν.

Τρίτον, είναι εξαιρετικά επιθυμητό να κάνουμε την επεξεργασία ψηφιακά, παρά σε αναλογική μορφή. Στο Σχήμα 4.3, δοκιμάζουμε τις «σε φάση» και σε τετραγωνισμό συνιστώσες οκτώ φορές ανά σύμβολο, που μας επιτρέπει να δοκιμάσουμε την υπο-φέρουσα των -60 kHz δύο φορές σε κάθε κύκλο. Γενικότερα, ο ελάχιστος αριθμός δειγμάτων ανά σύμβολο ισούται με τον αριθμό των υπο-φερουσών. Μπορούμε να κάνουμε στη συνέχεια, τις πράξεις ανάμειξης και



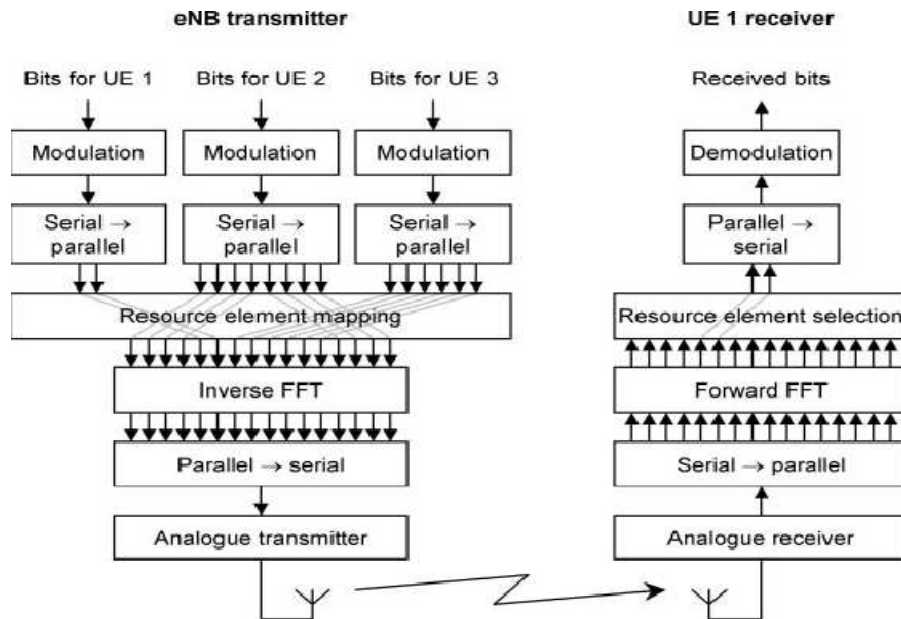
Σχήμα 4.3 Βήματα επεξεργασίας σε ένα ψηφιακό πομπό OFDM.

πρόσθεσης ψηφιακά, που έχει σαν αποτέλεσμα μια ψηφιακή κυματομορφή στο πεδίο του χρόνου που περιέχει όλες τις πληροφορίες που χρειαζόμαστε. Μπορούμε στη συνέχεια να μετατρέψουμε την κυματομορφή από ψηφιακή σε αναλογική μορφή, να τη φιλτράρουμε και να την αναμειγνύουμε μέχρι την RF, για μετάδοση.

Τώρα, ας ρίξουμε μια ματιά σε δύο σημαντικά σημεία στην αλυσίδα επεξεργασίας. Κατά το σειριακό σε παράλληλο στάδιο μετατροπής, τα δεδομένα αντιπροσωπεύουν το πλάτος και τη φάση της κάθε υπο-φέρουσας, σαν μια συνάρτηση της συχνότητας. Μετά το στάδιο προσθήκης προς το τέλος, τα δεδομένα αντιπροσωπεύουν τις «σε φάση» και σε τετραγωνισμό συνιστώσες του μεταδιδόμενου σήματος, σαν μια συνάρτηση του χρόνου. Μπορούμε να δούμε ότι τα στάδια ανάμιξης και προσθήκης έχουν απλά μετατρέψει τα δεδομένα από μια συνάρτηση συχνότητας σε μία συνάρτηση χρόνου.

Αυτή η μετατροπή είναι πράγματι μια πασίγνωστη υπολογιστική τεχνική που ονομάζεται *αντίστροφος διακριτός μετασχηματισμός Fourier* (DFT). (Ο μετασχηματισμός Fourier μετατρέπει τα δεδομένα από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο συχνοτήτων, έτσι ο πομπός απαιτεί έναν αντίστροφο μετασχηματισμό, ο οποίος διενεργεί την αντίστροφη διαδικασία). Με τη χρήση αυτής της τεχνικής, μπορούμε να κρύψουμε τα ρητά στάδια ανάμιξης στα Σχήματα 4.2 και 4.3: αντ' αυτού, περνάμε απλά τα σύμβολα σε ένα αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier και σηκώνουμε το σήμα στο πεδίο του χρόνου από την έξοδο.

Με τη σειρά του, ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier μπορεί να υλοποιηθεί εξαιρετικά γρήγορα χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο, γνωστό ως *ταχύς μετασχηματισμός Fourier* (FFT). Αυτό περιορίζει το υπολογιστικό φορτίο στον πομπό και το δέκτη, και επιτρέπει στις δύο συσκευές να εφαρμοστούν με έναν υπολογιστικά αποδοτικό τρόπο. Ωστόσο, υπάρχει ένας σημαντικός περιορισμός: για να λειτουργεί ο FFT αποτελεσματικά, ο αριθμός των σημείων δεδομένων πρέπει να είναι είτε μια



Σχήμα 4.4 Αρχικό λογικό διάγραμμα ενός OFDM πομπού και δέκτη

ακριβή δύναμη των δύο ή ένα προϊόν μόνο μικρών πρώτων αριθμών. Υπάρχουν πολλά βιβλία με περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με το μετασχηματισμό Fourier, για παράδειγμα [1] και [2].

4.1.3 Αρχικό Λογικό Διάγραμμα

Το Σχήμα 4.4 είναι ένα λογικό διάγραμμα ενός OFDM πομπού και δέκτη, χρησιμοποιώντας τις αρχές που έχουμε συζητήσει μέχρι τώρα. Υποθέτουμε ότι το σύστημα λειτουργεί στην κάτω ζεύξη, έτσι ώστε ο πομπός να είναι στο σταθμό βάσης και ο δέκτης να είναι στο κινητό. Το διάγραμμα περιέχει ακόμα μερικές απλοποιήσεις, αλλά θα ασχοληθούμε με αυτές σύντομα.

Στο διάγραμμα, ο σταθμός βάσης στέλνει ρεύματα από bits σε τρία διαφορετικά κινητά. Ρυθμίζει κάθε ρεύμα bit ανεξάρτητα, πιθανώς χρησιμοποιώντας ένα διαφορετικό σχήμα διαμόρφωσης για κάθε ένα. Στη συνέχεια περνά κάθε ρεύμα συμβόλου μέσω ενός μετατροπέα σειριακού σε παράλληλο, για να το διαιρέσει σε υπο-ροές. Ο αριθμός των υπο-ρευμάτων ανά κινητό εξαρτάται από το ρυθμό δεδομένων: για παράδειγμα, μια φωνητική εφαρμογή μπορεί να χρησιμοποιήσει μόνο μερικές υπο-ροές, ενώ μια εφαρμογή βίντεο μπορεί να χρησιμοποιήσει πολλά περισσότερα.

Το πρόγραμμα αντιστοίχισης στοιχείων πόρου παίρνει τις επιμέρους υπο-ροές και επιλέγει τις υπο-φέρουσες στις οποίες θα τα μεταδώσει. Οι υπο-φέρουσες ενός κινητού μπορεί να βρίσκονται σε μια γειτονική ομάδα (όπως στην περίπτωση των κινητών 1 και 3), ή μπορούν να χωριστούν (όπως για το κινητό 2). Οι πληροφορίες που προκύπτουν είναι το πλάτος και η φάση της κάθε υπο-φέρουσας ως συνάρτηση της συχνότητας. Περνώντας το από ένα αντίστροφο FFT, μπορούμε να υπολογίσουμε

τις «σε φάση» και σε τετραγωνισμό συνιστώσες της αντίστοιχης κυματομορφής στο πεδίο του χρόνου. Αυτό μπορεί στη συνέχεια να ψηφιοποιηθεί, να φιλτραριστεί και να αναμιχθεί στην RF, για μετάδοση.

Το κινητό αντιστρέφει τη διαδικασία. Ξεκινά με δειγματοληψία του εισερχόμενου σήματος, το φιλτράρει, και το μετατρέπει κάτω από τη βάση. Στη συνέχεια περνά τα δεδομένα μέσω μιας εμπρόσθιας FFT, για να ανακτήσει το πλάτος και τη φάση της κάθε υπο-φέρουσας. Θα υποθέσουμε τώρα ότι ο σταθμός βάσης έχει ήδη πει στο κινητό ποιες υπο-φέρουσες να χρησιμοποιήσει, μέσω των τεχνικών χρονοδιαγράμματος που θα καλύψουμε στο Κεφάλαιο 8. Χρησιμοποιώντας αυτή τη γνώση, το κινητό επιλέγει τις απαιτούμενες υπο-φέρουσες και ανακτά τις πληροφορίες που διαβιβάζονται, ενώ απορρίπτει τις υπόλοιπες.

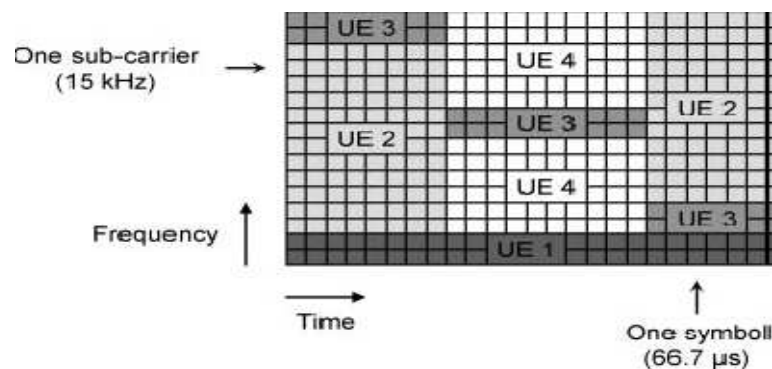
4.2 OFDMA σε ένα Κυψελοειδές Δίκτυο Κινητών

4.2.1 Πολλαπλή Πρόσβαση

Στο Σχήμα 4.4, ο σταθμός βάσης μεταδίδεται σε τρία κινητά ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας OFDM. Μπορούμε να πάμε αυτή την ιδέα ένα βήμα παραπέρα, διαμοιράζοντας τους πόρους δυναμικά μεταξύ όλων των κινητών στην κυψέλη. Η προκύπτουσα τεχνική είναι γνωστή ως OFDMA, και απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5.

Στην OFDMA, ο σταθμός βάσης μοιράζει τους πόρους του, μεταδίδοντας προς τα κινητά σε διαφορετικούς χρόνους και συχνότητες, έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις των επιμέρους εφαρμογών. Για παράδειγμα, το κινητό 1 λαμβάνει ένα VoIP ρεύμα, ώστε ο ρυθμός δεδομένων, και επομένως ο αριθμός των υπο-φερουσών, να είναι χαμηλός αλλά σταθερός. Από την άλλη, το κινητό 2 λαμβάνει ένα ρεύμα πακέτων δεδομένων μη πραγματικού χρόνου. Ο μέσος ρυθμός δεδομένων είναι υψηλότερος, αλλά τα δεδομένα έρχονται σε εκρήξεις, έτσι ο αριθμός των υπο-φερουσών μπορεί να ποικίλει.

Ο σταθμός βάσης μπορεί επίσης να ανταποκρίνονται στην εξασθένιση που εξαρτάται από τη συχνότητα, με την κατανομή υπο-φερουσών κατά τις οποίες το κινητό δέχεται ένα ισχυρό σήμα. Στο σχήμα, το κινητό 3 λαμβάνει ένα ρεύμα VoIP,



Σχήμα 4.5 Εφαρμογή TDMA και FDMA κατά τη χρήση OFDMA.

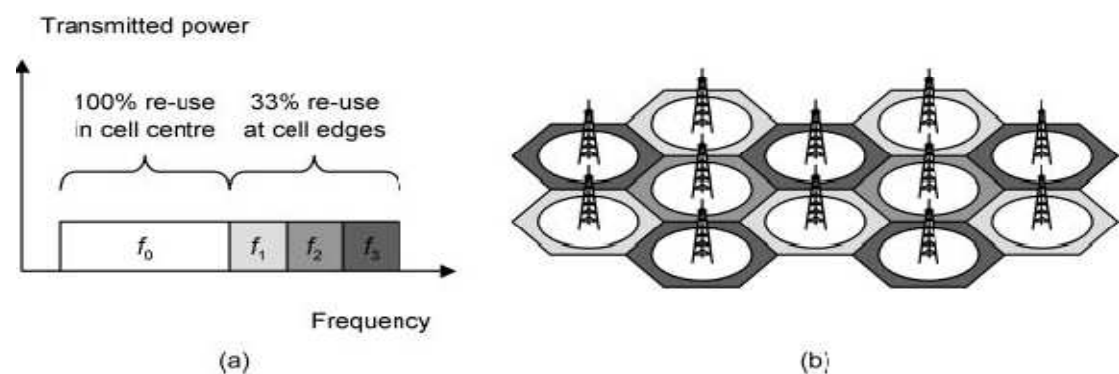
αλλά επηρεάζεται επίσης από τη εξασθένιση που εξαρτάται από τη συχνότητα. Σε απάντηση, ο σταθμός βάσης κατανέμει τις υπο-φέρουσες στις οποίες το κινητό λαμβάνει ένα ισχυρό σήμα, και αλλάζει την κατανομή αυτή καθώς αλλάζει το πρότυπο εξασθένισης. Με έναν παρόμοιο τρόπο, μπορεί να μεταδώσει στο κινητό 4 χρησιμοποιώντας δύο ξεχωριστές ομάδες υπο-φερουσών, οι οποίες διαχωρίζονται από μια εξασθένιση.

Με την κατανομή υπο-φερουσών σε απάντηση των μεταβολών των πρότυπων εξασθένισης, ένας πομπός OFDMA μπορεί να μειώσει σημαντικά την επίδραση εξασθένισης που εξαρτάται από το χρόνο και τη συχνότητα. Η διαδικασία απαιτεί ανάδραση από το κινητό, την οποία θα καλύψουμε ως μέρος του Κεφαλαίου 8.

4.2.2 Κλασματική Επαναχρησιμοποίηση Συχνότητας

Χρησιμοποιώντας τις τεχνικές που περιγράφονται παραπάνω, ένας σταθμός βάσης μπορεί να στείλει πληροφορίες σε ένα μεγάλο αριθμό κινητών. Ωστόσο, ένα σύστημα κινητών επικοινωνιών έχει επίσης ένα μεγάλο αριθμό σταθμών βάσεως, έτσι κάθε κινητό πρέπει να λάβει ένα σήμα από ένα σταθμό βάσης με την παρουσία παρεμβολών από τους άλλους. Χρειαζόμαστε έναν τρόπο για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών, έτσι ώστε το κινητό να μπορεί να λάβει την πληροφορία με επιτυχία.

Τα προηγούμενα συστήματα έχουν χρησιμοποιήσει δύο διαφορετικές τεχνικές. Στο GSM, γειτονικές κυψέλες μεταδίδουν χρησιμοποιώντας διαφορετικές φέρουσες συχνότητες. Συνήθως, κάθε κυψέλη μπορεί να χρησιμοποιήσει το ένα τέταρτο του συνολικού εύρους ζώνης, με έναν *συντελεστή επαναχρησιμοποίησης των 25%*. Αυτή η τεχνική μειώνει την παρεμβολή μεταξύ των γειτονικών κυψελών, αλλά αυτό σημαίνει ότι η ζώνη συχνοτήτων χρησιμοποιείται αναποτελεσματικά. Στο UMTS, κάθε κυψέλη έχει την ίδια φέρουσα συχνότητα, με *συντελεστή επαναχρησιμοποίησης των 100%*. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί τη ζώνη συχνοτήτων πιο αποτελεσματικά από ό,τι πριν, εις βάρος της αύξησης της παρεμβολής στο σύστημα.



Σχήμα 4.6 Παράδειγμα εφαρμογής κλασματικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας, όταν χρησιμοποιείται OFDMA. (a) Χρήση του πεδίου συχνοτήτων. (b) Προκύπτων σχέδιο δικτύου.

Σε ένα δίκτυο LTE, κάθε σταθμός βάσης μπορεί να μεταδίδει στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Ωστόσο, μπορεί να διαθέσει τις υπο-φέρουσες εντός αυτής της ζώνης με ευέλικτο τρόπο, χρησιμοποιώντας μια τεχνική γνωστή ως *κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας* που δίνει το καλύτερο των δύο κόσμων.

Το Σχήμα 4.6 δείχνει ένα απλό παράδειγμα, στο οποίο κάθε σταθμός βάσης ελέγχει μια κυψέλη και κάθε κυψέλη μοιράζεται την ίδια ζώνη συχνοτήτων. Μέσα σε αυτή τη ζώνη, κάθε κυψέλη εκπέμπει σε κοντινά κινητά χρησιμοποιώντας το ίδιο σύνολο υπο-φερουσών, που συμβολίζεται f_0 . Αυτό λειτουργεί καλά, επειδή τα κινητά είναι κοντά στους αντίστοιχους σταθμούς βάσης τους, έτσι τα λαμβανόμενα σήματα είναι αρκετά ισχυρά ώστε να καταπνίξουν την οποιαδήποτε παρεμβολή. Απομακρυσμένα κινητά λαμβάνουν πολύ ασθενέστερα σήματα, τα οποία μπορούν εύκολα να καταστραφούν από παρεμβολές. Για να αποφευχθεί αυτό, γειτονικές κυψέλες μπορούν να μεταδώσουν σε αυτά τα κινητά χρησιμοποιώντας διαφορετικά σύνολα υπο-φερουσών. Στο παράδειγμα που φαίνεται, η μισή ζώνη συχνοτήτων προορίζεται για κοντινά κινητά, ενώ η υπόλοιπη χωρίζεται σε τρία σύνολα, που συμβολίζονται f_1 , f_2 και f_3 , για χρήση από απομακρυσμένα κινητά. Ο προκύπτων συντελεστής επαναχρησιμοποίησης είναι 67%.

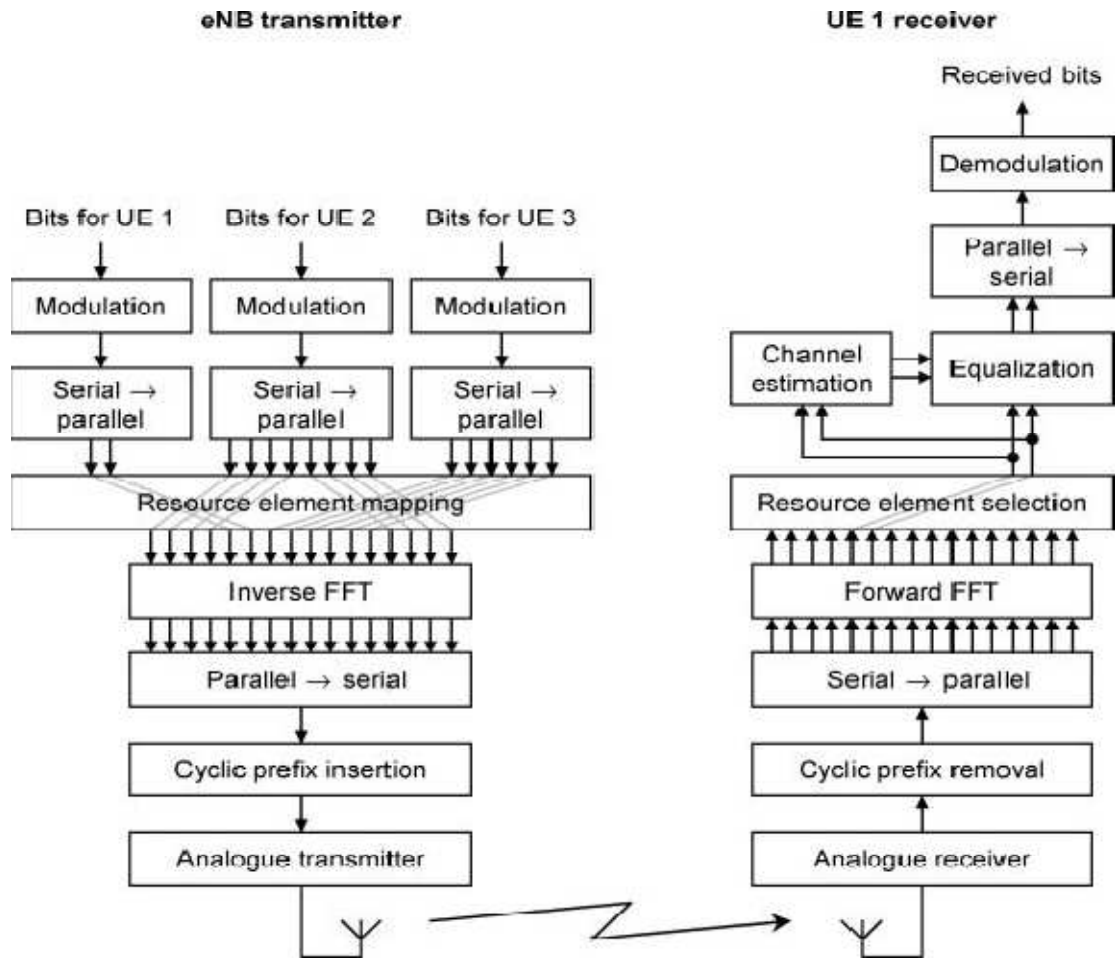
Πιο ευέλικτες εφαρμογές είναι πιθανές: για παράδειγμα, μια κυψέλη θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει ένα σύνολο υπο-φερουσών για απομακρυσμένα κινητά, ενώ οι γείτονές της, χρησιμοποιούν το ίδιο σύνολο για κοντινά κινητά. Για να υποστηρίξουν αυτήν την ευελιξία, οι σταθμοί βάσης μπορούν να ανταλλάσσουν μηνύματα σηματοδότησης σε ολόκληρη τη διεπαφή X2, στην οποία λένε ο ένας στον άλλο για το πώς χρησιμοποιούν τη ζώνη συχνοτήτων. Θα συζητήσουμε περαιτέρω αυτά τα μηνύματα στο Κεφάλαιο 19.

4.2.3 Εκτίμηση Καναλιού

Το Σχήμα 4.7 είναι ένα λεπτομερές λογικό διάγραμμα του OFDMA. Είναι αρκετά όμοιο με το λογικό διάγραμμα που παρουσιάσαμε νωρίτερα, αλλά με δύο επιπλέον διαδικασίες. Πρώτον, ο δέκτης περιέχει τα επιπλέον βήματα εκτίμησης καναλιού και εξισορρόπησης. Δεύτερον, ο πομπός εισάγει ένα κυκλικό πρόθεμα μέσα στο ρεύμα δεδομένων, το οποίο στη συνέχεια απομακρύνεται στο δέκτη.

Πρώτη εξετάζουμε την εκτίμηση καναλιού. Όπως σημειώσαμε στο Κεφάλαιο 3, κάθε υπο-φέρουσα μπορεί να φτάσει το δέκτη με ένα εντελώς αυθαίρετο πλάτος και φάση. Για την αντιμετώπιση αυτού, ο πομπός OFDMA εμβάλλει σύμβολα αναφοράς στο εκπεμπόμενο ρεύμα δεδομένων. Ο δέκτης μετρά τα εισερχόμενα σύμβολα αναφοράς, τα συγκρίνει με αυτά που μεταδίδονται, και χρησιμοποιεί το αποτέλεσμα για να απομακρύνει τις αλλαγές στο πλάτος και τις μετατοπίσεις της φάσης από το εισερχόμενο σήμα.

Με την παρουσία της εξαρτώμενης από τη συχνότητα εξασθένισης, οι αλλαγές του πλάτους και οι μετατοπίσεις της φάσης, είναι συναρτήσεις της συχνότητας καθώς και του χρόνου και επηρεάζουν τις διαφορετικές υπο-φέρουσες με διαφορετικούς τρόπους. Για να διασφαλιστεί ότι ο δέκτης μπορεί να μετρήσει όλες τις



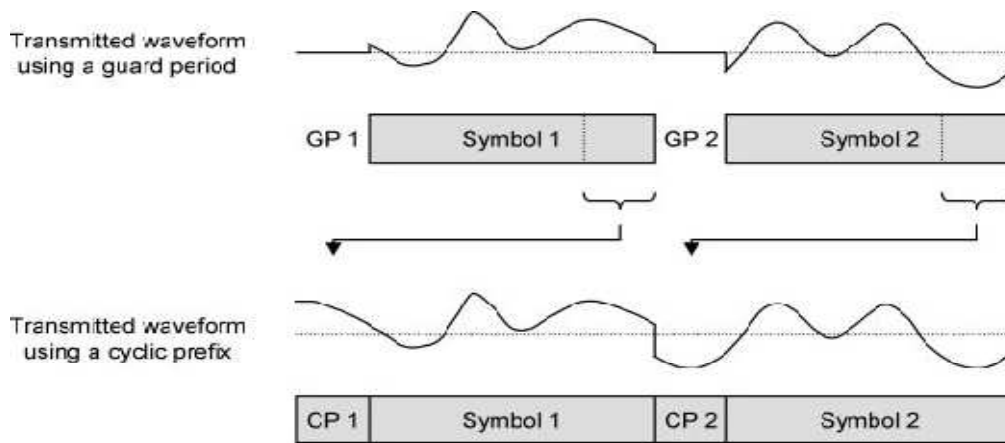
Σχήμα 4.7 Πλήρες λογικό διάγραμμα ενός πομπού και δέκτη OFDMA.

πληροφορίες που χρειάζεται, τα σύμβολα αναφοράς LTE είναι διάσπαρτα σε όλα τα πεδία χρόνου και συχνότητας, με τον τρόπο που θα περιγραφούν στο Κεφάλαιο 7. Τα σύμβολα αναφοράς καταλαμβάνουν περίπου το 10% του μεταδιδόμενου ρεύματος δεδομένων, έτσι δεν προκαλούν ένα σημαντικό έξοδο.

4.2.4 Εισαγωγή Κυκλικού Προθέματος

Νωρίτερα, είδαμε πώς το OFDMA μειώνει την ποσότητα των διασυμβολικών παρεμβολών μεταδίδοντας τα δεδομένα σε πολλαπλές υπο-φέρουσες. Μια τελική τεχνική μας επιτρέπει να απαλλαγούμε εντελώς από το ISI.

Η βασική ιδέα είναι να τοποθετήσετε μια *περίοδο φύλαξης* (GP) πριν από κάθε σύμβολο, στο οποίο τίποτα δε μεταδίδεται. Εάν η GP είναι μεγαλύτερη από την καθυστέρηση διάδοσης, τότε ο δέκτης μπορεί να είναι βέβαιος για την ανάγνωση των πληροφοριών από ένα μόνο σύμβολο σε μια στιγμή, χωρίς τυχόν επικάλυψη με τα σύμβολα που προηγούνται ή ακολουθούν. Φυσικά το σύμβολο φθάνει το δέκτη σε διαφορετικές χρονικές στιγμές με διαφορετικές ακτίνες και κάποια επιπλέον επεξεργασία είναι απαραίτητη για να βάλει τάξη στη σύγχυση. Η επιπλέον

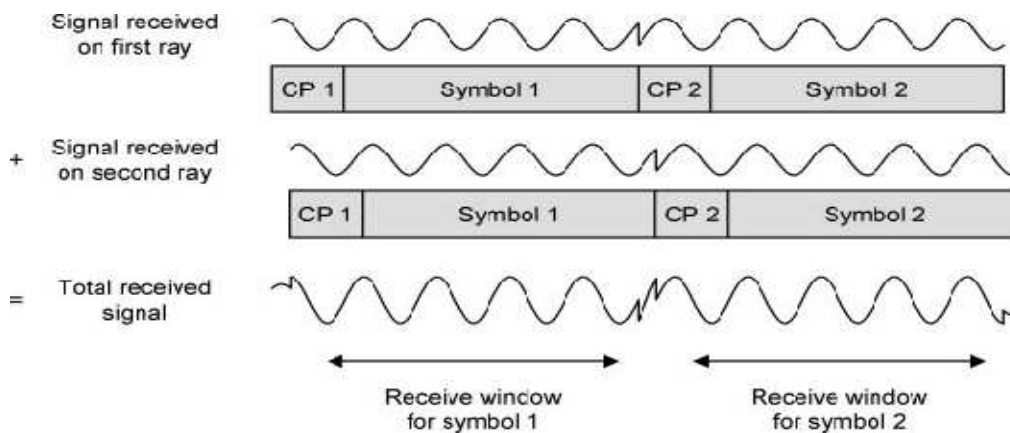


Σχήμα 4.8 Λειτουργία εισαγωγής CP.

επεξεργασία είναι σχετικά απλή, ωστόσο.

Το LTE χρησιμοποιεί μια ελαφρώς πιο πολύπλοκη τεχνική, γνωστή ως εισαγωγή κυκλικού προθέματος (CP) (Σχήμα 4.8). Εδώ, ο πομπός ξεκινάει εισάγοντας μια GP πριν από κάθε σύμβολο, όπως και πριν. Ωστόσο, στη συνέχεια αντιγράφει δεδομένα από το τέλος του επόμενου συμβόλου, έτσι ώστε να γεμίσει μέχρι την GP. Εάν το CP είναι μακρύτερο από την καθυστέρηση διάδοσης, τότε ο δέκτης μπορεί ακόμη να είναι βέβαιος για την ανάγνωση των πληροφοριών από ένα μόνο σύμβολο σε μια στιγμή.

Μπορούμε να δούμε πώς λειτουργεί η εισαγωγή CP, εξετάζοντας μια υπο-φέρουσα (Σχήμα 4.9). Το μεταδιδόμενο σήμα είναι ένα ημιτονοειδές κύμα, του οποίου το πλάτος και η φάση αλλάζουν από το ένα σύμβολο στο επόμενο. Όπως επισημάνθηκε προηγουμένως, κάθε σύμβολο περιλαμβάνει έναν ακριβή αριθμό κύκλων ημιτονοειδούς κύματος, έτσι το πλάτος και η φάση κατά την έναρξη του κάθε συμβόλου, ισούται με το πλάτος και τη φάση στο τέλος. Εξαιτίας αυτού, το μεταδιδόμενο σήμα αλλάζει ομαλά καθώς κινούμαστε από κάθε CP στο σύμβολο που ακολουθεί.



Σχήμα 4.9 Λειτουργία CP σε μια ενιαία υπο-φέρουσα.

Σε ένα πολυδιαδρομικό περιβάλλον, ο δέκτης μαζεύει πολλαπλά αντίγραφα του μεταδιδόμενου σήματος με πολλαπλούς χρόνους άφιξης. Αυτά προσθέτονται μαζί στην κεραία λήψης, δίνοντας ένα ημιτονοειδές κύμα με την ίδια συχνότητα αλλά με ένα διαφορετικό πλάτος και φάση. Το λαμβανόμενο σήμα εξακολουθεί να αλλάζει ομαλά κατά την μετάβαση από ένα CP προς το σύμβολο που ακολουθεί. Υπάρχουν μερικές δυσλειτουργίες, αλλά αυτές είναι μόνο στην αρχή του CP και στο τέλος του συμβόλου, όπου τα προηγούμενα και τα επόμενα σύμβολα αρχίζουν να παρεμβαίνουν.

Ο δέκτης επεξεργάζεται το λαμβανόμενο σήμα μέσα σε ένα παράθυρο του οποίου το μήκος ισούται με την διάρκεια συμβόλου, και απορρίπτει τα υπόλοιπα. Εάν το παράθυρο έχει τοποθετηθεί σωστά, τότε το λαμβανόμενο σήμα είναι ακριβώς αυτό που μεταδόθηκε, χωρίς δυσλειτουργίες, και υπόκεινται μόνο σε μια αλλαγή του πλάτους και μια μετατόπιση φάσης. Αλλά ο δέκτης μπορεί να επανορθώσει γι' αυτά, χρησιμοποιώντας την εκτίμηση καναλιού και τις τεχνικές εξισορρόπησης που περιγράφονται παραπάνω. Κατά συνέπεια, μπορεί να χειριστεί το CP, χωρίς καμία επιπλέον επεξεργασία.

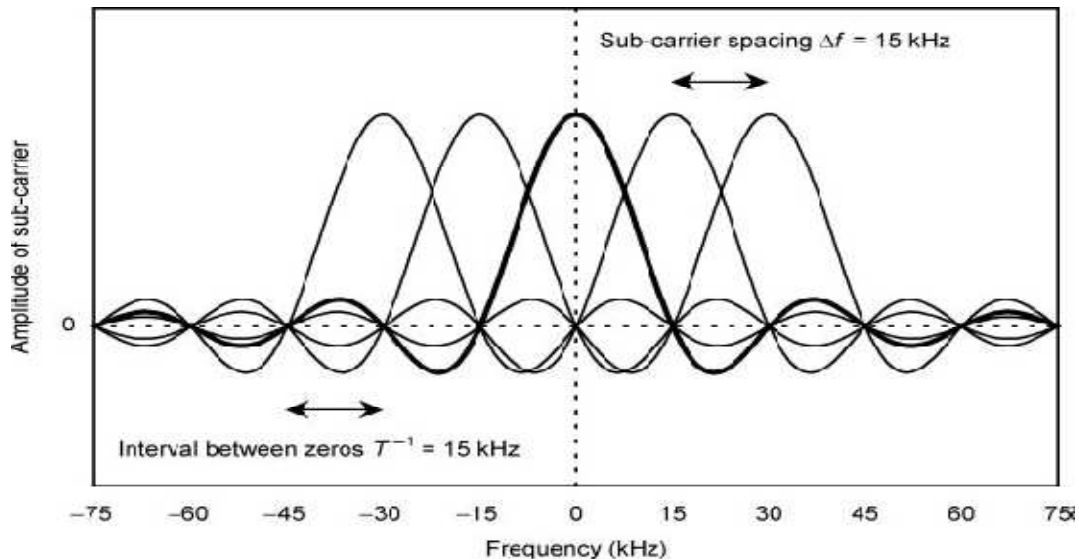
Βεβαίως, το σύστημα χρησιμοποιεί πολλαπλές υπο-φέρουσες, όχι μόνο μία. Ωστόσο, έχουμε ήδη δει ότι οι υπο-φέρουσες δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και μπορούν να αντιμετωπιστούν ανεξάρτητα, έτσι η ύπαρξη πολλαπλών υπο-φερουσών δεν επηρεάζει καθόλου αυτό το επιχείρημα.

Κανονικά, το LTE χρησιμοποιεί ένα CP περίπου 4.7 μ s. Αυτό αντιστοιχεί σε μία μέγιστη διαφορά διάδοσης περίπου 1.4 km μεταξύ των μηκών των μακρύτερων και συντομότερων ακτίνων, η οποία είναι αρκετή για όλες αλλά πολύ μεγαλύτερες και πιο γεμάτες κυψέλες. Το CP μειώνει το ρυθμό δεδομένων κατά περίπου 7%, αλλά αυτή είναι μια μικρή τιμή για να προσφέρει την απομάκρυνση της ISI.

4.2.5 Χρήση του Πεδίου Συχνότητων

Ας δούμε τώρα πιο αναλυτικά τον τρόπο με τον οποίο ένα σύστημα κινητών επικοινωνιών χρησιμοποιεί το πεδίο συχνοτήτων. Στον παραδοσιακό αναλογικό FDMA, ένα κινητό πρέπει να μετρήσει το σήμα σε μια υπο-φέρουσα με την παρουσία των παρεμβολών από όλες τις άλλες. Για να ελαχιστοποιηθεί η ποσότητα της παρεμβολής, οι υπο-φέρουσες πρέπει να διαχωριστούν από ευρείες ζώνες φύλαξης. Η ανάγκη για αυτές τις ζώνες φύλαξης συνεπάγεται ότι το σύστημα χρησιμοποιεί το πεδίο συχνοτήτων με έναν αναποτελεσματικό τρόπο.

Τώρα να εξετάσουμε την κατάσταση με την OFDMA. Στο πεδίο του χρόνου, κάθε υπο-φέρουσα ξεκινά τη ζωή ως ένα ημιτονοειδές κύμα, αλλά η διαδικασία διαμόρφωσης κάνει το πλάτος και τη φάση της να αλλάζουν κατά διαστήματα της διάρκειας συμβόλου T , η οποία ισούται με 66.7 μ s. Αυτό διευρύνει το σήμα στο πεδίο συχνοτήτων, σε εύρος ζώνης περίπου T^{-1} . Το Σχήμα 4.10 δείχνει τις λεπτομέρειες. Στο πεδίο συχνοτήτων, το πλάτος της κάθε υπο-φερουσας ταλαντεύεται σε κάθε πλευρά του μηδενός και διασχίζει το μηδέν σε τακτά χρονικά διαστήματα του T^{-1} . (Οι μαθηματικοί θα αναγνωρίσουν αυτή την απάντηση ως μια συνάρτηση sinc ($x^{-1} \sin$



Σχήμα 4.10 Πλάτη των μεταδιδόμενων σημάτων σε γειτονικές υπο-φέρουσες, ως συνάρτηση της συχνότητας.

χ)).

Τώρα, το διάστημα μεταξύ γειτονικών υπο-φερουσών είναι η απόσταση υπο-φέρουσας Δf . Αν $\Delta f = T^{-1}$, τότε οι υπο-φέρουσες επικαλύπτονται στο πεδίο συχνοτήτων, αλλά η μέγιστη απόκριση μιας υπο-φέρουσας συμπίπτει με τα μηδενικά όλων των άλλων. Σαν αποτέλεσμα, το κινητό μπορεί να δοκιμάσει μια υπο-φέρουσα και μπορεί να μετρήσει το πλάτος και τη φάση του χωρίς καμία παρέμβαση από τις άλλες, παρά το γεγονός ότι είναι στενά συνδεδεμένες μαζί. Οι υπο-φέρουσες με αυτή την ιδιότητα λέγονται *ορθογώνιες*.

Η ιδιότητα αυτή σημαίνει ότι η OFDMA χρησιμοποιεί το πεδίο συχνοτήτων με έναν πολύ αποτελεσματικό τρόπο και είναι ένας από τους λόγους γιατί η φασματική απόδοση του LTE είναι τόσο πολύ καλύτερη από εκείνη των προηγούμενων συστημάτων κινητών τηλεπικοινωνιών. Δικαιολογεί επίσης την απόφαση που ελήφθη στην Ενότητα 4.1.2, όταν θέσαμε τη διάρκεια συμβόλου T , ίση με το αντίστροφο της απόστασης υπο-φέρουσας Δf .

4.2.6 Επιλογή Απόστασης Υπο-φέρουσας

Το επιχείρημα της προηγούμενης ενότητας δουλεύει μια χαρά αν το κινητό είναι σταματημένο. Εάν το κινητό κινείται, τότε οποιεσδήποτε εισερχόμενες ακτινοβολίες είναι μετατοπισμένες σε υψηλότερες ή χαμηλότερες συχνότητες Doppler. Το ίδιο ισχύει για καθεμιά από τις υπο-φέρουσες OFDMA.

Σε ένα πολυδιαδρομικό περιβάλλον, ένα κινητό μπορεί να κινείται προς την κατεύθυνση κάποιων ακτίνων, οι οποίες μετατοπίζονται σε υψηλότερες συχνότητες, αλλά μακριά από τις άλλες, των οποίων οι συχνότητες κινούνται χαμηλότερα. Σαν αποτέλεσμα, οι υπο-φέρουσες δεν είναι απλά μετατοπισμένες: αντ' αυτού, είναι θολές

σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Εάν ένα κινητό προσπαθεί να μετρήσει τη μέγιστη απόκριση μιας υπο-φέρουσας, τότε θα λαμβάνει πλέον παρέμβαση από όλες τις άλλες. Έχουμε συνεπώς χάσει την ιδιότητα ορθογωνικότητας από την προηγούμενη ενότητα.

Η ποσότητα της παρεμβολής θα εξακολουθεί να είναι αποδεκτή, ωστόσο, εάν η μετατόπιση Doppler είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση υπο-φέρουσας. Ως εκ τούτου, χρειάζεται να επιλέξουμε την απόσταση υπο-φέρουσας Δf , ως ακολούθως:

$$\Delta f \gg f_D \quad (4.1)$$

όπου f_D είναι η μετατόπιση Doppler από την Εξίσωση (3.4). Το LTE είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί με μια μέγιστη ταχύτητα κινητού 350 km hr^{-1} και μέγιστη φέρουσα συχνότητα περίπου 3.5 GHz , που δίνει μια μέγιστη μετατόπιση Doppler περίπου 1.1 kHz . Αυτό είναι το 7% της απόστασης υπο-φέρουσας, έτσι ώστε να ικανοποιεί τον παραπάνω περιορισμό.

Υπάρχει άλλο ένα εμπόδιο για τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται από το LTE. Για να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις της ISI, χρειάζεται να επιλέξουμε τη διάρκεια συμβόλου T ως ακολούθως:

$$T \gg \tau \quad (4.2)$$

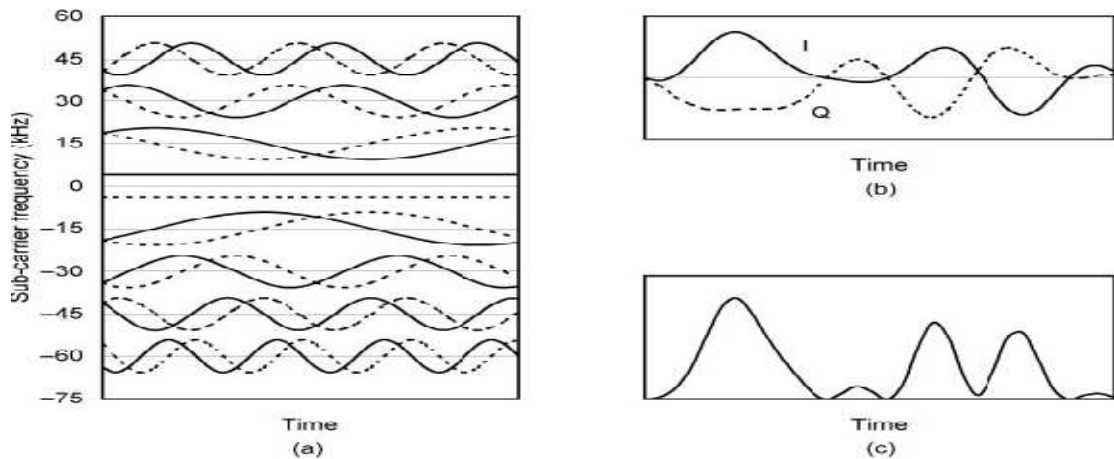
όπου τ είναι η καθυστέρηση διάδοσης από την Εξίσωση (3.6). Όπως σημειώσαμε νωρίτερα, το LTE λειτουργεί κανονικά με μέγιστη καθυστέρηση διάδοσης περίπου $4.7 \mu\text{s}$. Αυτό είναι το 7% των $66.7 \mu\text{s}$ της διάρκειας συμβόλου, έτσι ικανοποιεί αυτό το δεύτερο εμπόδιο.

Μπορούμε να συνάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα. Εάν η απόσταση υπο-φέρουσας ήταν πολύ μικρότερη από 15 kHz , τότε το σύστημα θα είναι επιρρεπές σε παρεμβολές μεταξύ των υπο-φερουσών σε υψηλές ταχύτητες κινητού. Εάν ήταν πολύ μεγαλύτερη, τότε το σύστημα θα ήταν επιρρεπές σε διασυμβολικές παρεμβολές σε μεγάλες, γεμάτες κυψέλες. Η επιλεγμένη απόσταση υπο-φέρουσας είναι το αποτέλεσμα ενός συμβιβασμού μεταξύ των δύο αυτών άκρων.

4.3 Ενιαία Φέρουσα Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης Συχνότητας

4.3.1 Διακυμάνσεις Ισχύος από το OFDMA

Το OFDMA λειτουργεί καλά για το LTE κάτω ζεύξης. Ωστόσο, έχει ένα μειονέκτημα: η ισχύς του μεταδιδόμενου σήματος υπόκειται σε αρκετά μεγάλες διακυμάνσεις. Για να φανεί αυτό, το Σχήμα 4.11(a) δείχνει ένα σύνολο υπο-φερουσών που έχουν διαμορφωθεί χρησιμοποιώντας QPSK, και ως εκ τούτου έχουν σταθερή ισχύ. Το πλάτος του προκύπτοντος σήματος (Σχήμα 4.11(b)) ποικίλλει ευρέως, με μέγιστα, όπου οι κορυφές των υπο-φερουσών συμπίπτουν και μηδενικά, όπου αποκλίνουν. Με τη σειρά τους, αυτές οι διακυμάνσεις αντανακλώνται στην ισχύ του εκπεμπόμενου σήματος (Σχήμα 4.11(c)).



Σχήμα 4.11 Παράδειγμα κυματομορφής OFDMA. (α) Πλάτη των επιμέρους υπο-φερουσών. (β) Πλάτος της προκύπτουσας κυματομορφής OFDMA. (γ) Ισχύς της κυματομορφής OFDMA

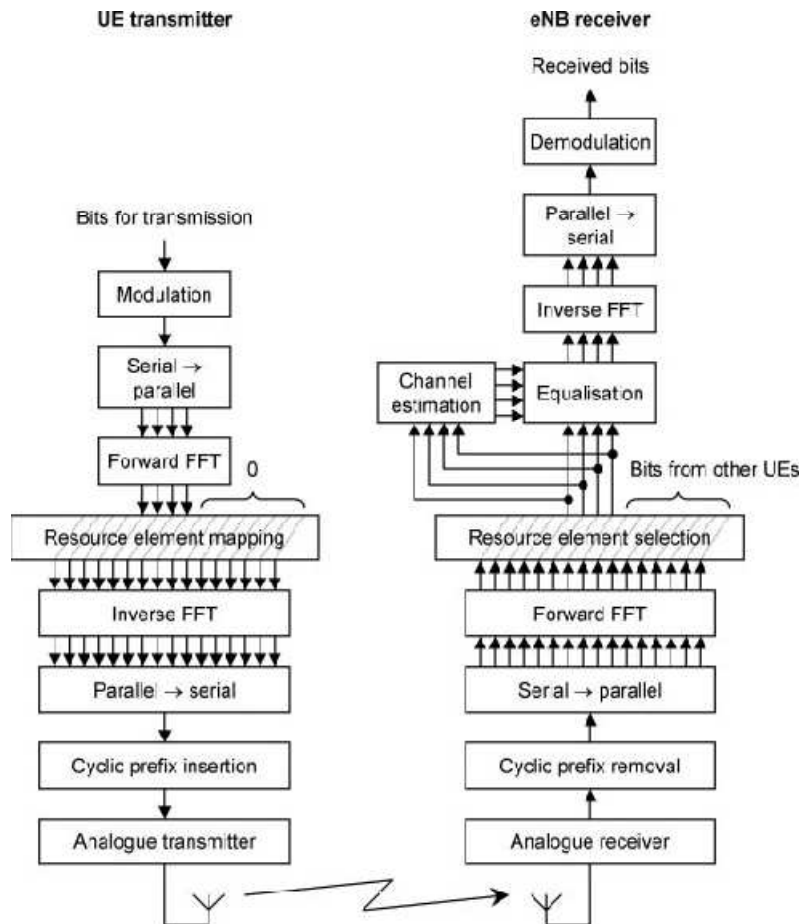
Αυτές οι διακυμάνσεις ισχύος μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στον ενισχυτή ισχύος του πομπού. Αν ο ενισχυτής είναι γραμμικός τότε η ισχύς εξόδου είναι ανάλογη με της εισόδου, έτσι η κυματομορφή έχει ακριβώς το σχήμα που χρειαζόμαστε. Εάν ο ενισχυτής είναι μη γραμμικός, τότε η ισχύς εξόδου δεν είναι πλέον ανάλογη με της εισόδου, έτσι η κυματομορφή εξόδου είναι παραμορφωμένη. Οποιαδήποτε παραμόρφωση της κυματομορφής στο πεδίο του χρόνου θα στρεβλώσει την ισχύ του φάσματος στον τομέα συχνοτήτων, έτσι το σήμα θα διαρρεύσει μέσω γειτονικών ζωνών συχνοτήτων και θα προκαλέσει παρεμβολές σε άλλους δέκτες.

Στην κάτω ζεύξη, οι πομποί σταθμού βάσης είναι μεγάλες, ακριβές συσκευές, έτσι μπορούν να αποφεύγουν το πρόβλημα, χρησιμοποιώντας ακριβούς ενισχυτές ισχύος που είναι πολύ όμοιοι με τους γραμμικούς. Στην άνω ζεύξη, ένας κινητός πομπός πρέπει να είναι φθηνός, έτσι δεν έχει αυτή την επιλογή. Αυτό καθιστά την OFDMA ακατάλληλη για το LTE άνω ζεύξης.

4.3.2 Λογικό Διάγραμμα της SC-FDMA

Οι διακυμάνσεις ισχύος που περιγράφονται παραπάνω προκύπτουν επειδή υπάρχει μια αντιστοιχία ένα προς ένα μεταξύ συμβόλων και υπο-φερουσών. Αν αναμιγνύαμε τα σύμβολα μαζί πριν τα διαθέσουμε στις υπο-φέρουσες, τότε μπορεί να είμαστε σε θέση να προσαρμόσουμε το εκπεμπόμενο σήμα και να μειώσουμε τις διακυμάνσεις του. Για παράδειγμα, κατά τη μετάδοση δύο συμβόλων x_1 και x_2 σε δύο υπο-φέρουσες θα μπορούσαμε να στείλουμε το άθροισμά τους $x_1 + x_2$ σε μια υπο-φέρουσα, και τη διαφορά τους $x_1 - x_2$ στην άλλη. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε οποιαδήποτε λειτουργία ανάμιξης σε όλα, καθώς ο δέκτης μπορεί να την αντιστρέψει: εμείς απλά χρειαζόμαστε να βρούμε αυτό που ελαχιστοποιεί τις διακυμάνσεις ρεύματος στο εκπεμπόμενο σήμα.

Αποδεικνύεται ότι μια κατάλληλη λειτουργία ανάμιξης είναι ένα άλλο FFT,



Σχήμα 4.12 Λογικό διάγραμμα ενός πομπού και δέκτη SC-FDMA.

αυτή τη φορά ένα εμπρόσθιο FFT. Ενσωματώνοντας αυτή τη λειτουργία, καταλήγουμε σε μια τεχνική, γνωστή ως *SC-FDMA*, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 4.12.

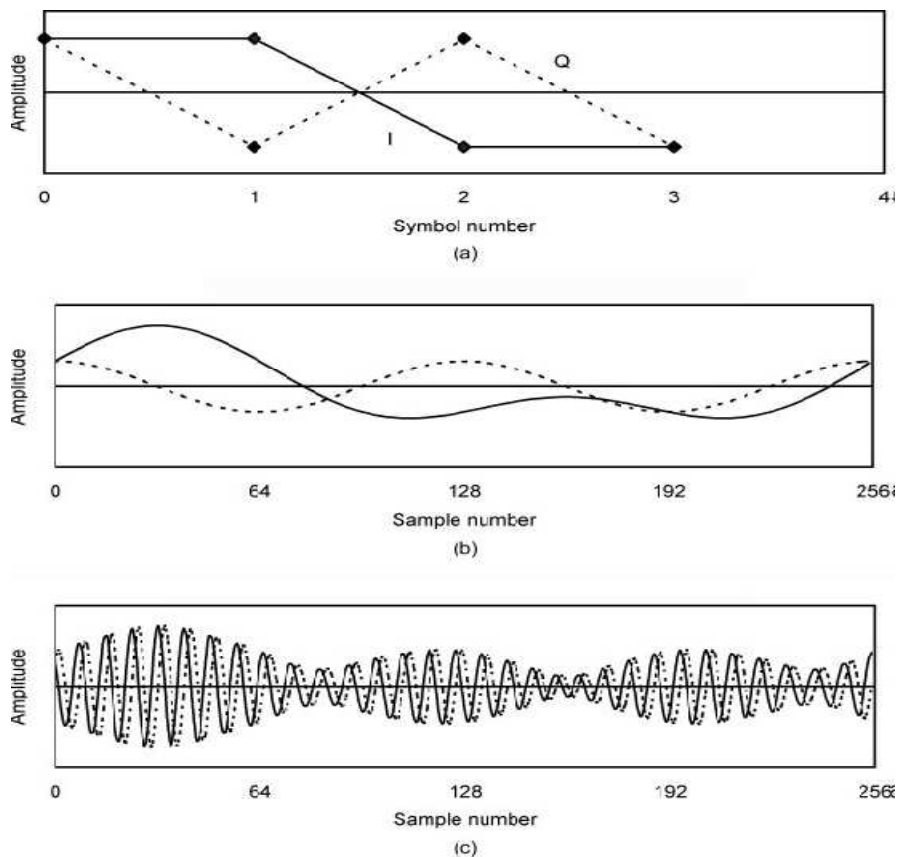
Σε αυτό το διάγραμμα, υπάρχουν τρεις διαφορές από την OFDMA. Η κύρια διαφορά είναι ότι ο πομπός SC-FDMA περιλαμβάνει έναν επιπλέον εμπρόσθιο FFT, μεταξύ των βημάτων μετατροπής σειριακής σε παράλληλη και αντιστοίχισης στοιχείου πόρου. Αυτό αναμιγνύει τα σύμβολα μαζί, με τον τρόπο που απαιτείται για την ελαχιστοποίηση των διακυμάνσεων ισχύος και αναστρέφεται από ένα αντίστροφο FFT, στον δέκτη.

Η δεύτερη διαφορά προκύπτει επειδή η τεχνική χρησιμοποιείται στην άνω ζεύξη. Εξαιτίας αυτού, ο κινητός πομπός χρησιμοποιεί μόνο κάποιες από τις υπο-φέρουσες: οι άλλες είναι στο μηδέν, και είναι διαθέσιμες για τα άλλα κινητά της κυψέλης. Τέλος, κάθε κινητό μεταδίδει χρησιμοποιώντας μια ενιαία, συνεχόμενη ομάδα υπο-φερουσών, χωρίς εσωτερικά κενά. Αυτό υποδηλώνεται από την ονομασία SC-FDMA και είναι απαραίτητο για να κρατήσει τις διακυμάνσεις ισχύος στο χαμηλότερο δυνατό επίπεδο.

Μπορούμε να καταλάβουμε πώς λειτουργεί το SC-FDMA κοιτάζοντας τα τρία βασικά στάδια μετάδοσης: τον εμπρόσθιο FFT, το πρόγραμμα αντιστοίχισης

στοιχείων πόρου και τον αντίστροφο FFT. Η εισαγωγή στον εμπρόσθιο FFT είναι μια ακολουθία συμβόλων στο πεδίο του χρόνου. Ο εμπρόσθιος FFT μετατρέπει αυτά τα σύμβολα στο πεδίο συχνοτήτων, το πρόγραμμα αντιστοίχισης στοιχείων πόρου τα μετατοπίζει στην επιθυμητή κεντρική συχνότητα και ο αντίστροφος FFT τα μετατρέπει πάλι στο πεδίο του χρόνου. Κοιτάζοντας αυτά τα στάδια σαν ένα σύνολο, μπορούμε να δούμε ότι το εκπεμπόμενο σήμα θα πρέπει να είναι σχεδόν το ίδιο όπως η αρχική διαμορφωμένη κυματομορφή, εκτός από μια μετατόπιση προς μια άλλη κεντρική συχνότητα. Αλλά η ισχύς ενός σήματος QPSK είναι σταθερή (τουλάχιστον στην απουσία επιπλέον φιλτραρίσματος), και δεν διαφέρει σχεδόν καθόλου από τις περιπτώσεις των 16-QAM και 64-QAM. Έχουμε επιτύχει ως εκ τούτου, το αποτέλεσμα που χρειαζόμαστε, μεταδίδοντας ένα σήμα με μια περίπου σταθερή ισχύ.

Το Σχήμα 4.13 δείχνει τις προκύπτουσες κυματομορφές, από ένα παράδειγμα στο οποίο το κινητό χρησιμοποιεί τέσσερις υπο-φέρουσες από ένα σύνολο των 256. Η είσοδος (Σχήμα 4.13(a)) είναι μια ακολουθία τεσσάρων συμβόλων QPSK, με [I, Q] τιμές των [1, 1], [1, -1], [-1, 1] και [-1, -1]. Αν τα δεδομένα μεταδίδονται στις κεντρικές τέσσερις υπο-φέρουσες, τότε το αποτέλεσμα (Σχήμα 4.13(b)) μοιάζει πολύ σαν την αρχική κυματομορφή QPSK. Η μόνη διαφορά είναι μια ομαλή παρεμβολή μεταξύ των 256 δειγμάτων στο πεδίο του χρόνου, η οποία περιτυλίγει γύρω από τα



Σχήμα 4.13 Παράδειγμα κυματομορφής SC-FDMA. (a) Μεταδιδόμενα σύμβολα. (b) Προκύπτουσα κυματομορφή SC-FDMA, αν τα δεδομένα μεταδίδονται στις κεντρικές 4 υπο-φέρουσες από τις 256. (c) Κυματομορφή SC-FDMA, αν τα δεδομένα μετατοπίζονται από 32 υπο-φέρουσες.

άκρα της αλληλουχίας δεδομένων, λόγω της κυκλικής φύσεως του FFT. Αν μετατοπίσουμε αντίθετα τα δεδομένα από 32 υπο-φέρουσες, τότε η μόνη αλλαγή (Σχήμα 4.13(c)) είναι η εισαγωγή κάποιας επιπλέον περιστροφής φάσης μέσα στην προκύπτουσα κυματομορφή.

Δε χρησιμοποιούμε SC-FDMA στην κάτω ζεύξη, επειδή ο σταθμός βάσης έχει να μεταδώσει σε πολλά κινητά και όχι μόνο σε ένα. Θα μπορούσαμε να προσθέσουμε έναν εμπρόσθιο FFT ανά κινητό στο Σχήμα 4.7, αλλά εκείνο θα κατέστρεφε την ενιαία φέρουσα ιδιότητα της μετάδοσης, και θα επέτρεπε στις υψηλές διακυμάνσεις ισχύος να επιστρέψουν. Εναλλακτικά, θα μπορούσαμε να προσθέσουμε έναν ενιαίο εμπρόσθιο FFT στο σύνολο της ζώνης κάτω ζεύξης. Δυστυχώς, αυτό θα διέδιδε τα δεδομένα κάθε κινητού σε όλη την περιοχή συχνοτήτων, και θα αφαιρούσε την ικανότητά μας να πραγματοποιούμε χρονοδιάγραμμα που εξαρτάται από τη συχνότητα. Είτε έτσι είτε αλλιώς, το SC-FDMA είναι ακατάλληλο για το LTE κάτω ζεύξης.

Αναφορές

1. Smith, S. W. (1998) *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, California Technical Publishing.
2. Lyons, R. G. (2010) *Understanding Digital Signal Processing*, 3rd edn, Prentice Hall.

5

Τεχνικές Πολλαπλών Κεραιών

Από την αρχή, το LTE σχεδιάστηκε έτσι ώστε ο σταθμός βάσης και το κινητό να μπορούν και τα δύο να χρησιμοποιούν πολλαπλές κεραιές για ασύρματη μετάδοση και λήψη. Αυτό το κεφάλαιο καλύπτει τις τρεις κύριες τεχνικές πολλαπλών κεραιών, οι οποίες έχουν διαφορετικούς στόχους και οι οποίες εφαρμόζονται με διαφορετικούς τρόπους.

Η πιο γνωστή είναι η επεξεργασία διαφορισμού, η οποία αυξάνει την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος και μειώνει την ποσότητα εξασθένισης με τη χρήση πολλαπλών κεραιών στον πομπό, στο δέκτη ή και στους δύο. Η επεξεργασία διαφορισμού έχει χρησιμοποιηθεί από τις πρώτες ημέρες των κινητών επικοινωνιών, γι' αυτό θα την επανεξετάσουμε μόνο εν συντομία.

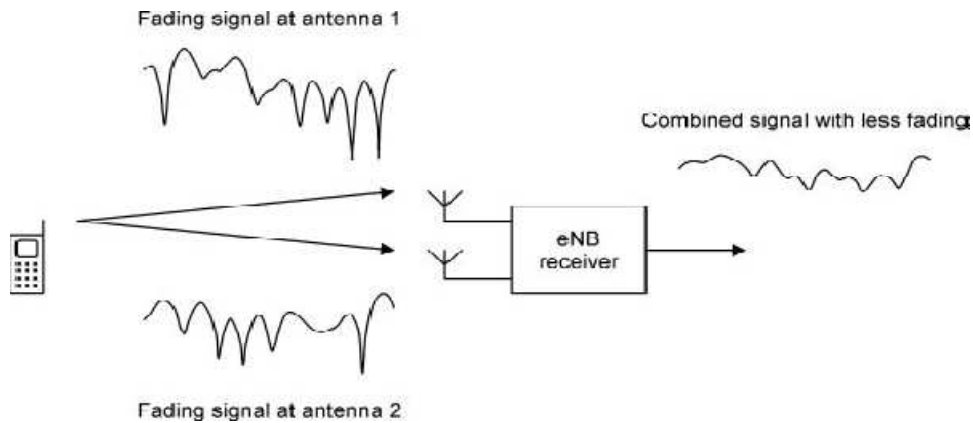
Στη χωρική πολύπλεξη, ο πομπός και ο δέκτης χρησιμοποιούν πολλαπλές κεραιές έτσι ώστε να αυξηθεί ο ρυθμός δεδομένων. Η χωρική πολύπλεξη είναι μια σχετικά νέα τεχνική που μόλις πρόσφατα έχει εισαχθεί σε κινητές επικοινωνίες, γι' αυτό θα την καλύψουμε με περισσότερη λεπτομέρεια από ό,τι τις άλλες. Βασίζεται, επίσης, μάλλον σε μεγάλο βαθμό στα βασικά μαθηματικά, έτσι στη χωρική πολύπλεξη η μεταχείρισή μας, από ανάγκη, θα είναι περισσότερο μαθηματική από ό,τι εκείνη των άλλων θεμάτων σε αυτό το βιβλίο. Τέλος, το beamforming χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές στο σταθμό βάσης προκειμένου να αυξήσει την κάλυψη της κυψέλης.

Η χωρική πολύπλεξη περιγράφεται συχνά ως η χρήση κεραιών *πολλαπλών εισόδων- πολλαπλών εξόδων* (MIMO). Αυτό το όνομα προέρχεται από τις εισόδους και τις εξόδους στη διεπαφή αέρα, έτσι ώστε οι «πολλαπλές εισοδοί» αναφέρονται στον πομπό και οι «πολλαπλές εξοδοί» στο δέκτη. Δυστυχώς, το όνομα είναι λίγο ασαφές, όπως μπορεί να αναφέρεται είτε σε χωρική πολύπλεξη και μόνο, είτε να περιλαμβάνει τη χρήση της εκπομπής και λήψης διαφορισμού. Για το λόγο αυτό, θα χρησιμοποιήσουμε γενικά τον όρο «χωρική πολύπλεξη» αντ' αυτού. Για ορισμένες αξιολογήσεις των τεχνικών πολλαπλών κεραιών και τη χρήση τους στο LTE, βλέπε τις Αναφορές [1-4].

5.1 Επεξεργασία Διαφορισμού

5.1.1 Διαφορική Λήψη

Η διαφορική λήψη χρησιμοποιείται πιο συχνά στην άνω ζεύξη, με τον τρόπο που φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Εδώ, ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί δύο κεραιές για να μαζέψει δύο αντίγραφα του λαμβανόμενου σήματος. Τα σήματα φθάνουν τις κεραιές λήψης με διαφορετικές μετατοπίσεις φάσης, αλλά αυτές μπορούν να αφαιρεθούν από



Σχήμα 5.1 Μείωση εξασθένισης από τη χρήση ενός δέκτη διαφορισμού.

την ειδική για την κεραία, εκτίμηση καναλιού. Ο σταθμός βάσης μπορεί στη συνέχεια να προσθέσει τα σήματα μαζί «σε φάση», χωρίς κανένα κίνδυνο καταστροφικής παρεμβολής ανάμεσά τους.

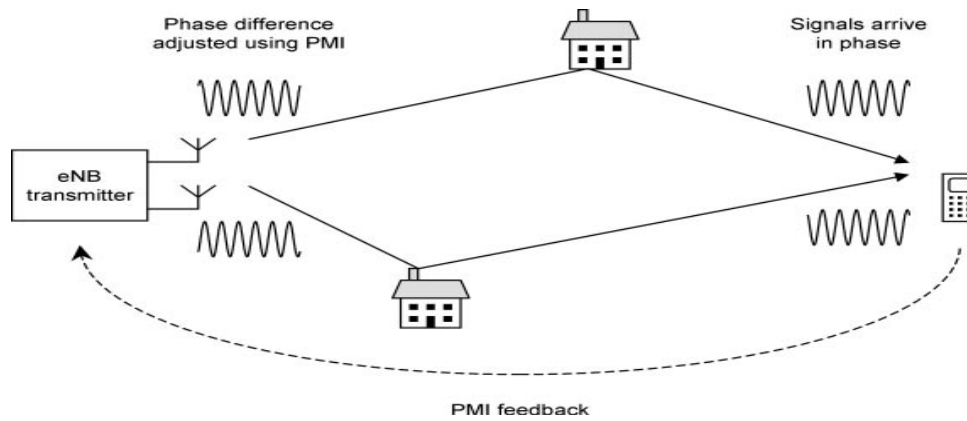
Τα σήματα είναι αμφότερα κατασκευασμένα από αρκετές μικρότερες ακτίνες, έτσι, και τα δύο υποβάλλονται σε εξασθένιση. Αν τα δύο μεμονωμένα σήματα υφίστανται εξασθενίσεις την ίδια στιγμή, τότε η ισχύς του συνδυασμένου σήματος θα είναι χαμηλή. Αλλά αν οι κεραίες είναι αρκετά μακριά (λίγα μήκη κύματος της φέρουσας συχνότητας), τότε οι δύο σειρές των γεωμετριών εξασθένισης θα είναι πολύ διαφορετικές, οπότε τα σήματα θα είναι πολύ πιο πιθανό να υποστούν εξασθενίσεις σε εντελώς διαφορετικούς χρόνους. Έχουμε, συνεπώς, μειώσει την ποσότητα εξασθένισης στο συνδυασμένο σήμα, το οποίο με τη σειρά του μειώνει το ρυθμό σφάλματος.

Οι σταθμοί βάσης έχουν συνήθως περισσότερες από μία κεραία λήψης. Στο LTE, οι προδιαγραφές δοκιμής του κινητού υποθέτουν ότι το κινητό χρησιμοποιεί δύο κεραίες λήψης [5], έτσι τα LTE συστήματα αναμένεται να χρησιμοποιήσουν διαφορική λήψη στην κάτω, καθώς και την άνω ζεύξη. Οι κεραίες ενός κινητού είναι πιο κοντά μεταξύ τους από ό,τι ενός σταθμού βάσης, ο οποίος μειώνει το όφελος της διαφορικής λήψης, αλλά η κατάσταση μπορεί συχνά να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας κεραίες που μετρούν δύο ανεξάρτητες πολώσεις του εισερχόμενου σήματος.

5.1.2 Διαφορική Μετάδοση Κλειστού Βρόχου

Η διαφορική μετάδοση μειώνει το ποσό εξασθένισης χρησιμοποιώντας δύο ή περισσότερες κεραίες στον πομπό. Είναι επιφανειακά παρόμοιο με τη διαφορική λήψη, αλλά με ένα σημαντικό πρόβλημα: τα σήματα προστίθενται μαζί στη μοναδική κεραία λήψης, η οποία ενέχει έναν κίνδυνο καταστροφικής παρεμβολής. Υπάρχουν δύο τρόποι για την επίλυση του προβλήματος, ο πρώτος από τους οποίους είναι η διαφορική μετάδοση κλειστού βρόχου (Σχήμα 5.2).

Εδώ, ο πομπός στέλνει δύο αντίγραφα του σήματος κατά τον αναμενόμενο



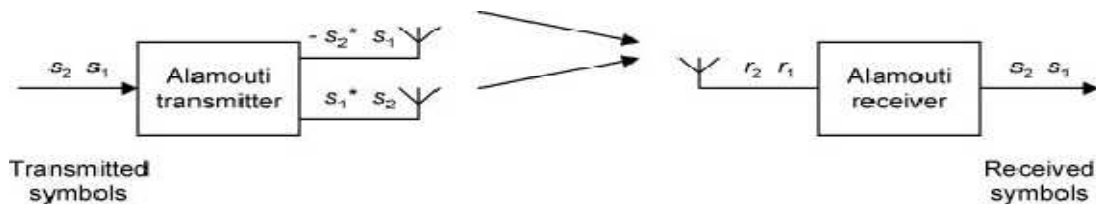
Σχήμα 5.2 Λειτουργία διαφορικής μετάδοσης κλειστού βρόχου.

τρόπο, αλλά εφαρμόζεται επίσης μία μετατόπιση φάσης στο ένα ή και στα δύο σήματα πριν τη μετάδοση. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να εξασφαλισθεί ότι τα δύο σήματα φθάνουν στο δέκτη «σε φάση», χωρίς κανένα κίνδυνο καταστροφικής παρεμβολής. Η μετατόπιση φάσης προσδιορίζεται από ένα δείκτη πίνακα προκωδικοποίησης (PMI), ο οποίος υπολογίζεται από το δέκτη και ανατροφοδοτείται προς τον πομπό. Ένας απλός PMI μπορεί να υποδείξει δύο επιλογές: είτε να μεταδώσει δύο σήματα χωρίς μετατοπίσεις φάσης, είτε να μεταδώσει το δεύτερο με μια μετατόπιση φάσης 180° . Αν η πρώτη επιλογή οδηγήσει σε καταστροφική παρεμβολή, τότε η δεύτερη θα λειτουργήσει αυτόματα. Για άλλη μια φορά, το πλάτος του συνδυασμένου σήματος είναι μόνο χαμηλό στην απίθανη περίπτωση που τα δύο λαμβανόμενα σήματα υφίστανται εξασθενίσεις την ίδια στιγμή.

Οι μετατοπίσεις φάσης που εισήγαγε το ραδιοκανάλι εξαρτώνται από το μήκος κύματος του φέροντος σήματος και ως εκ τούτου, από τη συχνότητά του. Αυτό συνεπάγεται ότι η καλύτερη επιλογή του PMI είναι επίσης μία συνάρτηση της συχνότητας. Ωστόσο, αυτό αντιμετωπίζεται εύκολα σε ένα σύστημα OFDMA, καθώς ο δέκτης μπορεί να ανατροφοδοτεί διαφορετικές τιμές PMI για διαφορετικά σύνολα υπο-φερουσών. Η καλύτερη επιλογή του PMI εξαρτάται επίσης από την θέση του κινητού, έτσι ένα κινητό γρήγορης κίνησης θα έχει PMI που συχνά αλλάζει. Δυστυχώς, ο βρόχος ανάδρασης εισάγει καθυστερήσεις στο σύστημα, οπότε στην περίπτωση των γρήγορων κινητών, το PMI μπορεί να είναι ξεπερασμένο από τη στιγμή που χρησιμοποιείται. Για το λόγο αυτό, η διαφορική μετάδοση κλειστού βρόχου είναι κατάλληλη μόνο για αρκετά αργά κινούμενα κινητά τηλέφωνα. Για γρήγορα κινούμενα κινητά, είναι καλύτερο να χρησιμοποιούν την τεχνική ανοικτού βρόχου που περιγράφεται στην επόμενη ενότητα.

5.1.3 Διαφορική Μετάδοση Ανοικτού Βρόχου

Το Σχήμα 5.3 απεικονίζει μια υλοποίηση διαφορικής μετάδοσης ανοικτού βρόχου που είναι γνωστή ως τεχνική του Alamouti [6]. Εδώ, ο πομπός χρησιμοποιεί δύο κεραίες



Σχήμα 5.3 Λειτουργία της τεχνικής Alamouti για διαφορική μετάδοση ανοικτού βρόχου.

για να στείλει δύο σύμβολα, που συμβολίζονται s_1 και s_2 , σε δύο διαδοχικά στάδια χρόνου. Στο πρώτο στάδιο, ο πομπός στέλνει s_1 από την πρώτη κεραία και s_2 από τη δεύτερη, ενώ στο δεύτερο βήμα, στέλνει $-s_2^*$ από την πρώτη κεραία και s_1^* από τη δεύτερη. (Το σύμβολο * υποδεικνύει ότι ο πομπός θα πρέπει να αλλάξει το πρόσημο της τετραγωνικής συνιστώσας, με μια διαδικασία γνωστή ως σύνθετη σύζευξη).

Ο δέκτης μπορεί τώρα να κάνει δύο διαδοχικές μετρήσεις του λαμβανόμενου σήματος, που αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικούς συνδυασμούς των s_1 και s_2 . Μπορεί στη συνέχεια να λύσει τις προκύπτουσες εξισώσεις, έτσι ώστε να ανακτηθούν τα δύο μεταδιδόμενα σύμβολα. Υπάρχουν μόνο δύο προϋποθέσεις: τα πρότυπα εξασθένισης πρέπει να μείνουν περίπου τα ίδια μεταξύ του πρώτου βήματος χρόνου και του δεύτερου, και τα δύο σήματα δεν πρέπει να υφίστανται εξασθενίσεις την ίδια στιγμή. Και οι δύο απαιτήσεις συνήθως τηρούνται.

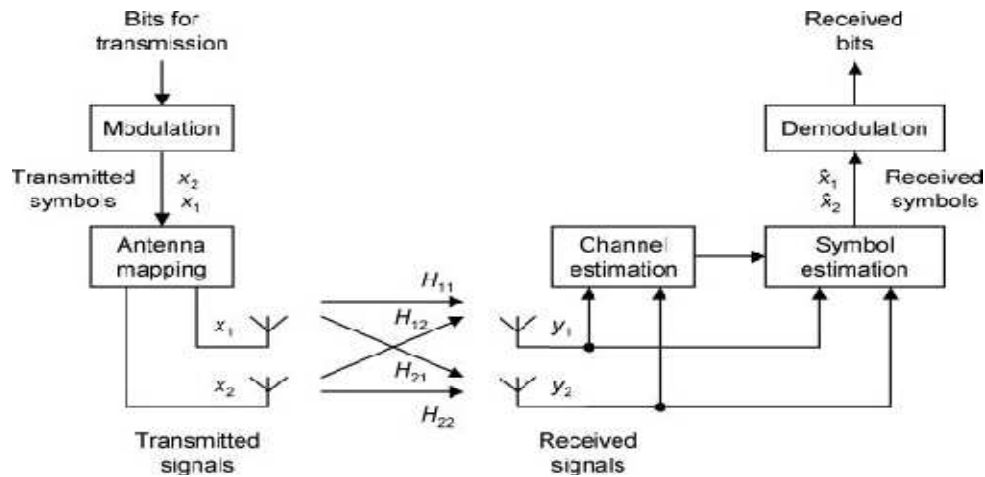
Δεν υπάρχει καμία ισοδύναμη με την τεχνική του Alamouti για συστήματα με περισσότερες από δύο κεραίες. Παρ'όλα αυτά, κάποιο επιπλέον κέρδος διαφορισμού μπορεί ακόμα να επιτευχθεί σε τέσσερα συστήματα κεραίων, από την εναλλαγή μπρος-πίσω ανάμεσα στα δύο ζεύγη στοιχείων κεραίων. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται για τέσσερις κεραίες διαφορισμού ανοικτού βρόχου στο LTE.

Μπορούμε να συνδυάσουμε τη διαφορική μετάδοση ανοικτού και κλειστού βρόχου με την λήψη τεχνικών διαφορισμού από πριν, δίνοντας ένα σύστημα που εκτελεί επεξεργασία διαφορισμού χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραίες τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη. Η τεχνική είναι διαφορετική από τις τεχνικές χωρικής πολύπλεξης που θα περιγράψουμε στη συνέχεια, μολονότι, όπως θα δούμε, ένα σύστημα χωρικής πολύπλεξης μπορεί να υποχωρήσει στη διαφορική μετάδοση και λήψη, εφόσον το επιβάλλουν οι συνθήκες.

5.2 Χωρική Πολύπλεξη

5.2.1 Αρχές Λειτουργίας

Η χωρική πολύπλεξη έχει ένα διαφορετικό σκοπό από την επεξεργασία διαφορισμού. Αν ο πομπός και ο δέκτης έχουν και οι δύο πολλαπλές κεραίες, τότε μπορούμε να δημιουργήσουμε πολλαπλές παράλληλες ροές δεδομένων μεταξύ τους, έτσι ώστε να αυξηθεί ο ρυθμός δεδομένων. Σε ένα σύστημα με κεραίες μετάδοσης N_T και λήψης N_R , συχνά γνωστό ως ένα σύστημα χωρικής πολύπλεξης $N_T \times N_R$, η μέγιστη



Σχήμα 5.4 Βασικές αρχές ενός συστήματος χωρικής πολύπλεξης 2x2.

ταχύτητα δεδομένων είναι ανάλογη της $\min(N_T, N_R)$.

Το Σχήμα 5.4 δείχνει ένα βασικό σύστημα χωρικής πολύπλεξης, στο οποίο ο πομπός και ο δέκτης έχουν αμφότεροι δύο κεραίες. Στον πομπό, το πρόγραμμα αντιστοίχισης κεραιών λαμβάνει σύμβολα από τον διαμορφωτή, δύο κάθε φορά, και στέλνει ένα σύμβολο στην κάθε κεραία. Οι κεραίες μεταδίδουν τα δύο σύμβολα ταυτόχρονα, έτσι ώστε να διπλασιάσουν το μεταδιδόμενο ρυθμό δεδομένων.

Τα σύμβολα ταξιδεύουν προς τις κεραίες λήψης μέσω των τεσσάρων χωριστών ασύρματων διαδρομών, έτσι τα λαμβανόμενα σήματα μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$\begin{aligned} y_1 &= H_{11} x_1 + H_{12} x_2 + n_1 \\ y_2 &= H_{21} x_1 + H_{22} x_2 + n_2 \end{aligned} \quad (5.1)$$

Εδώ, x_1 και x_2 είναι τα σήματα που αποστέλλονται από τις δύο κεραίες μετάδοσης, y_1 και y_2 είναι τα σήματα που φτάνουν στις δύο κεραίες λήψης, και n_1 και n_2 αντιπροσωπεύουν το θόρυβο και τις παρεμβολές που ελήφθησαν. Το H_{ij} εκφράζει τον τρόπο με τον οποίο τα σύμβολα που μεταδίδονται έχουν υποστεί εξασθένηση και μετατόπιση φάσης, καθώς ταξιδεύουν στην κεραία λήψης i από την κεραία μετάδοσης j . (Οι δείκτες i και j μπορεί να φαίνονται ανάποδα, αλλά αυτό γίνεται για λόγους συνέπειας με τη συνήθη μαθηματική σημειογραφία για πίνακες).

Σε γενικές γραμμές, όλοι οι όροι στην παραπάνω εξίσωση είναι πολύπλοκοι. Στα μεταδιδόμενα και λαμβανόμενα σύμβολα x_j και y_i και στους όρους n_i του θορύβου, τα πραγματικά και τα φανταστικά μέρη είναι τα πλάτη των συνιστωσών «σε φάση» και τετραγωνισμού. Ομοίως, σε κάθε ένα από τα στοιχεία καναλιού H_{ij} , το μέγεθος αντιπροσωπεύει την εξασθένηση του ασύρματου σήματος, ενώ η φάση αντιπροσωπεύει την μετατόπιση φάσης. Ωστόσο, η χρήση μιγαδικών αριθμών θα έκανε τα παραδείγματα περίπλοκα χωρίς λόγο, χωρίς την προσθήκη πολλών επιπλέον πληροφοριών, γι' αυτό θα απλοποιήσουμε τα παραδείγματα χρησιμοποιώντας πραγματικούς αριθμούς και μόνο. Για να γίνει αυτό, θα υποθέσουμε ότι ο πομπός διαμορφώνει τα bits χρησιμοποιώντας BPSK, έτσι οι «σε φάση» συνιστώσες είναι +1

και -1, και οι συνιστώσες τετραγωνισμού είναι μηδέν. Επίσης, θα υποθέσουμε ότι το ασύρματο κανάλι μπορεί να αμβλύνει ή να αντιστρέψει το σήμα, αλλά δεν εισάγει οποιεσδήποτε άλλες αλλαγές φάσης.

Σύμφωνα με αυτές τις υποθέσεις, ας εξετάσουμε το ακόλουθο παράδειγμα:

$$\begin{aligned} H_{11} &= 0.8 & H_{12} &= 0.6 & x_1 &= +1 & n_1 &= +0.02 \\ H_{21} &= 0.2 & H_{22} &= 0.4 & x_2 &= -1 & n_2 &= -0.02 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Αντικαθιστώντας αυτούς τους αριθμούς στην Εξίσωση (5.1), φαίνεται ότι τα λαμβανόμενα σήματα έχουν ως εξής:

$$\begin{aligned} y_1 &= +0.22 \\ y_2 &= -0.22 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Ο πρώτος στόχος του δέκτη είναι η εκτίμηση των τεσσάρων στοιχείων του καναλιού H_{ij} . Για να γίνει αυτό, ο πομπός μεταδίδει σύμβολα αναφοράς που ακολουθούν τη βασική τεχνική που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3, αλλά με ένα επιπλέον χαρακτηριστικό: όταν μία κεραία μεταδίδει ένα σύμβολο αναφοράς, η άλλη κεραία σταματάει να λειτουργεί και δε στέλνει τίποτα. Ο δέκτης μπορεί να εκτιμήσει στη συνέχεια τα στοιχεία καναλιών H_{11} και H_{21} , μετρώντας τα δύο λαμβανόμενα σήματα κατά τους χρόνους που η κεραία μετάδοσης 1 στέλνει ένα σύμβολο αναφοράς. Μπορεί στη συνέχεια να περιμένει μέχρι η κεραία μετάδοσης 2 να στείλει ένα σύμβολο αναφοράς, πριν από την εκτίμηση των στοιχείων καναλιού H_{12} και H_{22} .

Ο δέκτης διαθέτει τώρα επαρκείς πληροφορίες για να εκτιμήσει τα μεταδιδόμενα σύμβολα x_1 και x_2 . Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να γίνει αυτό, αλλά ο απλούστερος είναι ένας *ανιχνευτής μηδενικής ισχύος*, ο οποίος λειτουργεί ως εξής. Εάν αγνοήσουμε το θόρυβο και τις παρεμβολές, τότε η Εξίσωση (5.1) είναι ένα ζευγάρι από ταυτόχρονες εξισώσεις για δύο άγνωστες ποσότητες, x_1 και x_2 . Αυτές οι εξισώσεις μπορούν να αναστραφούν ως εξής:

$$\begin{aligned} \hat{x}_1 &= \frac{\hat{H}_{22}y_1 - \hat{H}_{12}y_2}{\hat{H}_{11}\hat{H}_{22} - \hat{H}_{21}\hat{H}_{12}} \\ \hat{x}_2 &= \frac{\hat{H}_{11}y_2 - \hat{H}_{21}y_1}{\hat{H}_{11}\hat{H}_{22} - \hat{H}_{21}\hat{H}_{12}} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Εδώ, \hat{H}_{ij} είναι η εκτίμηση του δέκτη του στοιχείου καναλιού H_{ij} . (Η ποσότητα αυτή μπορεί να είναι διαφορετική από το H_{ij} , εξαιτίας του θορύβου και άλλων σφαλμάτων κατά τη διαδικασία εκτίμησης καναλιού). Ομοίως, τα \hat{x}_1 και \hat{x}_2 είναι οι εκτιμήσεις του δέκτη των μεταδιδόμενων συμβόλων x_1 και x_2 . Αντικαθιστώντας τους αριθμούς από τις Εξισώσεις (5.2) και (5.3) δίνεται το ακόλουθο αποτέλεσμα:

$$\begin{aligned}\hat{x}_1 &= +1.1 \\ \hat{x}_2 &= -1.1\end{aligned}\tag{5.5}$$

Αυτό είναι σύμφωνο με τα μεταδιδόμενα σύμβολα των +1 και -1. Έχουμε συνεπώς μεταφέρει δύο σύμβολα ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας τις ίδιες υποφέρουσες, και έχει διπλασιαστεί το ποσοστό των δεδομένων.

5.2.2 Χωρική Πολύπλεξη Ανοικτού Βρόχου

Υπάρχει ένα πρόβλημα με την τεχνική που περιγράφεται παραπάνω. Για να φανεί αυτό, ας αλλάξουμε ένα από τα στοιχεία καναλιού, H_{11} , για να δώσουμε το ακόλουθο παράδειγμα:

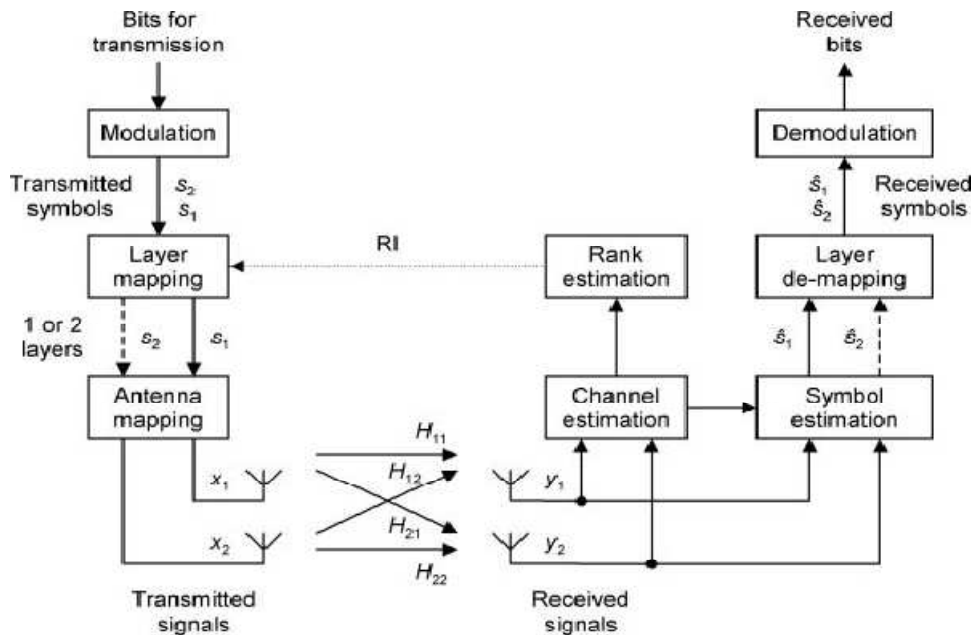
$$\begin{aligned}H_{11} &= 0.3 & H_{12} &= 0.6 \\ H_{21} &= 0.2 & H_{22} &= 0.4\end{aligned}\tag{5.6}$$

Αν προσπαθήσουμε να εκτιμήσουμε τα μεταδιδόμενα σύμβολα χρησιμοποιώντας την Εξίσωση (5.4), διαπιστώνουμε ότι $H_{11}H_{22} - H_{21}H_{12}$ είναι μηδέν. Καταλήγουμε επομένως σε διαίρεση με το μηδέν, η οποία είναι παράλογη. Έτσι, για την επιλογή αυτή των στοιχείων καναλιού, η τεχνική έχει αποτύχει. Μπορούμε να δούμε τι πήγε στραβά αντικαθιστώντας τα στοιχεία καναλιού στην Εξίσωση (5.1), και γράφοντας τα λαμβανόμενα σήματα ως εξής:

$$\begin{aligned}y_1 &= 0.3 (x_1 + 2 x_2) + n_1 \\ y_2 &= 0.2 (x_1 + 2 x_2) + n_2\end{aligned}\tag{5.7}$$

Μετρώντας τα λαμβανόμενα σήματα y_1 και y_2 , περιμέναμε να μετρήσουμε δύο διαφορετικά κομμάτια πληροφοριών, από την οποία θα μπορούσαμε να ανακτήσουμε τα δεδομένα που μεταδίδονται. Αυτή τη φορά, ωστόσο, έχουμε μετρήσει το ίδιο κομμάτι πληροφοριών, δηλαδή $x_1 + 2 x_2$, δύο φορές. Σαν αποτέλεσμα, δεν έχουμε αρκετές πληροφορίες για να ανακτήσουμε τα x_1 και x_2 ανεξάρτητα. Επιπλέον, αυτό δεν είναι μόνο μια μεμονωμένη ειδική περίπτωση. Αν το $H_{11}H_{22} - H_{21}H_{12}$ είναι μικρό αλλά μη μηδενικό, τότε οι εκτιμήσεις μας στα x_1 και x_2 αποδεικνύονται άσχημα κατεστραμμένες από το θόρυβο και είναι εντελώς άχρηστες.

Η λύση έρχεται από τη γνώση ότι μπορούμε ακόμα να στείλουμε ένα σύμβολο σε μια στιγμή, με τη χρήση της επεξεργασίας διαφορισμού. Χρειαζόμαστε επομένως ένα προσαρμοζόμενο σύστημα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιήσει χωρική πολύπλεξη για να στείλει δύο σύμβολα σε μια στιγμή αν τα στοιχεία καναλιού συμπεριφέρθηκαν καλά και διαφορετικά μπορεί να υποχωρήσει στην επεξεργασία διαφορισμού. Ένα τέτοιο σύστημα φαίνεται στο Σχήμα 5.5. Εδώ, ο δέκτης μετρά τα στοιχεία καναλιών και λειτουργεί μια *τάξη ένδειξης* (RI), η οποία υποδεικνύει τον



Σχήμα 5.5 Λειτουργία ενός συστήματος χωρικής πολύπλεξης ανοικτού βρόχου 2x2.

αριθμό των συμβόλων που μπορεί να λάβει επιτυχώς. Στη συνέχεια ανατροφοδοτεί την RI στον πομπό.

Εάν η RI είναι δύο, τότε το σύστημα λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο που περιγράψαμε προηγουμένως. Το πρόγραμμα αντιστοίχισης στρώματος του πομπού παίρνει δύο σύμβολα, τα s_1 και s_2 , από το καταχωρητή μετάδοσης, έτσι ώστε να δημιουργήσει δύο ανεξάρτητα ρεύματα δεδομένων που είναι γνωστά ως στρώματα. Το πρόγραμμα αντιστοίχισης κεραίας στη συνέχεια, στέλνει ένα σύμβολο σε κάθε κεραία, με μια απλή λειτουργία αντιστοίχισης:

$$\begin{aligned} x_1 &= s_1 \\ x_2 &= s_2 \end{aligned} \tag{5.8}$$

Ο δέκτης μετρά τα εισερχόμενα σήματα και ανακτά τα μεταδιδόμενα σύμβολα όπως πριν.

Εάν η RI είναι ένα, τότε ο πίνακας αντιστοίχισης στρώματος παίρνει μόνο ένα σύμβολο, το s_1 , του οποίου το πρόγραμμα αντιστοίχισης κεραίας στέλνει και στις δύο κεραίες μετάδοσης ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} x_1 &= s_1 \\ x_2 &= s_1 \end{aligned} \tag{5.9}$$

Κάτω από αυτές τις υποθέσεις, η Εξίσωση (5.7) γίνεται ως εξής:

$$y_1 = 0.9 s_1 + n_1$$

$$y_2 = 0.6 s_1 + n_2 \quad (5.10)$$

Ο δέκτης έχει τώρα δύο μετρήσεις του μεταδιδόμενου συμβόλου s_1 , και μπορεί να τα συνδυάσει αυτά σε ένα δέκτη διαφορισμού έτσι ώστε να ανακτήσει τα μεταδιδόμενα δεδομένα.

Το αποτέλεσμα έχει ως ακολούθως. Εάν τα στοιχεία καναλιού συμπεριφέρονται καλά, τότε ο πομπός στέλνει δύο σύμβολα σε μια στιγμή και ο δέκτης τα ανακτά χρησιμοποιώντας έναν δέκτη χωρικής πολύπλεξης. Μερικές φορές αυτό δεν είναι δυνατό, στην οποία περίπτωση ο πομπός υποχωρεί για την αποστολή ενός συμβόλου σε μια στιγμή και ο δέκτης υποχωρεί στη λήψη διαφορισμού. Αυτή η τεχνική εφαρμόζεται στο LTE και, για λόγους που θα γίνουν σαφείς στην επόμενη ενότητα, είναι γνωστή ως *χωρική πολύπλεξη ανοικτού βρόχου*.

5.2.3 Χωρική Πολύπλεξη Κλειστού Βρόχου

Υπάρχει ένα παραμένον πρόβλημα. Για να φανεί αυτό, ας αλλάξουμε δύο ακόμα από τα στοιχεία καναλιού, έτσι ώστε:

$$\begin{aligned} H_{11} &= 0.3 & H_{12} &= -0.3 \\ H_{21} &= 0.2 & H_{22} &= -0.2 \end{aligned} \quad (5.11)$$

Αυτά τα στοιχεία καναλιού συμπεριφέρονται άσχημα, στο ότι το $H_{11}H_{22} - H_{21}H_{12}$ είναι μηδέν. Αλλά αν προσπαθήσουμε να χειριστούμε την κατάσταση με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω, στέλνοντας το ίδιο σύμβολο και από τις δύο κεραιές μετάδοσης, τότε τα λαμβανόμενα σήματα έχουν ως εξής:

$$\begin{aligned} y_1 &= 0.3 s_1 - 0.3 s_1 + n_1 \\ y_2 &= 0.2 s_1 - 0.2 s_1 + n_2 \end{aligned} \quad (5.12)$$

Έτσι, τα σήματα που μεταδίδονται ακυρώνονται και στις δύο κεραιές λήψης και μένουμε με μετρήσεις του εισερχόμενου θορύβου και των παρεμβολών. Έχουμε ως εκ τούτου ανεπαρκείς πληροφορίες ακόμη και για να ανακτήσουμε το s_1 .

Για να δούμε την έξοδο, εξετάζουμε τι θα συμβεί αν στείλουμε ένα σύμβολο σε μια στιγμή όπως και πριν, αλλά αντιστρέφουμε το σήμα που στέλνεται από τη δεύτερη κεραία:

$$\begin{aligned} x_1 &= s_1 \\ x_2 &= -s_1 \end{aligned} \quad (5.13)$$

Το λαμβανόμενο σήμα μπορεί τώρα να γραφεί ως εξής:

$$y_1 = 0.3 s_1 + 0.3 s_1 + n_1$$

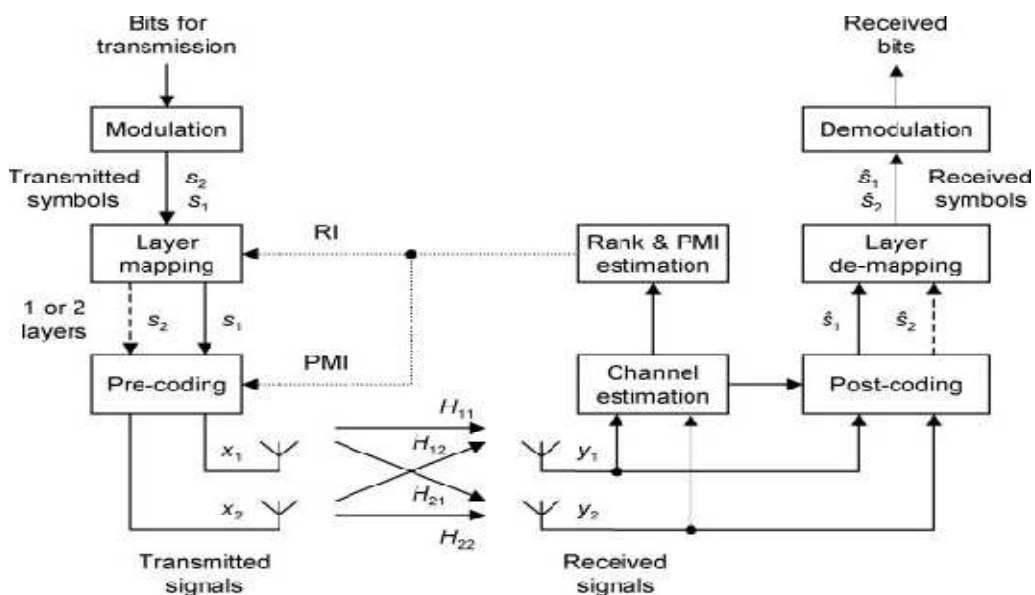
$$y_2 = 0.2 s_1 + 0.2 s_2 + n_2 \quad (5.14)$$

Αυτή τη φορά, μπορούμε να ανακτήσουμε το μεταδιδόμενο σύμβολο s_1 .

Γι' αυτό και απαιτούμε τώρα δύο επίπεδα προσαρμογής. Εάν η RI είναι δύο, τότε ο πομπός στέλνει δύο σύμβολα σε μια στιγμή χρησιμοποιώντας την κεραία αντιστοίχισης της Εξίσωσης (5.8). Εάν η RI είναι ένα, τότε ο πομπός υποχωρεί στην επεξεργασία διαφορισμού και στέλνει ένα σύμβολο σε μια στιγμή. Με αυτόν τον τρόπο, επιλέγει μια κεραία αντιστοίχισης όπως στην Εξίσωση (5.9) ή στην (5.13), η οποία εξαρτάται από την ακριβή φύση των στοιχείων καναλιού και η οποία εγγυάται ένα ισχυρό σήμα στο δέκτη.

Ένα τέτοιο σύστημα φαίνεται στο Σχήμα 5.6. Εδώ, ο δέκτης μετρά τα στοιχεία καναλιού όπως και πριν και τα χρησιμοποιεί για να ανατροφοδοτεί δύο ποσότητες, δηλαδή την RI και έναν PMI. Ο PMI ελέγχει ένα βήμα προκωδικοποίησης στον πομπό, ο οποίος υλοποιεί μια προσαρμοστική κεραία αντιστοίχισης χρησιμοποιώντας (για παράδειγμα) τις Εξισώσεις (5.8), (5.9) και (5.13), για να εξασφαλιστεί ότι τα σήματα φθάνουν στο δέκτη χωρίς ακύρωση. (Στην πραγματικότητα ο PMI έχει ακριβώς τον ίδιο ρόλο που είδαμε νωρίτερα κατά τη συζήτηση διαφορικής μετάδοσης κλειστού βρόχου, η οποία είναι ο λόγος γιατί το όνομά της είναι το ίδιο). Στο δέκτη, το βήμα μετακωδικοποίησης αντιστρέφει την επίδραση προκωδικοποίησης και περιλαμβάνει επίσης το στάδιο εκτίμησης ομαλής απόφασης από πριν.

Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται επίσης στο LTE, και είναι γνωστή ως χωρική πολύπλεξη κλειστού βρόχου. Σε αυτή την έκφραση, ο όρος 'κλειστός βρόχος' αναφέρεται ειδικά στο βρόχο που δημιουργείται τροφοδοτώντας τον PMI. Η τεχνική της Ενότητας 5.2.2 είναι γνωστή ως 'χωρική πολύπλεξη ανοιχτού βρόχου', ακόμα κι αν ο δέκτης εξακολουθεί να ανατροφοδοτεί την RI.



Σχήμα 5.6 Λειτουργία ενός συστήματος χωρικής πολύπλεξης κλειστού βρόχου 2x2.

5.2.4 Αναπαράσταση Πίνακα

Έχουμε καλύψει τώρα τις βασικές αρχές χωρικής πολύπλεξης. Για να προχωρήσουμε περαιτέρω, χρειαζόμαστε μια πιο μαθηματική περιγραφή από την άποψη των πινάκων. Οι αναγνώστες που δεν είναι εξοικειωμένοι με τους πίνακες μπορεί να προτιμούν να παραλείψουν αυτό το τμήμα και να επαναλάβουν τη συζήτηση στην Ενότητα 5.2.5, παρακάτω.

Στο συμβολισμό πίνακα, μπορούμε να γράψουμε το λαμβανόμενο σήμα (Εξίσωση 5.1) ως εξής:

$$y = H \cdot x + n \quad (5.15)$$

Εδώ, x είναι ένα διάνυσμα στήλης που περιέχει τα σήματα που στέλνονται από τις κεραιές μετάδοσης N_T . Ομοίως, n και y είναι διανύσματα της στήλης που περιέχει το θόρυβο και τα προκύπτοντα σήματα στις N_R κεραιές λήψης. Ο πίνακας καναλιού H έχει N_R σειρές και N_T στήλες, και εκφράζει τις αλλαγές πλάτους και τις μετατοπίσεις φάσης που εισάγει η διεπαφή αέρα. Στα παραδείγματα που εξετάσαμε προηγουμένως, το σύστημα είχε δύο κεραιές εκπομπής και δύο λήψης, έτσι η παραπάνω εξίσωση πίνακα θα μπορούσε να γραφεί ως εξής:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Τώρα, ας υποθέσουμε ότι οι αριθμοί των κεραιών εκπομπής και λήψης είναι ίσοι, έτσι ώστε $N_R = N_T = N$, και ας αγνοήσουμε το θόρυβο και τις παρεμβολές όπως και πριν. Μπορούμε στη συνέχεια να αντιστρέψουμε τον πίνακα καναλιού και να αντλήσουμε την ακόλουθη εκτίμηση των μεταδιδόμενων συμβόλων:

$$\hat{x} = \hat{H}^{-1} \cdot y \quad (5.17)$$

Εδώ, \hat{H}^{-1} είναι η εκτίμηση του αντιστρόφου του πίνακα καναλιού του δέκτη, ενώ \hat{x} είναι η εκτίμηση του εκπεμπόμενου σήματος. Αυτός είναι ο ανιχνευτής μηδενικής ισχύος από προηγουμένως. Ο ανιχνευτής λειτουργεί με προβλήματα αν ο θόρυβος και οι παρεμβολές είναι πολύ μεγάλα, αλλά, υπό αυτές τις συνθήκες, ένας ανιχνευτής ελάχιστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MMSE) δίνει μια πιο ακριβή απάντηση.

Εάν ο πίνακας καναλιού συμπεριφέρεται καλά, τότε μπορούμε να μετρήσουμε τα σήματα που φτάνουν στις κεραιές λήψης N και να χρησιμοποιήσουμε ένα κατάλληλο ανιχνευτή για την εκτίμηση των συμβόλων που μεταδόθηκαν. Κατά συνέπεια, μπορούμε να αυξήσουμε το ρυθμό δεδομένων με ένα συντελεστή N . Ο πίνακας καναλιού μπορεί, ωστόσο, να είναι *ιδιόμορφος* (όπως στις Εξισώσεις 5.6 και 5.11), που σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει ο αντίστροφός του. Εναλλακτικά, ο πίνακας μπορεί να είναι *κακής κατάστασης*, που στην περίπτωση αυτή, ο αντίστροφός του είναι κατεστραμμένος από το θόρυβο. Είτε έτσι είτε αλλιώς, θα πρέπει να βρούμε

άλλη λύση.

Η λύση έρχεται από το γράψιμο του πίνακα καναλιού \mathbf{H} ως εξής:

$$\mathbf{H} = \mathbf{P}^{-1} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{P} \quad (5.18)$$

Εδώ, \mathbf{P} είναι ένας πίνακας που σχηματίζεται από τα ιδιοδιανύσματα του \mathbf{H} , ενώ \mathbf{A} είναι ένας διαγώνιος πίνακας του οποίου τα στοιχεία είναι οι ιδιοτιμές του \mathbf{H} . Στο παράδειγμα των δύο κεραιών, ο διαγώνιος πίνακας είναι:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

όπου οι ιδιοτιμές είναι τα λ_1 και λ_2 .

Τώρα ας μεταδώσουμε τα σύμβολα με τον τρόπο που φαίνεται στο Σχήμα 5.7. Στην έξοδο από το στάδιο μετακωδικοποίησης, το ληφθέν διάνυσμα συμβόλου είναι:

$$\mathbf{r} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{F} \cdot \mathbf{s} + \mathbf{G} \cdot \mathbf{n} \quad (5.20)$$

όπου το \mathbf{s} περιέχει τα σύμβολα που μεταδίδονται από την είσοδο στο στάδιο προκωδικοποίησης, \mathbf{F} είναι ο πίνακας προκωδικοποίησης, \mathbf{H} είναι ο συνηθισμένος πίνακας καναλιού, και \mathbf{G} είναι ο πίνακας μετακωδικοποίησης. Αν τώρα επιλέξουμε τους πίνακες προ- και μετακωδικοποίησης έτσι ώστε να είναι καλές προσεγγίσεις στους πίνακες των ιδιοδιανυσμάτων:

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &\approx \mathbf{P}^{-1} \\ \mathbf{G} &\approx \mathbf{P} \end{aligned} \quad (5.21)$$

τότε το λαμβανόμενο διάνυσμα συμβόλου γίνεται το ακόλουθο:

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &\approx \mathbf{P} \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{P}^{-1} \cdot \mathbf{s} + \mathbf{P} \cdot \mathbf{n} \\ &\approx \mathbf{A} \cdot \mathbf{s} + \mathbf{P} \cdot \mathbf{n} \end{aligned} \quad (5.22)$$

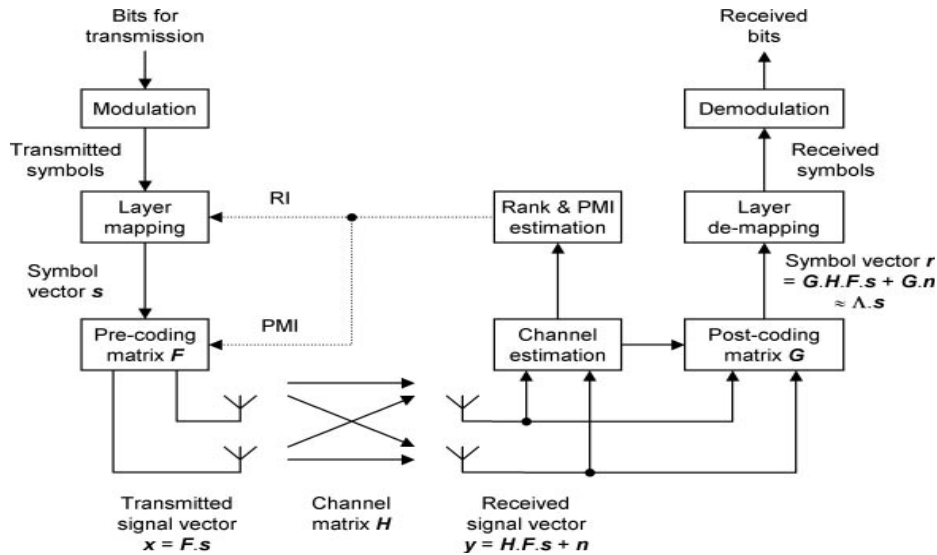
Αγνοώντας το θόρυβο, μπορούμε τώρα να γράψουμε τα λαμβανόμενα σύμβολα σε ένα σύστημα χωρικής πολύπλεξης δύο κεραιών ως ακολούθως:

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

Έχουμε συνεπώς δύο ανεξάρτητα ρεύματα δεδομένων, χωρίς οποιαδήποτε σύζευξη μεταξύ τους. Είναι τώρα εύκολο για τον δέκτη να ανακτήσει τα μεταδιδόμενα σύμβολα, ως εξής:

$$\hat{s}_i = r_i / \lambda_i \quad (5.24)$$

Έτσι, με μια κατάλληλη επιλογή πινάκων προ- και μετακωδικοποίησης, \mathbf{F} και \mathbf{G} ,



Σχήμα 5.7 Λειτουργία ενός συστήματος χωρικής πολύπλεξης με έναν αυθαίρετο αριθμό κεραιών.

G , μπορούμε να απλοποιήσουμε σημαντικά το σχεδιασμό του δέκτη.

Αν ο πίνακας καναλιού H είναι ιδιόμορφος, τότε, κάποιες από τις λ_i ιδιοτιμές του, είναι μηδέν. Αν είναι κακής κατάστασης, τότε μερικές από τις ιδιοτιμές είναι πολύ μικρές, έτσι ώστε τα ανακατασκευασμένα σύμβολα να αλλοιώνονται άσχημα από το θόρυβο. Η τάξη του H είναι ο αριθμός των χρησιμοποιήσιμων ιδιοτιμών και η RI από την Ενότητα 5.2.2, ισούται με την τάξη του H . Σε ένα σύστημα δύο κεραιών με μια τάξη του 1, για παράδειγμα, το ληφθέν διάνυσμα συμβόλων έχει ως εξής:

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

Το σύστημα μπορεί να εκμεταλλευτεί αυτή τη συμπεριφορά με τον ακόλουθο τρόπο. Ο δέκτης υπολογίζει τον πίνακα καναλιού και ανατροφοδοτεί την RI μαζί με τον πίνακα προκωδικοποίησης F . Εάν η RI είναι δύο, τότε ο πομπός στέλνει δύο σύμβολα, τα s_1 και s_2 , και ο δέκτης τα ανασυνθέτει από την Εξίσωση (5.23). Εάν η RI είναι ένα, τότε ο πομπός στέλνει μόνο ένα σύμβολο, το s_1 , και δεν ασχολείται καθόλου με το s_2 . Ο δέκτης τότε μπορεί να ανακατασκευάσει το μεταδιδόμενο σύμβολο από την Εξίσωση (5.25).

Στην πράξη, ο δέκτης δεν περνάει μια πλήρη περιγραφή του F πίσω στον πομπό, καθώς αυτό θα απαιτούσε υπερβολική ανάδραση. Αντ' αυτού, επιλέγει την πλησιέστερη προσέγγιση προς το P^{-1} από ένα βιβλίο κωδικών και δηλώνει την επιλογή του χρησιμοποιώντας τον PMI.

Έλεγχος των Εξισώσεων (5.22) και (5.23) δείχνει ότι τα λαμβανόμενα σύμβολα r_1 και r_2 μπορούν να έχουν διαφορετικές αναλογίες σήματος-προς-θόρυβο, που εξαρτώνται από τις αντίστοιχες ιδιοτιμές λ_1 και λ_2 . Στο LTE, ο πομπός μπορεί να το εκμεταλλευτεί αυτό, στέλνοντας τα δύο σύμβολα με διαφορετικά συστήματα

διαμόρφωσης και τιμές κωδικοποίησης, και επίσης με διαφορετικές ισχύες μετάδοσης.

Μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση (5.15) για να περιγράψουμε ένα σύστημα στο οποίο οι αριθμοί των κεραιών εκπομπής και λήψης είναι διαφορετικοί. Η τεχνική ιδιοτιμών λειτουργεί μόνο για τετραγωνικούς πίνακες, αλλά μπορεί να είναι γενικευμένη σε μια τεχνική γνωστή ως *χρήση ιδιόμορφων τιμών* [7] που λειτουργεί για ορθογώνιους πίνακες επίσης. Η μέγιστη ταχύτητα δεδομένων είναι ανάλογη με το $\min(N_T, N_R)$, με οποιεσδήποτε επιπλέον κεραιές, παρέχοντας πρόσθετη μετάδοση ή διαφορική λήψη.

5.2.5 Θέματα Εφαρμογής

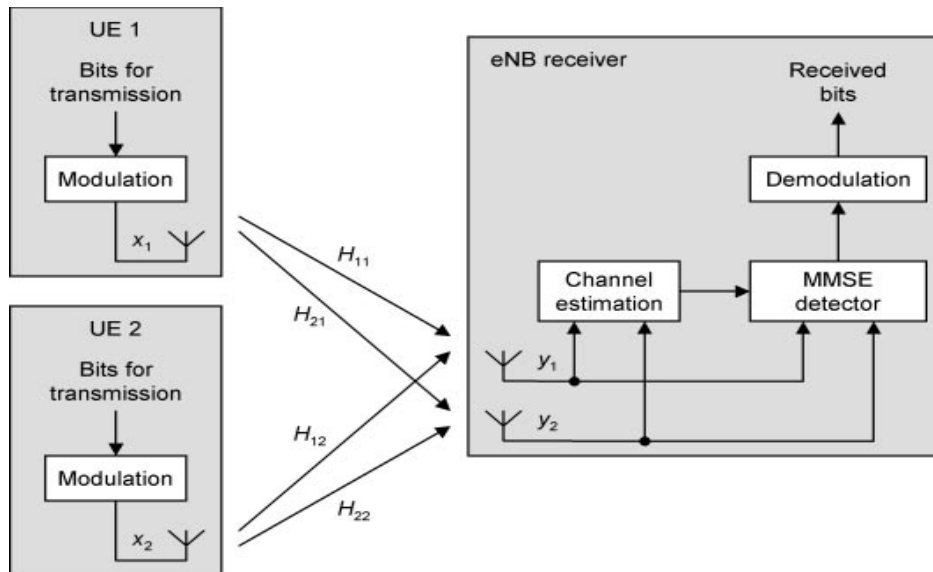
Χωρική πολύπλεξη υλοποιείται στην κάτω ζεύξη της LTE Έκδοσης 8, χρησιμοποιώντας ένα μέγιστο τεσσάρων κεραιών εκπομπής στο σταθμό βάσης και τέσσερις κεραιές λήψης στο κινητό. Υπάρχουν παρόμοια θέματα εφαρμογής για την επεξεργασία διαφορισμού. Πρώτον, οι κεραιές στο σταθμό βάσης και στο κινητό θα πρέπει να είναι λογικά μακριά, σε ιδανική περίπτωση μερικά μήκη κύματος από τη φέρουσα συχνότητα, ή θα πρέπει να χειρίζονται διαφορετικές πολικότητες. Αν οι κεραιές είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, τότε τα στοιχεία καναλιού H_{ij} θα είναι πολύ όμοια. Αυτό μπορεί εύκολα να μας μεταφέρει στην κατάσταση από την Ενότητα 5.2.2, όπου η χωρική πολύπλεξη ήταν άχρηστη και θα έπρεπε να επιστρέψουμε στην επεξεργασία διαφορισμού.

Μια παρόμοια κατάσταση μπορεί εύκολα να προκύψει στην περίπτωση μετάδοσης και λήψης οπτικής επαφής. Αυτό μας οδηγεί σε ένα απρόσμενο συμπέρασμα: η χωρική πολύπλεξη λειτουργεί πράγματι καλύτερα σε συνθήκες που δεν έχουν άμεση οπτική επαφή και σημαντική πολυδιαδρομή, επειδή, σε αυτές τις συνθήκες, τα στοιχεία καναλιού H_{ij} είναι ανεξάρτητα με τα άλλα. Σε συνθήκες οπτικής επαφής, συχνά πρέπει να επιστρέψουμε στην επεξεργασία διαφορισμού.

Όπως και στην περίπτωση διαφορικής μετάδοσης κλειστού βρόχου, ο PMI εξαρτάται από τη φέρουσα συχνότητα και τη θέση του κινητού. Για τα κινητά ταχείας κίνησης, καθυστερήσεις στο βρόχο ανάδρασης μπορούν να κάνουν τον PMI αναξιόπιστο από τη στιγμή που ο πομπός έρχεται να το χρησιμοποιήσει, έτσι συχνά προτιμάται η χωρική πολύπλεξη ανοικτού βρόχου.

5.2.6 MIMO Πολλαπλού Χρήστη

Το Σχήμα 5.8 δείχνει μία ελαφρώς διαφορετική τεχνική. Εδώ, δύο κεραιές μετάδοσης και δύο λήψης μοιράζονται τους ίδιους χρόνους και συχνότητες μετάδοσης, με τον ίδιο τρόπο όπως και πριν. Αυτή τη φορά, ωστόσο, οι κεραιές κινητής τηλεφωνίας είναι σε δύο διαφορετικά κινητά αντί σε ένα. Αυτή η τεχνική είναι γνωστή ως *MIMO πολλαπλού χρήστη* (MU-MIMO), σε αντίθεση με τις προηγούμενες τεχνικές χωρικής



Σχήμα 5.8 MU-MIMO άνω ζεύξης.

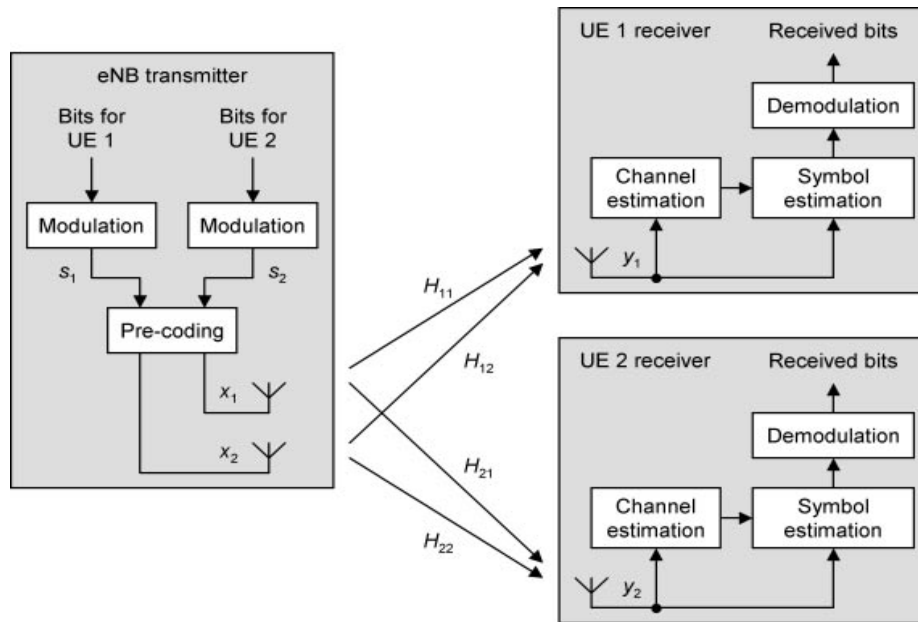
πολύπλεξης, οι οποίες είναι μερικές φορές γνωστές ως *MIMO μεμονωμένου χρήστη* (SU-MIMO).

Το Σχήμα 5.8 συγκεκριμένα παρουσιάζει την εφαρμογή MU-MIMO στην άνω ζεύξη, η οποία είναι η πιο κοινή κατάσταση. Εδώ, τα κινητά μεταδίδουν ταυτόχρονα και στην ίδια φέρουσα συχνότητα, αλλά χωρίς τη χρήση οποιασδήποτε προκωδικοποίησης και χωρίς καν να γνωρίζουν ότι αποτελούν μέρος ενός συστήματος χωρικής πολύπλεξης. Ο σταθμός βάσης λαμβάνει τις μεταδόσεις τους και τα διαχωρίζει χρησιμοποιώντας (για παράδειγμα) τον ανιχνευτή MMSE που σημειώσαμε νωρίτερα.

Αυτή η τεχνική λειτουργεί μόνο εάν ο πίνακας καναλιού συμπεριφέρεται καλά, αλλά συνήθως μπορούμε να το εγγυηθούμε αυτό για δύο λόγους. Πρώτον, τα κινητά είναι πιθανό να είναι πολύ μακριά, έτσι οι διαδρομές ακτίνων τους είναι πιθανό να είναι πολύ διαφορετικές. Δεύτερον, ο σταθμός βάσης μπορεί ελεύθερα να επιλέξει τα κινητά που λαμβάνουν μέρος, έτσι μπορούν να επιλέγουν ελεύθερα κινητά που οδηγούν σε έναν πίνακα καναλιού καλής συμπεριφοράς.

Ο MU-MIMO άνω ζεύξης δεν αυξάνει το μέγιστο ρυθμό δεδομένων ενός μεμονωμένου κινητού, αλλά εξακολουθεί να είναι ευεργετικός λόγω της αύξησης στην απόδοση κυψελών. Θα μπορεί επίσης να εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας φθηνά κινητά που έχουν μόνο έναν ενισχυτή ισχύος και μια κεραία μετάδοσης, όχι δύο. Για τους λόγους αυτούς, ο MU-MIMO είναι η πρότυπη τεχνική στην άνω ζεύξη της LTE Έκδοσης 8: ο SU-MIMO δεν εισάγεται εντός της άνω ζεύξης μέχρι την Έκδοση 10.

Μπορούμε επίσης να εφαρμόσουμε MU-MIMO στην κάτω ζεύξη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9. Αυτή τη φορά, ωστόσο, υπάρχει ένα πρόβλημα. Το κινητό 1 μπορεί να μετρήσει το λαμβανόμενο y_1 σήμα του και τα στοιχεία καναλιών H_{11} και H_{12} , με τον ίδιο τρόπο όπως και πριν. Ωστόσο, δεν έχει γνώση του άλλου λαμβανόμενου σήματος y_2 , ή των άλλων στοιχείων καναλιών H_{21} και H_{22} . Το



Σχήμα 5.9 MU-MIMO κάτω ζεύξης.

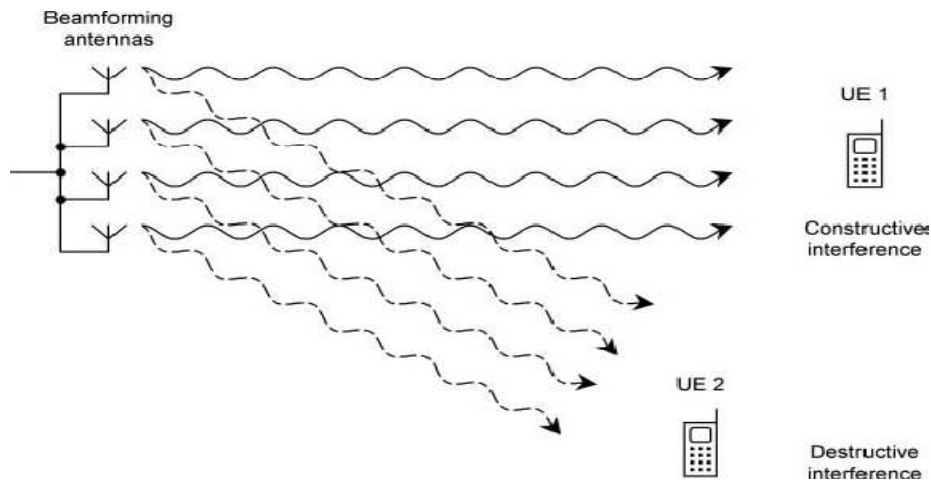
αντίθετο ισχύει για το κινητό 2. Κανένα κινητό δεν έχει πλήρη γνώση των στοιχείων καναλιών ή των ληφθέντων σημάτων, το οποίο ακυρώνει τις τεχνικές που έχουμε χρησιμοποιήσει.

Η λύση είναι η εφαρμογή MU-MIMO κάτω ζεύξης με την προσαρμογή μιας άλλης τεχνικής πολλαπλών κεραιών, γνωστή ως beamforming. Θα καλύψουμε το beamforming στην επόμενη ενότητα και στη συνέχεια θα επιστρέψουμε στον MU-MIMO κάτω ζεύξης στο τέλος του κεφαλαίου.

5.3 Beamforming

5.3.1 Αρχές Λειτουργίας

Στο beamforming, ένας σταθμός βάσης χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές με έναν εντελώς διαφορετικό τρόπο, για να αυξήσει την κάλυψή του. Οι αρχές φαίνονται στο Σχήμα 5.10. Εδώ, το κινητό 1 είναι πολύ μακριά από το σταθμό βάσης, σε μια οπτική επαφή που είναι σε ορθή γωνία ως προς την διάταξη κεραιάς. Τα σήματα από κάθε κεραιά φτάνουν το κινητό 1 «σε φάση», έτσι παρεμβαίνουν εποικοδομητικά, και η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος είναι υψηλή. Από την άλλη πλευρά, το κινητό 2 είναι σε μια πλάγια γωνία, και λαμβάνει σήματα από εναλλασσόμενες κεραιές που είναι 180° εκτός φάσης. Αυτά τα σήματα παρεμβαίνουν καταστροφικά, έτσι η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος είναι χαμηλή. Έχουμε δημιουργήσει επομένως μια συνθετική δέσμη κεραιάς, η οποία έχει μια κύρια δέσμη στραμμένη προς το κινητό 1 και μια μηδενικού σήματος που δείχνει προς το κινητό 2. Το εύρος δέσμης είναι στενότερο από ένα μιας ενιαίας κεραιάς, έτσι η εκπεμπόμενη ισχύς εστιάζεται προς το κινητό 1. Κατά συνέπεια, το εύρος του σταθμού βάσης προς την κατεύθυνση του



Σχήμα 5.10 Βασικές αρχές beamforming.

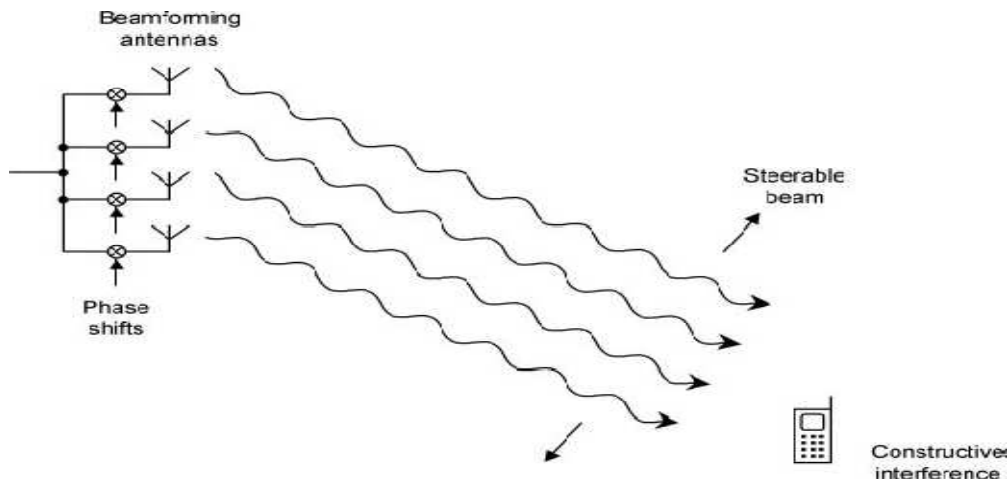
κινητού 1 είναι μεγαλύτερο από ό,τι πριν.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.11, μπορούμε να πάμε ένα βήμα παραπέρα. Εφαρμόζοντας μια ράμπα φάσης στα μεταδιδόμενα σήματα, μπορούμε να αλλάξουμε την κατεύθυνση στην οποία προκύπτει εποικοδομητική παρέμβαση, έτσι μπορούμε να κατευθύνουμε τη δέσμη προς οποιαδήποτε κατεύθυνση επιλέξουμε. Γενικότερα, μπορούμε να ρυθμίσουμε τα πλάτη και τις φάσεις των μεταδιδόμενων σημάτων, εφαρμόζοντας ένα κατάλληλο σύνολο συντελεστών στάθμισης της κεραίας. Σε ένα σύστημα με N κεραίες, αυτό μας επιτρέπει να ρυθμίσουμε την κατεύθυνση της κύριας δέσμης και μέχρι $N - 2$ μηδενικά σήματα ή πλευρικούς λοβούς.

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ίδια τεχνική για να κατασκευάσουμε μια συνθετική δέσμη λήψης για την άνω ζεύξη. Εφαρμόζοντας ένα κατάλληλο σύνολο συντελεστών στάθμισης της κεραίας στο δέκτη σταθμού βάσης, μπορούμε να διασφαλίσουμε ότι τα λαμβανόμενα σήματα αθροίζονται «σε φάση» και παρεμβαίνουν εποικοδομητικά. Κατά συνέπεια, μπορούμε να αυξήσουμε την εμβέλεια στην άνω ζεύξη επίσης.

Στο OFDMA, μπορούμε να επεξεργαστούμε διάφορες υπο-φέρουσες, χρησιμοποιώντας διαφορετικά σύνολα συντελεστών στάθμισης της κεραίας, έτσι ώστε να δημιουργήσουμε συνθετικές δέσμες κεραιών που οδηγούν σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Μπορούμε λοιπόν να χρησιμοποιήσουμε το beamforming για να επικοινωνήσουμε με πολλά διαφορετικά κινητά ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας διαφορετικές υπο-φέρουσες ακόμη και αν τα κινητά είναι σε εντελώς διαφορετικές θέσεις.

Το beamforming λειτουργεί καλύτερα αν οι κεραίες είναι κοντά μεταξύ τους, με διαχωρισμό συγκρίσιμο με το μήκος κύματος των ραδιοκυμάτων. Αυτό εξασφαλίζει ότι τα σήματα που αποστέλλονται ή λαμβάνονται από εκείνες τις κεραίες, συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό. Αυτή είναι μια διαφορετική κατάσταση από την επεξεργασία διαφορισμού ή τη χωρική πολύπλεξη, οι οποίες λειτουργούν καλύτερα αν οι κεραίες είναι πολύ μακριά, με ασύνδετα σήματα. Ένας σταθμός βάσης είναι επομένως πιθανό να χρησιμοποιεί δύο σύνολα κεραιών: ένα σύνολο



Σχήμα 5.11 Σύστημα διεύθυνσης δέσμης χρησιμοποιώντας ένα σύνολο μετατοπίσεων φάσης.

μικρής απόστασης για beamforming και ένα σύνολο μεγάλης απόστασης για διαφορική και χωρική πολύπλεξη.

5.3.2 Σύστημα Διεύθυνσης Δέσμης

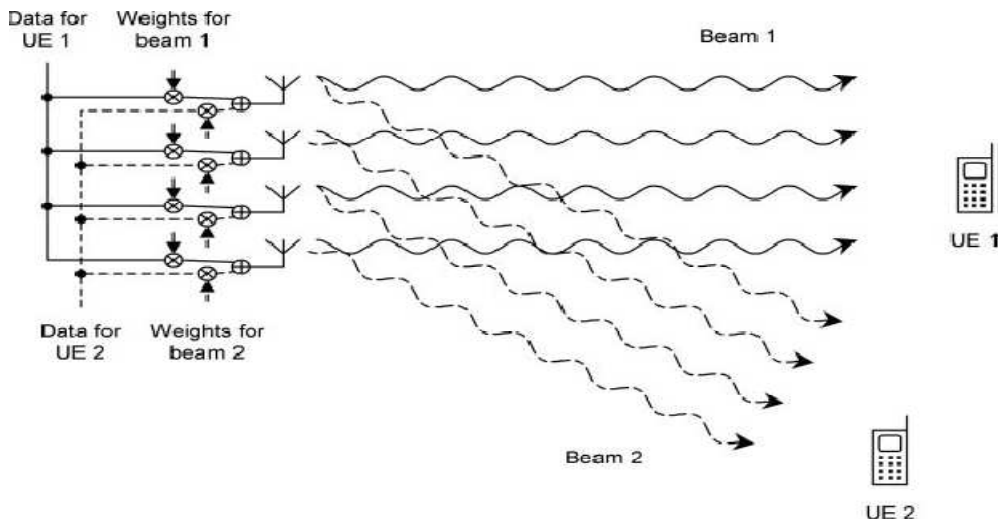
Δεν έχουμε ακόμη εξετάσει το ζήτημα για το πώς υπολογίζουμε τους συντελεστές στάθμισης της κεραίας και να κατευθύνουμε τη δέσμη. Πώς γίνεται αυτό;

Για τις δέσμες λήψης στην άνω ζεύξη, υπάρχουν δύο βασικές τεχνικές [8, 9]. Χρησιμοποιώντας την *τεχνική σήματος αναφοράς*, ο σταθμός βάσης προσαρμόζει τους συντελεστές στάθμισης της κεραίας έτσι ώστε να ανακατασκευάσει τα σύμβολα αναφοράς του κινητού με τη σωστή φάση σήματος και τον καλύτερο δυνατό SINR. Μια εναλλακτική λύση είναι η *τεχνική της κατεύθυνσης άφιξης*, στην οποία ο σταθμός βάσης μετρά τα σήματα που λαμβάνονται από κάθε κεραία και εκτιμά την κατεύθυνση του κινητού στόχου. Από την ποσότητα αυτή, μπορεί να εκτιμήσει τους συντελεστές στάθμισης της κεραίας που απαιτούνται για την ικανοποιητική λήψη.

Για τις δέσμες μετάδοσης της κάτω ζεύξης, η απάντηση εξαρτάται από τη λειτουργία της κατάστασης του σταθμού βάσης. Σε κατάσταση TDD, η άνω ζεύξη και η κάτω ζεύξη χρησιμοποιούν την ίδια φέρουσα συχνότητα, έτσι ο σταθμός βάσης μπορεί να χρησιμοποιήσει τους ίδιους συντελεστές στάθμισης της κεραίας στην κάτω ζεύξη που υπολογίστηκε για την άνω ζεύξη. Σε κατάσταση FDD, οι φέρουσες συχνότητες είναι διαφορετικές, έτσι και οι συντελεστές στάθμισης κεραίας της κάτω ζεύξης είναι διαφορετικές και είναι δύσκολο να υπολογιστούν. Για αυτό το λόγο, το beamforming είναι πιο κοινό σε συστήματα που χρησιμοποιούν TDD αντί FDD.

5.3.3 Beamforming Διπλού Επιπέδου

Το *beamforming διπλού επιπέδου* (Σχήμα 5.12) πηγαίνει την ιδέα ένα βήμα παραπέρα.



Σχήμα 5.12 Beamforming διπλού επιπέδου χρησιμοποιώντας δύο παράλληλα σύνολα συντελεστών στάθμισης κεραιών.

Στην τεχνική αυτή, ο σταθμός βάσης στέλνει δυο διαφορετικά ρεύματα δεδομένων στο φάσμα κεραιών του, αντί για ένα μόνο. Επεξεργάζεται έπειτα τα δεδομένα χρησιμοποιώντας δυο διαφορετικά σύνολα συντελεστών στάθμισης κεραιών και προσθέτει τα αποτελέσματα μαζί, πριν τη μετάδοση. Με αυτό τον τρόπο, έχει δημιουργήσει δύο ξεχωριστές δέσμες κεραιών, που μοιράζονται τις ίδιες υποφέρουσες, αλλά μεταφέρουν δύο διαφορετικά σύνολα πληροφοριών. Ο σταθμός βάσης στη συνέχεια, ρυθμίζει τους συντελεστές στάθμισης κεραιών προκειμένου να κατευθύνει τις δέσμες σε δύο διαφορετικά κινητά, έτσι το πρώτο κινητό δέχεται επικοινωνιακή παρέμβαση από τη δέσμη 1 και καταστρεπτική παρέμβαση από τη δέσμη 2 και αντίστροφα. Με τον τρόπο αυτό, ο σταθμός βάσης μπορεί να διπλασιάσει τη χωρητικότητα της κυψέλης. Εναλλακτικά, ο σταθμός βάσης μπορεί να κατευθύνει τις ακτίνες σε δύο διαφορετικές κεραιές σε ένα μόνο κινητό, έτσι ώστε να διπλασιαστεί ο στιγμιαίος ρυθμός δεδομένων του κινητού.

Σε ιδανικές συνθήκες, ο μέγιστος αριθμός των ανεξάρτητων ροών δεδομένων είναι ίσος με τον αριθμό των κεραιών σε συστοιχία. Το LTE πρώτο υποστηρίζει την τεχνική της Έκδοσης 9 των προδιαγραφών 3GPP. Σε εκείνη την έκδοση, ο μέγιστος αριθμός ροών δεδομένων περιορίστηκε σε δύο, οδηγώντας στο όνομα του beamforming διπλού επιπέδου.

5.3.4 Αναθεωρημένος MU-MIMO Κάτω Ζεύξης

Στο τέλος της Ενότητας 5.2.6, προσπαθήσαμε να εφαρμόσουμε MU-MIMO κάτω ζεύξης, χρησιμοποιώντας τις ίδιες τεχνικές που είχαμε προηγουμένως χρησιμοποιήσει στη χωρική πολύπλευξη. Ανακαλύψαμε ότι τα κινητά δεν είχαν αρκετές πληροφορίες για την ανάκτηση των μεταδιδόμενων συμβόλων, έτσι οι προηγούμενες τεχνικές ήταν ακατάλληλες.

Αναφερόμενοι πίσω στο Σχήμα 5.9, η μόνη αξιόπιστη λύση είναι να προκωδικοποιήσουμε τα μεταδιδόμενα σύμβολα s_1 και s_2 , ούτως ώστε το s_1 να υπόκειται σε εποικοδομητική παρέμβαση στο κινητό 1 και καταστροφική παρεμβολή στο κινητό 2, με την αντίθετη κατάσταση εφαρμόζοντας το s_2 . Αλλά αυτή είναι ακριβώς η ίδια ερμηνεία που έχουμε μόλις χρησιμοποιήσει για το beamforming διπλού επιπέδου. Αυτό σημαίνει ότι το MU-MIMO κάτω ζεύξης, αντιμετωπίζεται καλύτερα ως μια ποικιλία beamforming, χρησιμοποιώντας κεραιές σταθμού βάσης που είναι κοντά μεταξύ τους και όχι πολύ μακριά.

Η διαφορά μεταξύ MU-MIMO κάτω ζεύξης και beamforming διπλού επιπέδου, έγκειται στον υπολογισμό των συντελεστών στάθμισης κεραιών. Σε MU-MIMO, κάθε κινητό ανατροφοδοτεί έναν πίνακα προκωδικοποίησης από τον οποίο ο σταθμός βάσης καθορίζει τους συντελεστές στάθμισης κεραιών που απαιτεί. Δεν υπάρχει τέτοια ανάδραση στο beamforming διπλού επιπέδου: αντ' αυτού, ο σταθμός βάσης υπολογίζει τους συντελεστές στάθμισης κεραιών κάτω ζεύξης, από τις μεταδόσεις άνω ζεύξης των μετρήσεων του κινητού του.

Το LTE πρώτο υποστηρίζει αυτή την εφαρμογή MU-MIMO κάτω ζεύξης στην Έκδοση 10 των 3GPP προδιαγραφών. Υπάρχει, ωστόσο, περιορισμένη υποστήριξη για MU-MIMO κάτω ζεύξης στην Έκδοση 8, επίσης. Η εφαρμογή της Έκδοσης 8 χρησιμοποιεί τους ίδιους αλγόριθμους που χρησιμοποιεί ο SU-MIMO, έτσι λειτουργεί αποτελεσματικά μόνο αν το βιβλίο κωδικών τυχαίνει να περιλαμβάνει έναν πίνακα προκωδικοποίησης που πληροί τις προϋποθέσεις που περιγράφονται παραπάνω. Συχνά αυτό δεν συμβαίνει, έτσι η απόδοση MU-MIMO κάτω ζεύξης στην Έκδοση 8, είναι συγκριτικά μικρή.

Αναφορές

1. Biglieri, E., Calderbank, R., Constantinides, A., Goldsmith, A., Paulraj, A. and Poor, H. V. (2010) *MIMO Wireless Communications*, Cambridge University Press.
2. 4G Americas (June 2009) *MIMO Transmission Schemes for LTE and HSPA Networks*.
3. 4G Americas (May 2010) *MIMO and Smart Antennas for 3G and 4G Wireless Systems: Practical Aspects and Deployment Considerations*.
4. Lee, J., Han, J. K. and Zhang, J. (2009) MIMO technologies in 3GPP LTE and LTE-Advanced, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, **2009**, article ID 302092.
5. 3GPP TS 36.101 (October 2011) *User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception*, Release 10, section 7.2.
6. Alamouti, S. (1998) Space block coding: A simple transmitter diversity technique for wireless communications, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **16**, 1451–1458.
7. Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. and Flannery, B. P. (2007) *Numerical Recipes*, Section 2.6, 3rd edn. Cambridge University Press.
8. Godara, L. C. (1997) Applications of antenna arrays to mobile communications, part I: Performance improvement, feasibility, and system considerations, *Proceedings of the IEEE*, **85**, 1031–1060.
9. Godara, L. C. (1997) Application of antenna arrays to mobile communications, part II: Beamforming and direction-of-arrival considerations, *Proceedings of the IEEE*, **85**, 1195–1245.

6

Αρχιτεκτονική της LTE Διεπαφής Αέρα

Τώρα που έχουμε καλύψει τις αρχές της διεπαφής αέρα, μπορούμε να εξηγήσουμε πώς οι αρχές αυτές εφαρμόζονται πράγματι στο LTE. Αυτή η εργασία είναι το επίκεντρο των επόμενων πέντε κεφαλαίων.

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα καλύψουμε την υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονική διεπαφής αέρα. Ξεκινάμε επανεξετάζοντας τη στοίβα πρωτοκόλλων διεπαφής αέρα, και απαριθμώντας τα κανάλια και τα σήματα που μεταφέρουν πληροφορίες μεταξύ των διαφορετικών πρωτοκόλλων. Στη συνέχεια περιγράφουμε πώς οι διεπαφές αέρα των OFDMA και SCFDMA οργανώνονται ως συνάρτηση του χρόνου και της συχνότητας σε ένα πλέγμα πόρου και συζητάμε πώς το LTE εφαρμόζει μεταδόσεις από πολλαπλές κεραιές, χρησιμοποιώντας πολλαπλά αντίγραφα του πλέγματος. Τέλος, φέρνουμε το προηγούμενο υλικό μαζί, αποδεικνύοντας πώς τα κανάλια και τα σήματα αντιστοιχίζονται πάνω στα πλέγματα πόρων που χρησιμοποιούνται στην άνω και κάτω ζεύξη.

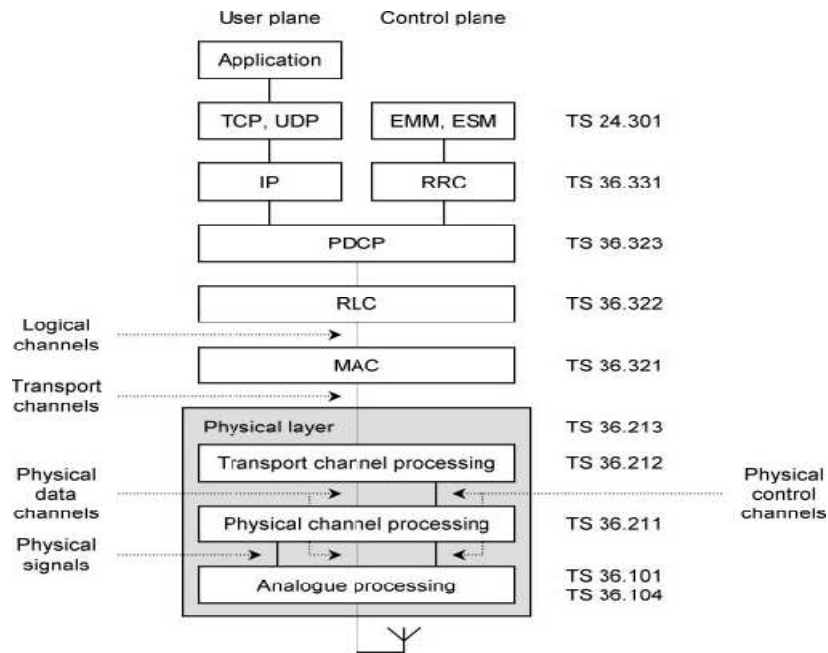
6.1 Στοίβα Πρωτοκόλλων Διεπαφής Αέρα

Το Σχήμα 6.1 επανεξετάζει τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στη διεπαφή αέρα, από την σκοπιά του κινητού. Εκτός από τα στοιχεία που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2, το σχήμα προσθέτει κάποια λεπτομέρεια για το φυσικό επίπεδο και δείχνει τις ροές πληροφοριών μεταξύ των διαφόρων επιπέδων της στοίβας πρωτοκόλλων.

Ας εξετάσουμε τον πομπό. Στο επίπεδο χρήστη, η εφαρμογή δημιουργεί πακέτα δεδομένων που υφίστανται επεξεργασία από πρωτόκολλα όπως τα TCP, UDP και IP, ενώ στο επίπεδο ελέγχου, το πρωτόκολλο RRC [1] γράφει τα μηνύματα σηματοδότησης που ανταλλάσσονται μεταξύ του σταθμού βάσης και του κινητού. Και στις δύο περιπτώσεις, οι πληροφορίες επεξεργάζονται από το πρωτόκολλο PDCP [2], το πρωτόκολλο RLC [3] και το πρωτόκολλο MAC [4], πριν περάσουν στο φυσικό επίπεδο για τη μετάδοση.

Το φυσικό επίπεδο έχει τρία μέρη. Ο *επεξεργαστής καναλιών μεταφοράς* [5] εφαρμόζει τις διαδικασίες διαχείρισης λαθών που καλύψαμε στην Ενότητα 3.3, ενώ ο *επεξεργαστής φυσικών καναλιών* [6] εφαρμόζει τις τεχνικές των OFDMA, SC-FDMA και μετάδοσης πολλαπλών κεραιών από τα Κεφάλαια 4 και 5. Τέλος, ο *αναλογικός επεξεργαστής* [7, 8] μετατρέπει τις πληροφορίες σε αναλογική μορφή, τις φιλτράρει και τις αναμιγνύει επάνω σε RF για τη μετάδοση. Μια ξεχωριστή προδιαγραφή [9] περιγράφει τις διαδικασίες που επεκτείνονται πέρα από τα επιμέρους τμήματα του φυσικού επιπέδου.

Οι πληροφορίες ρέουν μεταξύ των διαφόρων πρωτοκόλλων, που είναι γνωστά



Σχήμα 6.1 Αρχιτεκτονική της στοιβάς πρωτοκόλλων διεπαφής αέρα.

ως κανάλια και σήματα. Τα δεδομένα και τα μηνύματα σηματοδοσίας μεταφέρονται σε *λογικά κανάλια* μεταξύ των πρωτοκόλλων RLC και MAC, σε *κανάλια μεταφοράς* μεταξύ του MAC και του φυσικού επιπέδου, και σε *φυσικά κανάλια δεδομένων* μεταξύ των διαφόρων επιπέδων του φυσικού επιπέδου. Το LTE χρησιμοποιεί αρκετούς διαφορετικούς τύπους λογικών, μεταφοράς και φυσικών καναλιών, που διακρίνονται από το είδος των πληροφοριών που μεταφέρουν και από τον τρόπο με τον οποίο επεξεργάζονται τις πληροφορίες.

Στον πομπό, ο επεξεργαστής καναλιών μεταφοράς δημιουργεί επίσης *πληροφορία ελέγχου* που υποστηρίζει τη λειτουργία χαμηλού επιπέδου του φυσικού επιπέδου και στέλνει αυτή την πληροφορία στον επεξεργαστή φυσικού καναλιού υπό τη μορφή *φυσικών καναλιών ελέγχου*. Η πληροφορία ταξιδεύει όσο ο επεξεργαστής μεταφοράς καναλιών είναι στο δέκτη, αλλά είναι εντελώς αόρατος σε υψηλότερα στρώματα. Ομοίως, ο επεξεργαστής φυσικού καναλιού δημιουργεί *φυσικά σήματα*, που υποστηρίζουν τις χαμηλότερου επιπέδου πτυχές του συστήματος. Αυτά ταξιδεύουν όσο ο επεξεργαστής φυσικού καναλιού είναι στο δέκτη, αλλά και πάλι είναι αόρατα σε υψηλότερα στρώματα.

6.2 Λογικά, Μεταφοράς και Φυσικά Κανάλια

6.2.1 Λογικά Κανάλια

Ο Πίνακας 6.1 απαριθμεί τα λογικά κανάλια που χρησιμοποιούνται από το LTE [10]. Διακρίνονται από τις πληροφορίες που μεταφέρουν και μπορούν να ταξινομηθούν με δύο τρόπους. Πρώτον, τα λογικά κανάλια μεταφοράς μεταφέρουν δεδομένα στο

Πίνακας 6.1 Λογικά κανάλια

Channel	Release	Name	Information carried	Direction
DTCH	R8	Dedicated traffic channel	User plane data	
DCCH	R8	Dedicated control channel	Signalling on SRB 1 & 2	UL, DL
CCCH	R8	Common control channel	Signalling on SRB 0	
PCCH	R8	Paging control channel	Paging messages	
BCCH	R8	Broadcast control channel	System information	DL
MCCH	R9	Multicast control channel	MBMS signalling	
MTCH	R9	Multicast traffic channel	MBMS data	

επίπεδο χρήστη, ενώ τα λογικά κανάλια ελέγχου, μεταφέρουν μηνύματα σηματοδότησης στο επίπεδο ελέγχου. Δεύτερον, αποκλειστικά λογικά κανάλια διατίθενται σε ένα συγκεκριμένο κινητό, ενώ κοινά λογικά κανάλια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν από περισσότερα από ένα.

Τα πιο σημαντικά λογικά κανάλια είναι το *αποκλειστικό κανάλι μεταφοράς* (DTCH), το οποίο μεταφέρει τα δεδομένα προς ή από ένα κινητό, και το *αποκλειστικό κανάλι ελέγχου* (DCCH), το οποίο μεταφέρει τη μεγάλη πλειοψηφία των μηνυμάτων σηματοδότησης. Για να είμαστε ακριβείς, το DCCH μεταφέρει όλα τα, ειδικά για κινητά, μηνύματα σηματοδότησης, σε SRBs 1 και 2, για κινητά που είναι σε κατάσταση RRC_CONNECTED.

Το *κανάλι ελέγχου εκπομπής* (BCCH) μεταφέρει RRC μηνύματα πληροφοριών συστήματος, τα οποία εκπέμπει ο σταθμός βάσης σε ολόκληρη την κυψέλη, για να πει στα κινητά για το πώς έχει ρυθμιστεί η κυψέλη. Αυτά τα μηνύματα χωρίζονται σε δύο άνισες ομάδες, οι οποίες αντιμετωπίζονται διαφορετικά από τα χαμηλότερα στρώματα. Η *κύρια ομάδα πληροφοριών* (MIB) μεταφέρει μερικές σημαντικές παραμέτρους όπως το εύρος ζώνης κάτω ζεύξης, ενώ αρκετές *ομάδες πληροφοριών συστήματος* (SIBs), μεταφέρουν τις υπόλοιπες.

Το *κανάλι ελέγχου αναζήτησης* (PCCH) μεταφέρει *μηνύματα αναζήτησης*, που εκπέμπει ο σταθμός βάσης εάν επιθυμεί να επικοινωνήσει με κινητά που βρίσκονται σε RRC_IDLE. Το *κανάλι κοινού ελέγχου* (CCCH) μεταφέρει μηνύματα για σηματοδότηση του ραδιο-φορέα 0, για κινητά που κινούνται από RRC_IDLE σε RRC_CONNECTED κατά τη διαδικασία εγκατάστασης της σύνδεσης RRC.

Όπως και οι άλλοι πίνακες σε αυτό το κεφάλαιο, ο Πίνακας 6.1 απαριθμεί τα κανάλια, τα οποία παρουσιάστηκαν σε κάθε έκδοση του LTE. Το *κανάλι μεταφοράς πολυεκπομπής* (MTCH) και το *κανάλι ελέγχου πολυεκπομπής* (MCCH) εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στην LTE Έκδοση 9, για να χειριστούν μια υπηρεσία γνωστή ως η *υπηρεσία πολυμέσων εκπομπής / πολυεκπομπής* (MBMS). Θα συζητήσουμε αυτά τα κανάλια στο Κεφάλαιο 17.

6.2.2 Κανάλια Μεταφοράς

Τα κανάλια μεταφοράς [11] περιλαμβάνονται στον Πίνακα 6.2. Διακρίνονται από

Πίνακας 6.2 Κανάλια μεταφοράς

Channel	Release	Name	Information carried	Direction
UL-SCH	R8	Uplink shared channel	Uplink data and signalling	UL
RACH	R8	Random access channel	Random access requests	
DL-SCH	R8	Downlink shared channel	Downlink data and signalling	DL
PCH	R8	Paging channel	Paging messages	
BCH	R8	Broadcast channel	Master information block	
MCH	R8/R9	Multicast channel	MBMS	

τους τρόπους με τους οποίους τα χειρίζεται ο επεξεργαστής καναλιού μεταφοράς.

Τα πιο σημαντικά κανάλια μεταφοράς είναι το *κοινόχρηστο κανάλι άνω ζεύξης* (UL-SCH) και το *κοινόχρηστο κανάλι κάτω ζεύξης* (DL-SCH), τα οποία μεταφέρουν τη μεγάλη πλειοψηφία δεδομένων και μηνυμάτων σηματοδότησης σε ολόκληρη τη διεπαφή αέρα. Το *κανάλι αναζήτησης* (PCH) μεταφέρει μηνύματα αναζήτησης που προέρχονται από το PCCH. Το *κανάλι εκπομπής* (BCH) μεταφέρει την MIB του BCCH: τα υπόλοιπα μηνύματα πληροφοριών του συστήματος χειρίζονται από το DL-SCH, σαν να επρόκειτο για κανονικά δεδομένα κάτω ζεύξης. Το *κανάλι πολυεκπομπής* (MCH) ορίστηκε πλήρως στην Έκδοση 8, για να μεταφέρει δεδομένα από την MBMS. Ωστόσο, δεν ήταν στην πραγματικότητα χρησιμοποιήσιμο μέχρι την καθιέρωση της πραγματικής υπηρεσίας στην Έκδοση 9.

Ο σταθμός βάσης συνήθως προγραμματίζει τις μεταδόσεις που κάνει ένα κινητό, χορηγώντας του, πόρους για μετάδοση άνω ζεύξης σε συγκεκριμένες ώρες και σε συγκεκριμένες υπο-φέρουσες. Το *κανάλι τυχαίας πρόσβασης* (RACH) είναι ένα ειδικό κανάλι, μέσω του οποίου το κινητό μπορεί να επικοινωνήσει με το δίκτυο χωρίς κανένα προηγούμενο χρονοδιάγραμμα. Οι μεταδόσεις τυχαίας πρόσβασης αποτελούνται από το πρωτόκολλο MAC του κινητού και ταξιδεύουν, όσο το πρωτόκολλο MAC είναι στο σταθμό βάσης, αλλά είναι εντελώς άορατες σε υψηλότερα στρώματα.

Οι κύριες διαφορές μεταξύ των καναλιών μεταφοράς βρίσκονται στις προσεγγίσεις τους για έλεγχο σφαλμάτων. Ειδικότερα, τα UL-SCH και DL-SCH,

Πίνακας 6.3 Φυσικά κανάλια δεδομένων

Channel	Release	Name	Information carried	Direction
PUSCH	R8	Physical uplink shared channel	UL-SCH and/or UCI	UL
PRACH	R8	Physical random access channel	RACH	
PDSCH	R8	Physical downlink shared channel	DL-SCH and PCH	DL
PBCH	R8	Physical broadcast channel	BCH	
PMCH	R8/R9	Physical multicast channel	MCH	

είναι τα μόνα κανάλια μεταφοράς που χρησιμοποιούν τις τεχνικές ARQ και HARQ, και είναι τα μόνα κανάλια που μπορούν να προσαρμόσουν το ρυθμό κωδικοποίησής τους, σε αλλαγές στο SINR. Τα άλλα κανάλια μεταφοράς χρησιμοποιούν μόνο εμπρόσθια διόρθωση λάθους και έχουν ένα σταθερό ρυθμό κωδικοποίησης. Οι ίδιοι περιορισμοί ισχύουν για τα στοιχεία ελέγχου που θα συζητήσουμε παρακάτω.

6.2.3 Φυσικά Κανάλια Δεδομένων

Ο Πίνακας 6.3 παραθέτει τα φυσικά κανάλια δεδομένων [12]. Διακρίνονται από τους τρόπους στους οποίους ο επεξεργαστής φυσικού καναλιού τα χειρίζεται, και από τους τρόπους στους οποίους αντιστοιχούνται σε σύμβολα και υπο-φέρουσες που χρησιμοποιούνται από την OFDMA.

Τα πιο σημαντικά φυσικά κανάλια είναι το *φυσικό κοινόχρηστο κανάλι κάτω ζεύξης* (PDSCH) και το *φυσικό κοινόχρηστο κανάλι άνω ζεύξης* (PUSCH). Το PDSCH μεταφέρει δεδομένα και μηνύματα σηματοδότησης από το DL-SCH, καθώς και μηνύματα αναζήτησης από το PCH. Το PUSCH μεταφέρει δεδομένα και μηνύματα σηματοδότησης από το UL-SCH και μερικές φορές μπορεί να μεταφέρει την πληροφορία ελέγχου άνω ζεύξης που περιγράφεται παρακάτω.

Το *φυσικό κανάλι εκπομπής* (PBCH) μεταφέρει την MIB από το BCH, ενώ το *φυσικό κανάλι τυχαίας πρόσβασης* (PRACH) μεταφέρει τυχαίες μεταδόσεις πρόσβασης από το RACH. Το *φυσικό κανάλι πολυεκπομπής* (PMCH) ορίζεται πλήρως στην Έκδοση 8, για να μεταφέρει δεδομένα από το MCH, αλλά δεν είναι χρησιμοποιήσιμο μέχρι την Έκδοση 9.

Τα PDSCH και PUSCH είναι τα μόνα φυσικά κανάλια που μπορούν να προσαρμόσουν τα συστήματα διαμόρφωσής τους ως απάντηση στις αλλαγές του λαμβανόμενου SINR. Τα άλλα φυσικά κανάλια χρησιμοποιούν όλα ένα σταθερό σχέδιο διαμόρφωσης, συνήθως QPSK. Τουλάχιστον στην LTE Έκδοση 8, το PDSCH είναι το μόνο φυσικό κανάλι που χρησιμοποιεί τις τεχνικές χωρικής πολύπλεξης και beamforming από τις Ενότητες 5.2 και 5.3, ή την τεχνική διαφορικής μετάδοσης κλειστού βρόχου από την Ενότητα 5.1.2. Τα άλλα κανάλια αποστέλλονται από μία ενιαία κεραία ή μπορούν να χρησιμοποιούν διαφορική μετάδοση ανοικτού βρόχου στην περίπτωση της κάτω ζεύξης. Και πάλι, οι ίδιοι περιορισμοί ισχύουν για τα φυσικά κανάλια ελέγχου που θα καταγράψουμε παρακάτω.

6.2.4 Πληροφορίες ελέγχου

Ο επεξεργαστής μεταφοράς καναλιού συνθέτει διάφορους τύπους πληροφοριών ελέγχου, για να υποστηρίξει την χαμηλού επιπέδου λειτουργία του φυσικού στρώματος. Αυτοί παρατίθενται στον Πίνακα 6.4.

Η *πληροφορίες ελέγχου άνω ζεύξης* (UCI) περιέχουν διάφορα πεδία. Οι *επιβεβαιώσεις HARQ* είναι οι επιβεβαιώσεις κινητού των μεταδόσεων του σταθμού βάσης στο DL-SCH. Ο *δείκτης ποιότητας καναλιού* (CQI) περιγράφει τον

Πίνακας 6.4 Πληροφορίες ελέγχου

Field	Release	Name	Information carried	Direction
UCI	R8	Uplink control information	Hybrid ARQ acknowledgements Channel quality indicators (CQI) Pre-coding matrix indicators (PMI) Rank indications (RI) Scheduling requests (SR)	UL
DCI	R8	Downlink control information	Downlink scheduling commands Uplink scheduling grants Uplink power control commands	DL
CFI	R8	Control format indicator	Size of downlink control region	DL
HI	R8	Hybrid ARQ indicator	Hybrid ARQ acknowledgements	

λαμβανόμενο SINR ως μια συνάρτηση συχνότητας για την υποστήριξη του εξαρτώμενου από τη συχνότητα χρονοδιαγράμματος, ενώ ο PMI και η RI παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5 και υποστηρίζουν τη χρήση της χωρικής πολύπλεξης. Συλλογικά, οι CQI, PMI και RI είναι μερικές φορές γνωστοί ως *πληροφορίες κατάστασης καναλιού (CSI)*, αν και ο όρος αυτός στην πραγματικότητα δεν εμφανίζεται στις τεχνικές προδιαγραφές μέχρι την Έκδοση 10. Τέλος, το κινητό στέλνει ένα *αίτημα χρονοδιαγράμματος (SR)* εάν επιθυμεί να μεταδώσει τα δεδομένα άνω ζεύξης στο PUSCH, αλλά δεν έχει τους πόρους για να το κάνει.

Οι *πληροφορίες ελέγχου κάτω ζεύξης (DCI)* περιέχουν τα περισσότερα από τα πεδία ελέγχου κάτω ζεύξης. Χρησιμοποιώντας *εντολές χρονοδιαγράμματος* και *παροχές χρονοδιαγράμματος*, ο σταθμός βάσης μπορεί να ειδοποιεί το κινητό στις προσεχείς μεταδόσεις στο DL-SCH και να του χορηγήσει πόρους για τις μεταδόσεις στο UL-SCH. Μπορεί επίσης να ρυθμίσει τη δύναμη με την οποία τα κινητά τηλέφωνα εκπέμπουν, με τη χρήση των *εντολών ελέγχου ισχύος*.

Τα άλλα σύνολα πληροφοριών ελέγχου είναι λιγότερο σημαντικά. Οι *δείκτες διαμόρφωσης ελέγχου (CFIs)* ενημερώνουν τα κινητά για την οργάνωση των δεδομένων και των πληροφοριών ελέγχου στην κάτω ζεύξη, ενώ οι *δείκτες HARQ (HIs)* είναι οι επιβεβαιώσεις του σταθμού βάσης μεταδόσεων άνω ζεύξης των κινητών στο UL-SCH.

6.2.5 Φυσικά Κανάλια Ελέγχου

Τα φυσικά κανάλια ελέγχου παρατίθενται στον Πίνακα 6.5.

Στην κάτω ζεύξη, υπάρχει μια αντιστοίχιση ένα-προς-ένα μεταξύ των φυσικών καναλιών ελέγχου και των πληροφοριών ελέγχου, που αναφέρονται παραπάνω. Ως εκ τούτου, το *φυσικό κανάλι ελέγχου κάτω ζεύξης (PDCCH)*, το *φυσικό κανάλι ελέγχου του δείκτη διαμόρφωσης (PCFICH)* και το *φυσικό κανάλι δείκτη HARQ (PHICH)*, μεταφέρουν τις DCI, ελέγχουν τους CFIs και τους HIs, αντίστοιχα. Το *relay physical downlink control channel (R-PDCCH)* υποστηρίζει τη χρήση της μετεγκατάστασης και παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στην Έκδοση 10.

Πίνακας 6.5 Φυσικά κανάλια ελέγχου

Channel	Release	Name	Information carried	Direction
PUCCH	R8	Physical uplink control channel	UCI	UL
PCFICH	R8	Physical control format indicator channel	CFI	
PHICH	R8	Physical hybrid ARQ indicator channel	HI	DL
PDCCH	R8	Physical downlink control channel	DCI	
R-PDCCH	R10	Relay physical downlink control channel	DCI	

Οι UCI αποστέλλονται στο PUSCH εάν το κινητό εκπέμπει δεδομένα άνω ζεύξης ταυτόχρονα, και διαφορετικά, στο φυσικό κανάλι ελέγχου άνω ζεύξης (PUCCH). Τα PUSCH και PUCCH μεταδίδονται σε διαφορετικά σύνολα υποφερουσών, έτσι η διάταξη αυτή διατηρεί το χαρακτήρα ενιαίου φέροντος της μετάδοσης άνω ζεύξης, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του SC-FDMA.

6.2.6 Φυσικά Σήματα

Οι τελικές ροές πληροφοριών είναι τα φυσικά σήματα, τα οποία υποστηρίζουν το χαμηλότερο επίπεδο λειτουργίας του φυσικού επιπέδου. Αυτές παρατίθενται στον Πίνακα 6.6.

Στην άνω ζεύξη, το κινητό μεταδίδει το σήμα αναφοράς αποδιαμόρφωσης (DRS) την ίδια στιγμή με τα PUSCH και PUCCH, ως μια φάση αναφοράς που προορίζεται για την εκτίμηση καναλιού. Μπορεί επίσης να μεταδώσει το σήμα αναφοράς ήχησης (SRS) κατά περιόδους που έχουν διαμορφωθεί από το σταθμό βάσης, ως μια αναφορά ισχύος για την υποστήριξη του εξαρτώμενου από τη συχνότητα χρονοδιαγράμματος.

Η κάτω ζεύξη συνδυάζει συνήθως τους δύο αυτούς ρόλους υπό τη μορφή του ειδικού σήματος αναφοράς κοψέλης (RS). Τα UE ειδικά σήματα αναφοράς είναι λιγότερο σημαντικά και αποστέλλονται σε κινητά που χρησιμοποιούν beamforming

Πίνακας 6.6 Φυσικά σήματα

Signal	Release	Name	Use	Direction
DRS	R8	Demodulation reference signal	Channel estimation	UL
SRS	R8	Sounding reference signal	Scheduling	
PSS	R8	Primary synchronization signal	Acquisition	DL
SSS	R8	Secondary synchronization signal	Acquisition	
	R8	Cell specific reference signal	Channel estimation and scheduling	
	R8	UE specific reference signal	Channel estimation	
RS	R8/R9	MBMS reference signal	Channel estimation	DL
	R9	Positioning reference signal	Location services	
	R10	CSI reference signal	Scheduling	

για τη στήριξη της εκτίμησης καναλιού. Οι προδιαγραφές εισάγουν άλλα σήματα αναφοράς κάτω ζεύξης ως μέρος των Εκδόσεων 9 και 10. Ο σταθμός βάσης μεταδίδει επίσης δύο άλλα φυσικά σήματα, που βοηθούν το κινητό να αποκτήσει το σταθμό βάσης αφού πρώτα ενεργοποιηθεί. Αυτά είναι γνωστά ως το *πρωτεύον σήμα συγχρονισμού* (PSS) και το *δευτερεύον σήμα συγχρονισμού* (SSS).

6.2.7 Ροές Πληροφοριών

Οι Πίνακες 6.1 έως 6.6 περιέχουν ένα μεγάλο αριθμό καναλιών, αλλά το LTE τα χρησιμοποιεί σε λίγους τύπους ροών πληροφοριών. Το Σχήμα 6.2 δείχνει τις ροές πληροφοριών που χρησιμοποιούνται στην άνω ζεύξη, με τα βέλη που προέρχονται από την άποψη του σταθμού βάσης, ούτως ώστε τα κανάλια άνω ζεύξης να έχουν βέλη που δείχνουν προς τα πάνω, και αντίστροφα. Το Σχήμα 6.3 δείχνει την αντίστοιχη κατάσταση στην κάτω ζεύξη.

6.3 Ο Πόρος Δικτύου

6.3.1 Δομή Σχισμής

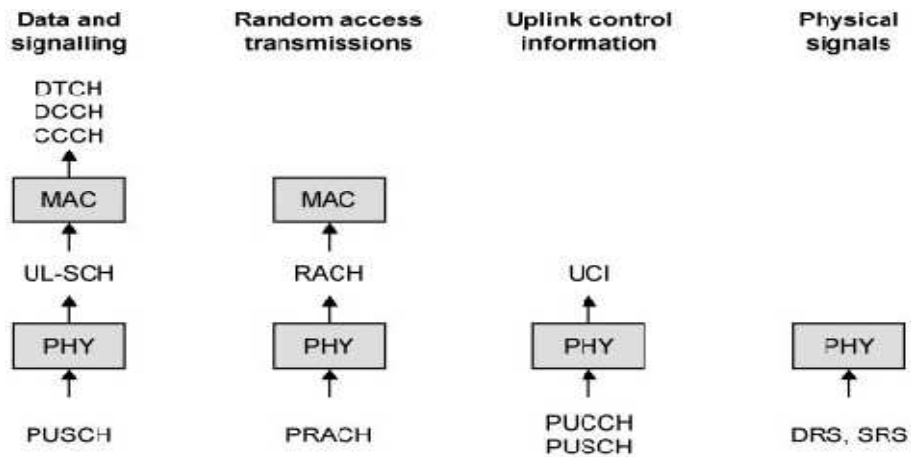
Το LTE σχεδιάζει τα φυσικά κανάλια και τα φυσικά σήματα πάνω στα σύμβολα OFDMA και τις υπο-φέρουσες, που παρουσιάσαμε στο Κεφάλαιο 4. Για να καταλάβουμε πώς το κάνει αυτό, πρέπει πρώτα να κατανοήσουμε πώς το LTE οργανώνει τα σύμβολα και τις υπο-φέρουσές του στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας [13].

Πρώτα εξετάζουμε το πεδίο του χρόνου. Το χρονοδιάγραμμα των LTE μεταδόσεων βασίζεται σε μια μονάδα χρόνου T_s , η οποία ορίζεται ως εξής:

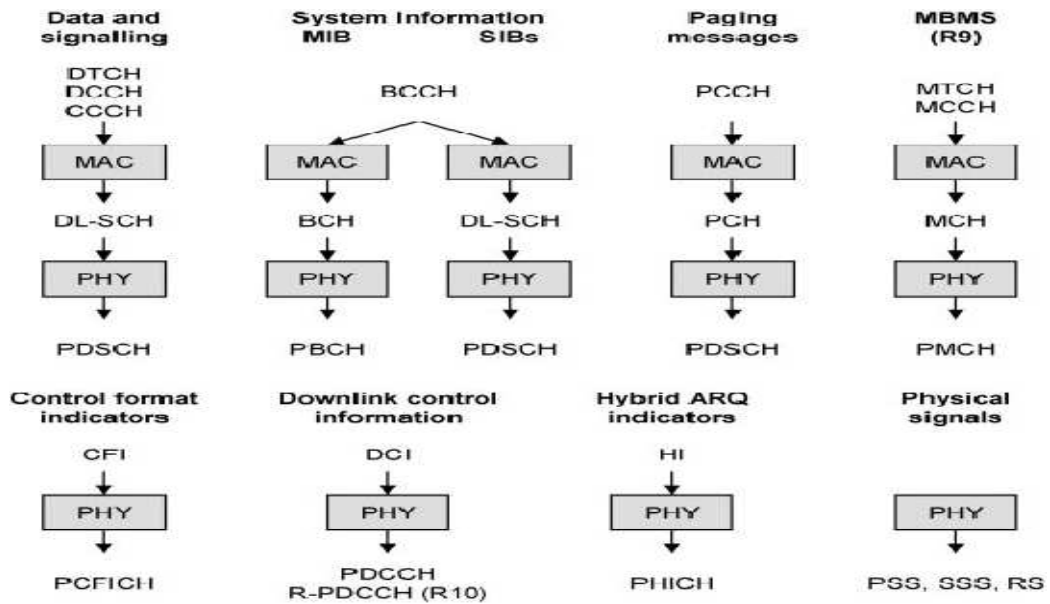
$$T_s = \frac{1}{2048 \times 15000} \text{ seconds} \approx 32.6 \text{ ns} \quad (6.1)$$

T_s είναι το συντομότερο χρονικό διάστημα που παρουσιάζει ενδιαφέρον για τον επεξεργαστή φυσικού καναλιού. (Για να είμαστε ακριβείς, το T_s είναι το διάστημα δειγματοληψίας αν το σύστημα χρησιμοποιεί έναν FFT που περιέχει 2048 σημεία, τα οποία είναι η μεγαλύτερη τιμή που είναι ποτέ δυνατό να χρησιμοποιηθεί). Η διάρκεια συμβόλου των 66.7 μs είναι τότε ίση με 2048 T_s .

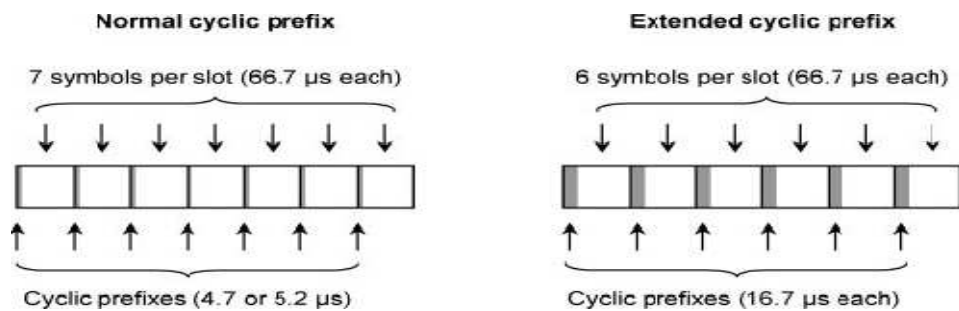
Τα σύμβολα ομαδοποιούνται σε *σχισμές*, των οποίων η διάρκεια είναι 0.5 μs (15 360 T_s). Αυτό μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4. Με το *κανονικό CP*, κάθε σύμβολο προηγείται ενός CP που έχει συνήθως 144 T_s (4.7 μs) μήκος. Το πρώτο CP έχει μια μεγαλύτερη διάρκεια των 160 T_s (5.2 μs), για να τακτοποιήσει την ανομοιομορφία που προκύπτει από την τοποθέτηση επτά συμβόλων σε μια σχισμή.



Σχήμα 6.2 Ροές πληροφοριών άνω ζεύξης που χρησιμοποιούνται από το LTE.



Σχήμα 6.3 Ροές πληροφοριών κάτω ζεύξης που χρησιμοποιούνται από το LTE.



Σχήμα 6.4 Οργάνωση των συμβόλων σε σχισμές χρησιμοποιώντας το κανονικό και εκτεταμένο CP.

Χρησιμοποιώντας το κανονικό CP, ο δέκτης μπορεί να αφαιρέσει την ISI με καθυστέρηση διάδοσης 4.7 μs , που αντιστοιχεί σε μία διαφορά διάδοσης των 1.4 km μεταξύ των μηκών των μακρύτερων και συντομότερων ακτίνων. Αυτό είναι συνήθως πολύ, αλλά μπορεί να μην είναι αρκετό εάν η κυψέλη είναι ασυνήθιστα μεγάλη ή γεμάτη. Για την αντιμετώπιση αυτής της πιθανότητας, το LTE υποστηρίζει επίσης ένα *εκτεταμένο κυκλικό πρόθεμα*, στο οποίο ο αριθμός συμβόλων ανά σχισμή, μειώνεται στο έξι. Αυτό επιτρέπει στο CP να επεκταθεί σε 512 T_s (16.7 μs), για να υποστηρίξει μια μέγιστη διαφορά διάδοσης των 5 km.

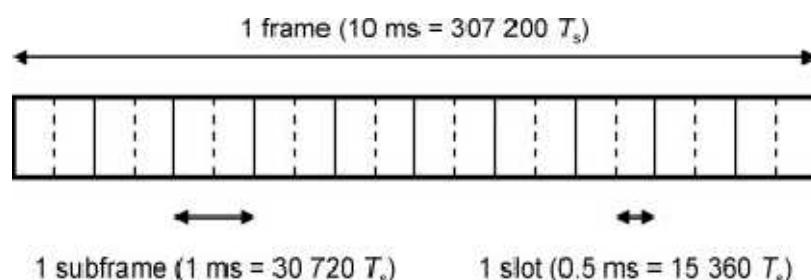
Με μία εξαίρεση, που σχετίζεται με την MBMS στην Έκδοση 9, ο σταθμός βάσης εμμένει είτε με το κανονικό είτε με το εκτεταμένο CP στην κάτω ζεύξη και δεν αλλάζει μεταξύ των δύο. Τα κινητά χρησιμοποιούν συνήθως την ίδια διάρκεια CP στην άνω ζεύξη, αλλά ο σταθμός βάσης μπορεί να επιβάλει μια διαφορετική επιλογή με τη χρήση των πληροφοριών του συστήματός του. Το κανονικό CP είναι πολύ πιο συνηθισμένο, έτσι θα το χρησιμοποιήσουμε σχεδόν αποκλειστικά.

6.3.2 Δομή Πλαισίου

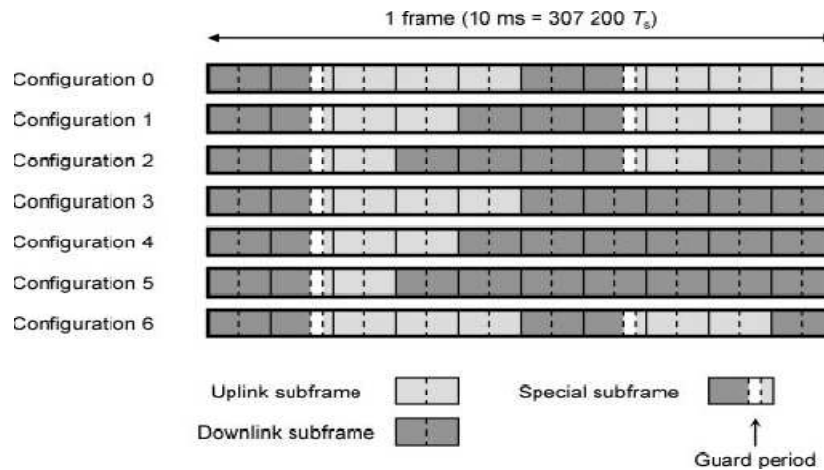
Σε ένα υψηλότερο επίπεδο, οι σχισμές ομαδοποιούνται σε υποπλαίσια και πλαίσια [14]. Σε κατάσταση FDD, αυτό γίνεται με τη χρήση *δομής πλαισίου τύπου 1*, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 6.5.

Δύο σχισμές κάνουν ένα *υποπλαίσιο*, το οποίο έχει μήκος 1ms (30 720 T_s). Τα υποπλαίσια χρησιμοποιούνται για χρονοπρογραμματισμό. Όταν ένας σταθμός βάσης μεταδίδει σε ένα κινητό στην κάτω ζεύξη, προγραμματίζει τις PDSCH μεταδόσεις του ένα υποπλαίσιο κάθε φορά, και αντιστοιχεί κάθε ομάδα δεδομένων σε μια σειρά από υπο-φέρουσες εντός αυτού του υποπλαισίου. Μια παρόμοια διαδικασία συμβαίνει στην άνω ζεύξη.

Με τη σειρά τους, 10 υποπλαίσια κάνουν ένα *πλαίσιο*, το οποίο έχει μήκος 10 ms (307 200 T_s). Κάθε πλαίσιο είναι αριθμημένο χρησιμοποιώντας έναν *αριθμό πλαισίου συστήματος* (SFN), ο οποίος τρέχει επανειλημμένα από το 0 έως το 1023. Τα πλαίσια βοηθούν να προγραμματίσουμε έναν αριθμό βραδέως μεταβαλλόμενων διαδικασιών, όπως είναι η μετάδοση των πληροφοριών του συστήματος και των



Σχήμα 6.5 Δομή πλαισίου τύπου 1, που χρησιμοποιείται σε κατάσταση FDD. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI.



Σχήμα 6.6 Διαμορφώσεις TDD χρησιμοποιώντας δομή πλαισίου τύπου 2.

σημάτων αναφοράς.

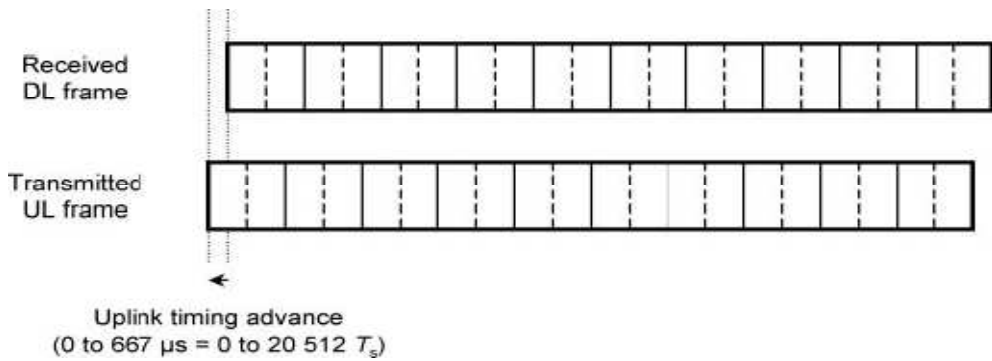
Η κατάσταση TDD χρησιμοποιεί *δομή πλαισίου τύπου 2*. Σε αυτή τη δομή, οι σχισμές, τα υποπλαίσια και τα πλαίσια έχουν την ίδια διάρκεια όπως και πριν, αλλά κάθε υποπλαίσιο μπορεί να διατεθεί είτε στην άνω ζεύξη είτε στην κάτω ζεύξη, χρησιμοποιώντας μία από τις *διαμορφώσεις TDD* που φαίνονται στο Σχήμα 6.6.

Διαφορετικές κυψέλες μπορεί να έχουν διαφορετικές διαμορφώσεις TDD, που προβάλλονται ως μέρος των πληροφοριών συστήματος των κυψελών. Η διαμόρφωση 1 μπορεί να είναι κατάλληλη αν οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων είναι παρόμοιοι στην άνω και κάτω ζεύξη, για παράδειγμα, ενώ η διαμόρφωση 5 θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες οι οποίες κυριαρχούνται από μεταδόσεις κάτω ζεύξης. Οι κοντινές κυψέλες θα πρέπει κατά κανόνα να χρησιμοποιούν την ίδια διάταξη TDD, για να ελαχιστοποιήσουν την παρεμβολή μεταξύ της άνω και κάτω ζεύξης.

Ειδικά υποπλαίσια χρησιμοποιούνται στις μεταβάσεις από τη μετάδοση κάτω ζεύξης στην άνω ζεύξη. Περιέχουν τρεις περιοχές. Η *ειδική περιοχή κάτω ζεύξης* καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του υποπλαισίου και χρησιμοποιείται με τον ίδιο τρόπο όπως και κάθε άλλη περιοχή κάτω ζεύξης. Η *ειδική περιοχή άνω ζεύξης* είναι μικρότερη, και χρησιμοποιείται μόνο από το RACH και το SRS. Οι δύο περιοχές διαχωρίζονται από μία *GP* που υποστηρίζει τη διαδικασία προήγησης χρόνου που περιγράφεται παρακάτω. Η κυψέλη μπορεί να προσαρμόσει το μέγεθος της κάθε περιοχής χρησιμοποιώντας μια *ειδική διαμόρφωση υποπλαισίου*, που και πάλι δημοσιεύεται στις πληροφορίες συστήματος.

6.3.3 Προήγηση Χρόνου Άνω Ζεύξης

Στο LTE, ένα κινητό αρχίζει να μεταδίδει τα πλαίσια της άνω ζεύξης του, σε ένα χρόνο TA πριν από την άφιξη των αντίστοιχων πλαισίων της κάτω ζεύξης [15] (Σχήμα 6.7). Ο TA είναι γνωστός ως *προήγηση χρόνου* και χρησιμοποιείται για τον ακόλουθο λόγο. Ακόμα και ταξιδεύοντας με την ταχύτητα του φωτός, οι μεταδόσεις



Σχήμα 6.7 Σχέση χρονισμού μεταξύ άνω και κάτω ζεύξης σε κατάσταση FDD. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI.

ενός κινητού χρειάζονται χρόνο (συνήθως λίγα microseconds) για να φτάσουν στο σταθμό βάσης. Ωστόσο, τα σήματα από διαφορετικά κινητά πρέπει να φτάσουν στο σταθμό βάσης περίπου την ίδια ώρα, με μια διάδοση λιγότερη από ό, τι τη διάρκεια CP, για να αποτραπεί κάθε κίνδυνος ISI ανάμεσά τους. Για την επιβολή αυτής της απαίτησης, μακρινά κινητά πρέπει να ξεκινήσουν τη μετάδοση λίγο νωρίτερα από ό,τι θα ήταν διαφορετικά.

Επειδή ο χρόνος μετάδοσης άνω ζεύξης βασίζεται στο χρόνο άφιξης κάτω ζεύξης, η προήγηση χρόνου πρέπει να αναπληρώσει για το χρόνο ταξιδιού μετ' επιστροφής μεταξύ του σταθμού βάσης και του κινητού:

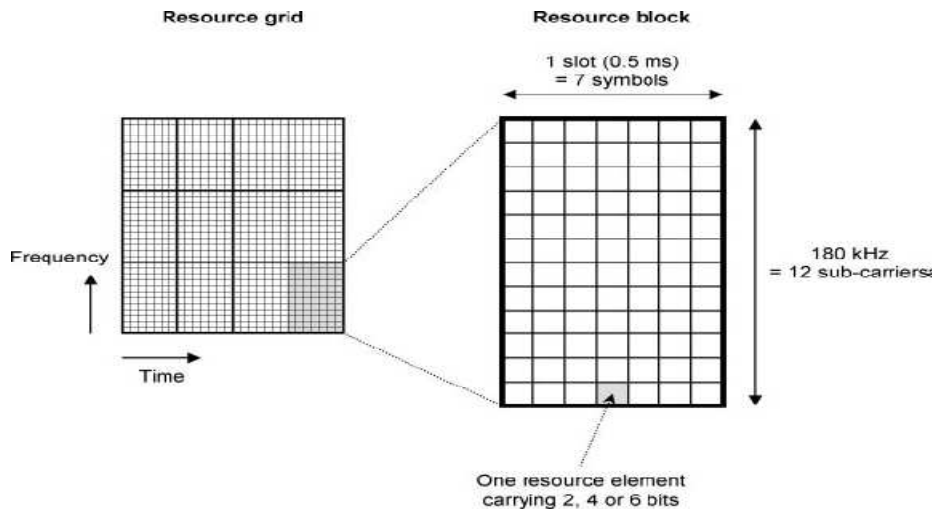
$$TA \approx 2L / c \quad (6.2)$$

Εδώ, L είναι η απόσταση μεταξύ του κινητού και του σταθμού βάσης, και c είναι η ταχύτητα του φωτός. Η προήγηση χρόνου δεν πρέπει να είναι απολύτως ακριβής, καθώς το CP μπορεί να χειριστεί όλα τα υπόλοιπα λάθη. Οι προδιαγραφές καθορίζουν την προήγηση χρόνου ως εξής:

$$TA = (N_{TA} + N_{TAoffset}) T_s \quad (6.3)$$

Εδώ, το N_{TA} βρίσκεται μεταξύ 0 και 20 512. Αυτό δίνει μια μέγιστη προήγηση χρόνου περίπου 667 μs (δύο τρίτα του υποπλαίσιου), το οποίο υποστηρίζει ένα μέγιστο μέγεθος κυψέλης, των 100 km. Το N_{TA} ξεκινά με τη μέθοδο τυχαίας πρόσβασης που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 9, και ενημερώνεται με τη διαδικασία προήγησης χρόνου από το Κεφάλαιο 10.

Το $N_{TAoffset}$ είναι μηδέν σε κατάσταση FDD, αλλά 624 σε κατάσταση TDD. Αυτό δημιουργεί ένα μικρό κενό κατά τη μετάβαση από τις μεταδόσεις άνω ζεύξης σε κάτω ζεύξη, το οποίο δίνει στο σταθμό βάσης χρόνο για τη μετάβαση από τη μια στην άλλη. Η GP σε κάθε ειδικό υποπλαίσιο δημιουργεί ένα μεγαλύτερο κενό κατά τη μετάβαση από την κάτω ζεύξη στην άνω ζεύξη, που επιτρέπει στο κινητό να προωθήσει τα πλαίσια άνω ζεύξης της, χωρίς αυτά να συγκρούονται με τα πλαίσια που λαμβάνονται στην κάτω ζεύξη.



Σχήμα 6.8 Δομή πόρου δικτύου LTE στα πεδία χρόνου και συχνότητας, χρησιμοποιώντας ένα κανονικό CP.

6.3.4 Δομή Πλέγματος Πόρου

Στο LTE, οι πληροφορίες οργανώνονται ως μια συνάρτηση της συχνότητας καθώς και του χρόνου, χρησιμοποιώντας ένα πλέγμα πόρου [16]. Το Σχήμα 6.8 δείχνει το πλέγμα πόρου για την περίπτωση ενός κανονικού CP. (Υπάρχει ένα παρόμοιο πλέγμα για το εκτεταμένο CP, το οποίο χρησιμοποιεί έξι σύμβολα ανά σχισμή αντί για επτά).

Η βασική μονάδα είναι ένα στοιχείο πόρου (RE), που καλύπτει ένα σύμβολο από μια υπο-φέρουσα. Κάθε RE φέρνει συνήθως δύο, τέσσερα ή έξι bits φυσικού καναλιού, ανάλογα με το αν το σύστημα διαμόρφωσης είναι QPSK, 16-QAM ή 64-QAM. Τα RE χωρίζονται σε ομάδες πόρων (RBs), καθεμιά από τις οποίες καλύπτει 0.5 ms (μία σχισμή), από 180 kHz (δώδεκα υπο-φέρουσες). Ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί RBs για χρονοδιάγραμμα που εξαρτάται από τη συχνότητα, κατανέμοντας τα σύμβολα και τις υπο-φέρουσες μέσα σε κάθε υποπλαίσιο σε μονάδες των RBs.

6.3.5 Επιλογές Εύρους Ζώνης

Μια κυψέλη μπορεί να διαμορφωθεί με πολλά διαφορετικά εύρη ζώνης [17], τα οποία παρατίθενται στον Πίνακα 6.7. Σε μία ζώνη των 5 MHz, για παράδειγμα, ο σταθμός βάσης εκπέμπει χρησιμοποιώντας 25 RBs (300 υπο-φέρουσες), δίνοντας ένα εύρος ζώνης μετάδοσης των 4.5 MHz. Ο κανονισμός αυτός αφήνει περιθώρια για ζώνες φύλαξης στα άνω και κάτω άκρα της ζώνης συχνοτήτων, οι οποίες ελαχιστοποιούν το ποσό της παρεμβολής με την επόμενη ζώνη μαζί. Οι δύο ζώνες φύλαξης έχουν συνήθως το ίδιο πλάτος, αλλά ο φορέας εκμετάλλευσης δικτύου μπορεί να τις προσαρμόσει εάν είναι απαραίτητο, μετατοπίζοντας την κεντρική συχνότητα σε μονάδες των 100 kHz.

Η ύπαρξη όλων αυτών των επιλογών εύρους ζώνης, καθιστά εύκολο για τους

Πίνακας 6.7 Εύρη ζώνης κυψελών που υποστηρίζονται από το LTE

Total bandwidth	Number of resource blocks	Number of sub-carriers	Occupied bandwidth	Usual guard bands
1.4 MHz	6	72	1.08 MHz	2 × 0.16 MHz
3 MHz	15	180	2.7 MHz	2 × 0.15 MHz
5 MHz	25	300	4.5 MHz	2 × 0.25 MHz
10 MHz	50	600	9 MHz	2 × 0.5 MHz
15 MHz	75	900	13.5 MHz	2 × 0.75 MHz
20 MHz	100	1200	18 MHz	2 × 1 MHz

φορείς εκμετάλλευσης δικτύων να αναπτύξουν LTE σε μια ποικιλία συστημάτων διαχείρισης του ραδιοφάσματος. Για παράδειγμα, τα 1.4 MHz είναι κοντά στα εύρη ζώνης που χρησιμοποιήθηκαν προηγουμένως από το cdma2000 και το TD-SCDMA, 5 MHz είναι το ίδιο εύρος ζώνης που χρησιμοποιήθηκε από το WCDMA, ενώ 20 MHz επιτρέπουν σε ένα σταθμό βάσης LTE να λειτουργήσει στον υψηλότερο δυνατό ρυθμό δεδομένων του. Σε κατάσταση FDD, τα εύρη ζώνης άνω και κάτω ζεύξης είναι συνήθως τα ίδια. Αν είναι διαφορετικά, τότε ο σταθμός βάσης σηματοδοτεί το εύρος ζώνης άνω ζεύξης ως μέρος των πληροφοριών του συστήματος.

Στο Κεφάλαιο 4, διαπιστώσαμε ότι ο FFT λειτουργεί πιο αποτελεσματικά εάν ο αριθμός των σημείων δεδομένων είναι μια ακριβής δύναμη του 2. Αυτό είναι εύκολο να επιτευχθεί, διότι ο πομπός μπορεί απλά να στρογγυλοποιεί προς τα πάνω τον αριθμό των υπο-φερουσών στην επόμενη υψηλότερη δύναμη του 2, και μπορεί να καλύψει τα άκρα αυτά με μηδενικά. Σε ένα εύρος ζώνης των 20 MHz, για παράδειγμα, θα επεξεργάζεται γενικά τα δεδομένα χρησιμοποιώντας ένα σημείο 2048 FFT, το οποίο είναι σύμφωνο με την αξία του T_s που παρουσιάσαμε νωρίτερα.

6.4 Μετάδοση Πολλαπλών Κεραιών

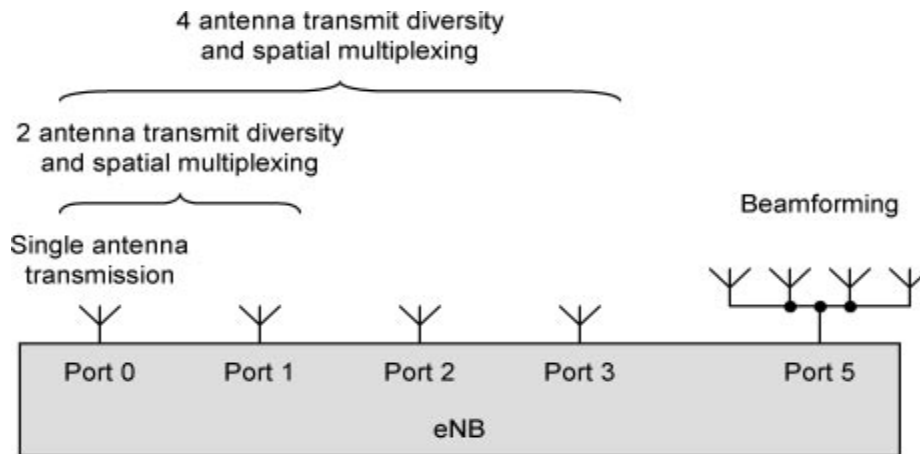
6.4.1 Θύρες Κεραιών Κάτω Ζεύξης

Στην κάτω ζεύξη, οι μεταδόσεις πολλαπλών κεραιών οργανώνονται χρησιμοποιώντας *θύρες κεραιών*, καθεμιά από τις οποίες έχει το δικό της αντίγραφο του πλέγματος πόρου που παρουσιάσαμε παραπάνω. Ο Πίνακας 6.8 παραθέτει τις θύρες κεραιών σταθμού βάσης που χρησιμοποιεί το LTE. Οι θύρες 0 έως 3 χρησιμοποιούνται για μία κεραία μετάδοσης, διαφορικής μετάδοσης και χωρικής πολύπλεξης, ενώ η θύρα 5 προορίζεται για beamforming. Οι υπόλοιπες θύρες κεραιών παρουσιάζονται στις Εκδόσεις 9 και 10, και θα έχουν καλυφθεί προς το τέλος του βιβλίου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι μια θύρα κεραίας δεν είναι απαραίτητα η ίδια με μια φυσική κεραία: αντ' αυτού, είναι μια έξοδος από τον πομπό σταθμού βάσης που μπορεί να οδηγήσει μία ή περισσότερες φυσικές κεραίες. Ειδικότερα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.9, η θύρα 5 θα οδηγεί πάντα πολλές φυσικές κεραίες, τις οποίες ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί για beamforming.

Πίνακας 6.8 Θύρες κεραιών που χρησιμοποιούνται από το LTE κάτω ζεύξης

Antenna port	Release	Application
0	R8	Single antenna transmission
1	R8	2 and 4 antenna transmit diversity and spatial multiplexing
2	R8	2 and 4 antenna transmit diversity and spatial multiplexing
3	R8	4 antenna transmit diversity and spatial multiplexing
4	R8/R9	MBMS
5	R8	Beamforming
6	R9	Positioning reference signals
7–8	R9	Dual layer beamforming
9–14	R10	8 antenna spatial multiplexing
15–22	R10	CSI reference signals



Σχήμα 6.9 Θύρες κεραιών που χρησιμοποιούνται από ένα σταθμό βάσης της Έκδοσης 8.

Πίνακας 6.9 Τρόποι μετάδοσης κάτω ζεύξης

Mode	Release	Purpose	Uplink feedback required		
			CQI	RI	PMI
1	R8	Single antenna transmission	✓		
2	R8	Open loop transmit diversity	✓		
3	R8	Open loop spatial multiplexing	✓	✓	
4	R8	Closed loop spatial multiplexing	✓	✓	✓
5	R8	Multiple user MIMO	✓		✓
6	R8	Closed loop transmit diversity	✓		✓
7	R8	Beamforming	✓		
8	R9	Dual layer beamforming	✓	Configurable	
9	R10	Eight layer spatial multiplexing	✓	Configurable	

6.4.2 Τρόποι Μετάδοσης Κάτω Ζεύξης

Για την υποστήριξη της χρήσης πολλαπλών κεραιών, ο σταθμός βάσης μπορεί να ρυθμίσει προαιρετικά το κινητό σε έναν από τους *τρόπους μετάδοσης κάτω ζεύξης* που παρατίθενται στον Πίνακα 6.9. Ο τρόπος μετάδοσης καθορίζει το είδος της επεξεργασίας πολλαπλών κεραιών που θα χρησιμοποιήσει ο σταθμός βάσης για τις μεταδόσεις του στο PDSCH, και ως εκ τούτου το είδος της επεξεργασίας που το κινητό θα πρέπει να χρησιμοποιεί για τη λήψη PDSCH. Ορίζει επίσης την ανάδραση που ο σταθμός βάσης θα περιμένει από το κινητό, με τον τρόπο που αναφέρεται στον πίνακα.

Αν ο σταθμός βάσης δεν ρυθμίσει το κινητό με αυτόν τον τρόπο, τότε μεταδίδει το PDSCH χρησιμοποιώντας είτε μια ενιαία κεραία είτε διαφορική μετάδοση ανοικτού βρόχου, ανάλογα με το συνολικό αριθμό των θυρών κεραίας που έχει.

6.5 Αντιστοίχιση RE

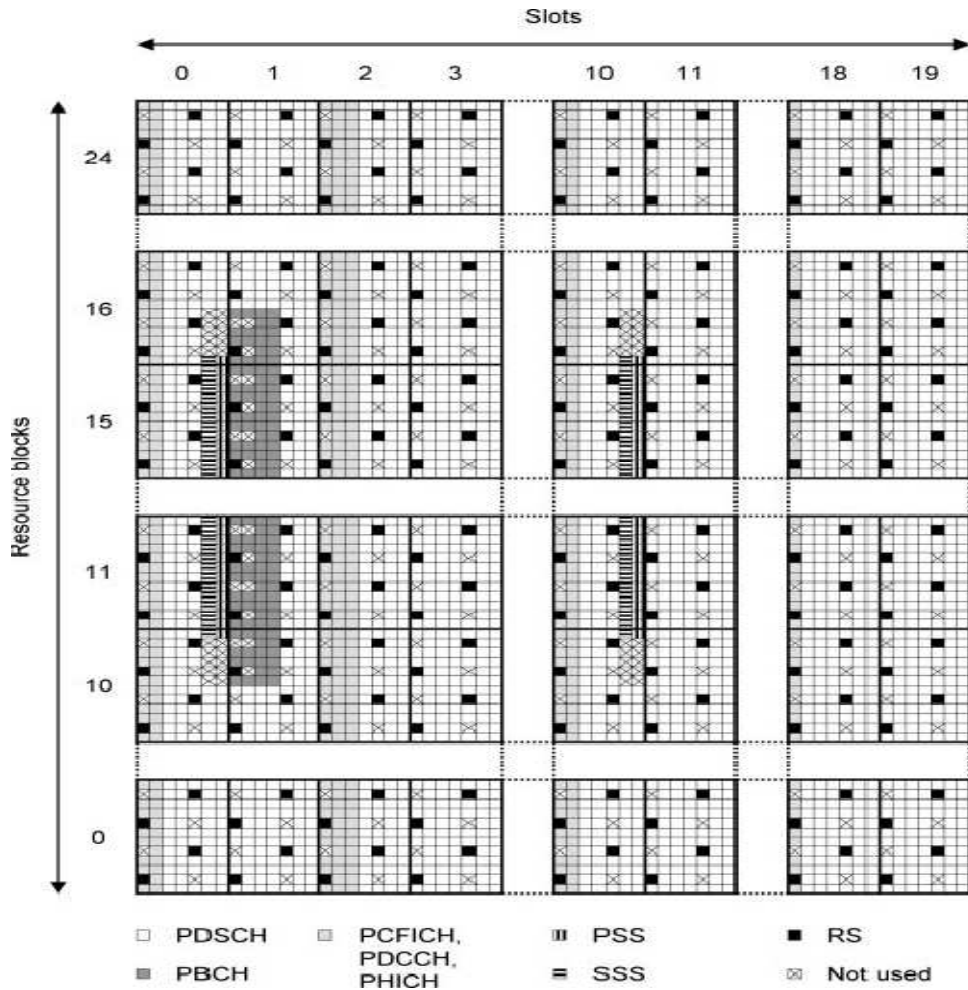
6.5.1 Αντιστοίχιση RE Κάτω Ζεύξης

Το φυσικό στρώμα LTE μεταδίδει τα φυσικά κανάλια και τα φυσικά σήματα αντιστοιχίζοντάς τα πάνω στα RE που παρουσιάσαμε παραπάνω. Η ακριβής αντιστοίχιση εξαρτάται από την ακριβή διαμόρφωση του σταθμού βάσης και του κινητού, έτσι θα καλύψουμε ένα κανάλι τη φορά, ως μέρος των Κεφαλαίων 7 έως 9. Ωστόσο, είναι κατατοπιστικό να δείξουμε κάποια παραδείγματα αντιστοίχισης για την άνω και κάτω ζεύξη, για μια τυπική διαμόρφωση συστήματος.

Το Σχήμα 6.10 δείχνει ένα παράδειγμα αντιστοίχισης RE για την κάτω ζεύξη. Το σχήμα υποθέτει τη χρήση κατάστασης FDD, κανονικού CP και ενός εύρους ζώνης των 5 MHz. Ο χρόνος σχεδιάζεται οριζόντια και καλύπτει τις 20 σχισμές που συνθέτουν ένα πλαίσιο. Η συχνότητα σχεδιάζεται κατακόρυφα και καλύπτει τις 25 RBs που συνθέτουν τη ζώνη μετάδοσης.

Τα RS, είναι διασκορπισμένα στα πεδία χρόνου και συχνότητας. Ενώ μία θύρα κεραίας στέλνει ένα σήμα αναφοράς, οι άλλες σταματούν να λειτουργούν, έτσι ώστε το κινητό να μπορεί να μετρήσει το λαμβανόμενο σήμα αναφοράς από μία θύρα κεραίας κάθε φορά. Το διάγραμμα προϋποθέτει τη χρήση δύο θυρών κεραιών και δείχνει τα σήματα αναφοράς που στέλνονται από τη θύρα 0. Η ακριβής αντιστοίχιση εξαρτάται από τη φυσική ταυτότητα κυψέλης από το Κεφάλαιο 2: η μια που εμφανίζεται είναι κατάλληλη για μια φυσική ταυτότητα κυψέλης των 1, 7, 13,...

Μέσα σε κάθε πλαίσιο, ορισμένα RE προορίζονται για τα PSS και SSS και για το PBCH, και διαβάζονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αναγνώρισης που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 7. Αυτές οι πληροφορίες αποστέλλονται μόνο στις κεντρικές 72 υπο-φέρουσες (1.08 MHz), που είναι το στενότερο εύρος ζώνης που χρησιμοποιήθηκε ποτέ από το LTE. Αυτό επιτρέπει στο κινητό να το διαβάσει χωρίς προηγούμενη γνώση του εύρους ζώνης κάτω ζεύξης.



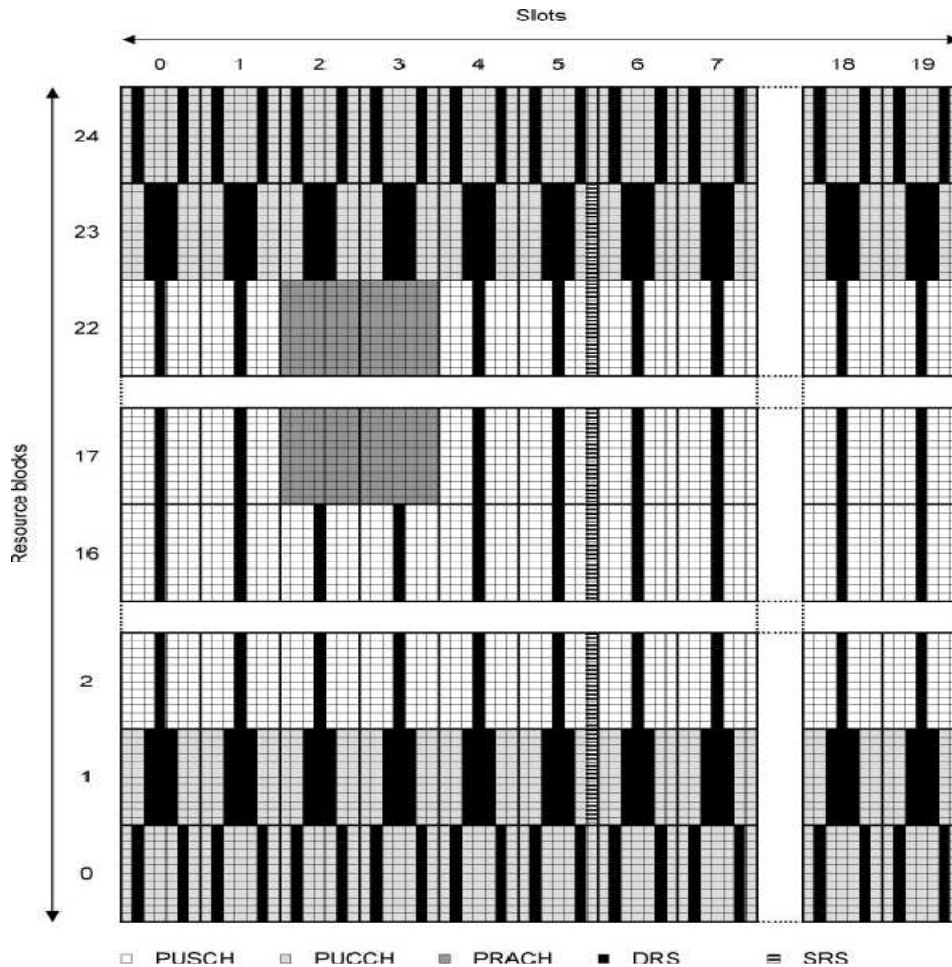
Σχήμα 6.10 Παράδειγμα αντιστοίχισης φυσικών καναλιών σε RE κάτω ζεύξης, χρησιμοποιώντας κατάσταση FDD, ένα κανονικό CP, ένα εύρος ζώνης 5MHz, την πρώτη θύρα κεραίας των δύο και μια φυσική κυψέλη ID 1.

Κατά την έναρξη κάθε υποπλαισίου, μερικά σύμβολα προορίζεται για τα στοιχεία ελέγχου που ο σταθμός βάσης εκπέμπει στα PCFICH, PDCCH και PHICH. Ο αριθμός των συμβόλων ελέγχου μπορεί να ποικίλλει από το ένα υποπλαίσιο στο επόμενο, ανάλογα με το πόσες πληροφορίες ελέγχου πρέπει να στείλει ο σταθμός βάσης. Το υπόλοιπο του υποπλαισίου προορίζεται για μεταδόσεις δεδομένων στο PDSCH και κατανέμεται σε επιμέρους κινητά, σε μονάδες RBs σε κάθε υποπλαίσιο.

6.5.2 Αντιστοίχιση RE Άνω Ζεύξης

Το Σχήμα 6.11 δείχνει την αντίστοιχη κατάσταση στην άνω ζεύξη. Για άλλη μια φορά, το σχήμα υποθέτει τη χρήση κατάστασης FDD, του κανονικού CP και ενός εύρους ζώνης 5 MHz.

Τα εξωτερικά τμήματα της ζώνης προορίζονται για UCI στο PUCCH, και για τα συνδεδεμένα DRS. Το PUCCH μπορεί να σταλεί σε διάφορες μορφές, ανάλογα με



Σχήμα 6.11 Παράδειγμα αντιστοίχισης φυσικών καναλιών σε RE άνω ζεύξης, χρησιμοποιώντας κατάσταση FDD, ένα κανονικό CP, ένα εύρος ζώνης 5MHz, και παράδειγμα διαμορφώσεις για τα PUCCH, PRACH και SRS.

την πληροφορία που πρέπει να μεταδώσει το κινητό. Στο παράδειγμα που παρουσιάζεται, μια ομάδα πόρων είναι αποκλειστικά σε κάθε άκρο για PUCCH μορφές γνωστές ως 2, 2a και 2b, οι οποίες έχουν πέντε σύμβολα ελέγχου ανά σχισμή και δύο σύμβολα αναφοράς. Η επόμενη ομάδα πόρων χρησιμοποιείται από PUCCH μορφές 1, 1a και 1b, οι οποίες έχουν τέσσερα σύμβολα ελέγχου ανά σχισμή και τρία σύμβολα αναφοράς.

Το υπόλοιπο της ζώνης χρησιμοποιείται κυρίως από το PUSCH και κατανέμεται σε επιμέρους κινητά σε μονάδες RBs, σε κάθε υποπλάισιο. Οι PUSCH μεταδόσεις περιέχουν έξι σύμβολα ανά σχισμή και ένα σύμβολο αναφοράς.

Ο σταθμός βάσης διατηρεί επίσης, ορισμένες RBs για μεταδόσεις τυχαίας πρόσβασης στο PRACH. Το PRACH έχει ένα εύρος ζώνης από έξι RBs και μια διάρκεια από ένα έως τρία υποπλάισια, ενώ οι θέσεις του στο πλέγμα πόρου έχουν ρυθμιστεί από το σταθμό βάσης. Στο παράδειγμα που παρουσιάζεται, ο σταθμός βάσης έχει διατηρήσει το άνω άκρο της περιοχής δεδομένων στο υποπλάισιο 1 (σχισμές 2 και 3), αλλά και πολλές άλλες διαμορφώσεις είναι δυνατές.

Επιπλέον, ο σταθμός βάσης μπορεί να διατηρήσει το τελευταίο σύμβολο

ορισμένων υποπλαισίων για τη μετάδοση SRS. Στο παράδειγμα που παρουσιάζεται, αυτά μπορεί να λάβουν χώρα στο τελευταίο σύμβολο του υποπλαισίου 2 (σχισμή 5). Εντός της αποκλειστικής περιοχής, το κινητό εκπέμπει σε εναλλακτικές υποφέρουσες, χρησιμοποιώντας ένα εύρος ζώνης και μια μετατόπιση συχνότητας ειδικά για κινητό. Άλλη μια φορά, πολλές άλλες διαμορφώσεις είναι δυνατές.

Αναφορές

1. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10.
2. 3GPP TS 36.323 (March 2011) *Packet Data Convergence Protocol (PDCP) Specification*, Release 10.
3. 3GPP TS 36.322 (December 2010) *Radio Link Control (RLC) Protocol Specification*, Release 10.
4. 3GPP TS 36.321 (October 2011) *Medium Access Control (MAC) Protocol Specification*, Release 10.
5. 3GPP TS 36.212 (September 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and Channel Coding*, Release 10.
6. 3GPP TS 36.211 (September 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation*, Release 10.
7. 3GPP TS 36.101 (October 2011) *User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception*, Release 10.
8. 3GPP TS 36.104 (October 2011) *Base Station (BS) Radio Transmission and Reception*, Release 10.
9. 3GPP TS 36.213 (September 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Layer Procedures*, Release 10.
10. 3GPP TS 36.321 (October 2011) *Medium Access Control (MAC) Protocol Specification*, Release 10, section 4.5.
11. 3GPP TS 36.212 (September 2011) *Multiplexing and Channel Coding*, Release 10, section 4.
12. 3GPP TS 36.211 (September 2011) *Physical Channels and Modulation*, Release 10, sections 5.1, 6.1.
13. 3GPP TS 36.211 (September 2011) *Physical Channels and Modulation*, Release 10, sections 5.6, 6.12.
14. 3GPP TS 36.211 (September 2011) *Physical Channels and Modulation*, Release 10, section 4.
15. 3GPP TS 36.211 (September 2011) *Physical Channels and Modulation*, Release 10, section 8.
16. 3GPP TS 36.211 (September 2011) *Physical Channels and Modulation*, Release 10, sections 5.2, 6.2.
17. 3GPP TS 36.101 (October 2011) *User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception*, Release 10, section 5.6.

7

Αναγνώριση Κυψέλης

Μόλις ένα κινητό ενεργοποιηθεί, εκτελεί μια διαδικασία αναγνώρισης χαμηλού επιπέδου έτσι ώστε να εντοπίσει τις κοντινές LTE κυψέλες και να ανακαλύψει πώς έχουν ρυθμιστεί. Με αυτό τον τρόπο, λαμβάνει τα PSS και SSS, διαβάζει την MIB από το PBCH και διαβάζει τις υπόλοιπες SIBs από το PDSCH. Ξεκινά επίσης τη λήψη σημάτων αναφοράς κάτω ζεύξης και του PCFICH, το οποίο θα χρειαστεί καθ' όλη τη διαδικασία αποστολής και λήξης δεδομένων αργότερα. Σε αυτό το κεφάλαιο, ξεκινάμε συνοψίζοντας τη διαδικασία αναγνώρισης και στη συνέχεια προχωράμε σε μια συζήτηση για τα επιμέρους βήματα.

Η πιο σημαντική προδιαγραφή για αυτό το κεφάλαιο, είναι αυτή για τον επεξεργαστή φυσικού καναλιού, TS 36.211 [1]. Οι SIBs αποτελούν μέρος του πρωτοκόλλου RRC και ορίζονται στο TS 36.331 [2].

7.1 Διαδικασία Αναγνώρισης

Η διαδικασία αναγνώρισης συνοψίζεται στον Πίνακα 7.1. Υπάρχουν πολλά βήματα. Το κινητό ξεκινάει λαμβάνοντας τα σήματα συγχρονισμού από όλες τις κοντινές κυψέλες. Από το PSS, βρίσκει το χρονοδιάγραμμα συμβόλου και παίρνει κάποιες ελλειπίες πληροφορίες σχετικά με τη φυσική ταυτότητα της κυψέλης. Από το SSS, βρίσκει το χρονοδιάγραμμα πλαισίου, τη φυσική ταυτότητα κυψέλης, τον τρόπο μετάδοσης (FDD ή TDD) και τη διάρκεια CP (κανονική ή εκτεταμένη).

Σε αυτό το σημείο, το κινητό ξεκινάει τη λήψη RS. Αυτά παρέχουν μια αναφορά πλάτους και φάσης για τη διαδικασία εκτίμησης καναλιού, έτσι είναι απαραίτητα για κάθε τι που ακολουθεί. Το κινητό στη συνέχεια, λαμβάνει το PBCH και διαβάζει την MIB. Με αυτόν τον τρόπο, ανακαλύπτει τον αριθμό των κεραιών μετάδοσης στο σταθμό βάσης, το εύρος ζώνης κάτω ζεύξης, τον SFN και μία ποσότητα που ονομάζεται η διαμόρφωση PHICH, που περιγράφει το PHICH.

Το κινητό μπορεί τώρα να ξεκινήσει τη λήψη του PCFICH, έτσι ώστε να διαβάσει τους CFIs. Αυτοί δείχνουν πόσα σύμβολα διατηρούνται κατά την έναρξη του κάθε υποπλαισίου κάτω ζεύξης για τα φυσικά κανάλια ελέγχου, και πόσα είναι διαθέσιμα για μετάδοση δεδομένων. Τέλος, το κινητό μπορεί να ξεκινήσει τη λήψη του PDCCH. Αυτό επιτρέπει στο κινητό να διαβάσει τις υπόλοιπες SIBs, οι οποίες αποστέλλονται στο PDSCH. Με τον τρόπο αυτό, ανακαλύπτει όλες τις υπόλοιπες λεπτομέρειες σχετικά με το πώς έχει ρυθμιστεί η κυψέλη, όπως οι ταυτότητες των δικτύων που ανήκει.

Πίνακας 7.1 Στάδια διαδικασίας αναγνώρισης κυψελών

Step	Task	Information obtained
1	Receive PSS	Symbol timing Cell identity within group
2	Receive SSS	Frame timing Physical cell identity Transmission mode Cyclic prefix duration
3	Start reception of RS	Amplitude and phase reference for demodulation Power reference for channel quality estimation
4	Read MIB from PBCH	Number of transmit antennas Downlink bandwidth System frame number PHICH configuration
5	Start reception of PCFICH	Number of control symbols per subframe
6	Read SIBs from PDSCH	System information

7.2 Σήματα Συγχρονισμού

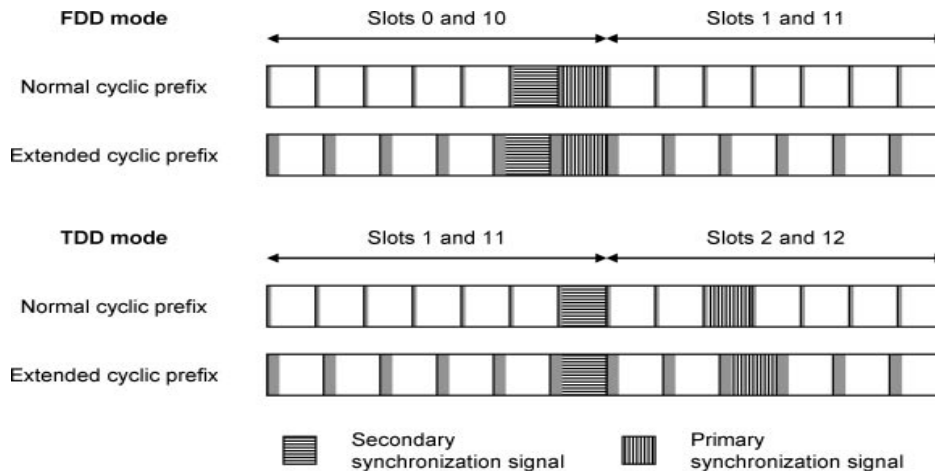
7.2.1 Φυσική Ταυτότητα Κυψέλης

Η φυσική ταυτότητα κυψέλης είναι ένας αριθμός μεταξύ 0 και 503, που μεταδίδεται στα σήματα συγχρονισμού [3] και χρησιμοποιείται με τρεις τρόπους. Πρώτον, καθορίζει το ακριβές σύνολο των RE που χρησιμοποιούνται για τα RS και το PCFICH. Δεύτερον, επηρεάζει μια διαδικασία μετάδοσης κάτω ζεύξης, γνωστή ως κρυπτογράφηση, σε μια προσπάθεια ελαχιστοποίησης των παρεμβολών μεταξύ γειτονικών κυψελών. Τρίτον, προσδιορίζει μεμονωμένες κυψέλες κατά τη διάρκεια RRC διαδικασιών όπως είναι η τακτική μέτρηση και μεταπομπή. Η φυσική ταυτότητα κυψέλης αποδίδεται κατά το σχεδιασμό του δικτύου ή σε ανεξάρτητη διαμόρφωση. Οι γειτονικές κυψέλες θα πρέπει πάντα να λαμβάνουν διαφορετικές φυσικές ταυτότητες κυψελών, για να εξασφαλίσουν ότι κάθε ένας από αυτούς τους ρόλους έχει εκπληρωθεί σωστά.

Θα ήταν δύσκολο για ένα κινητό να βρει τις φυσικές ταυτότητες κυψελών σε ένα βήμα, έτσι είναι οργανωμένες σε ομάδες ταυτότητας κυψελών ως εξής:

$$N_{ID}^{cell} = 3N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)} \quad (7.1)$$

Σε αυτή την εξίσωση, N_{ID}^{cell} είναι η φυσική ταυτότητα κυψέλης. $N_{ID}^{(1)}$ είναι η ομάδα ταυτότητας κυψέλης η οποία τρέχει από 0 έως 167 και σηματοδοτείται χρησιμοποιώντας το SSS. Το $N_{ID}^{(2)}$ είναι η ταυτότητα κυψέλης εντός της ομάδας, η οποία τρέχει από 0 έως 2 και σηματοδοτείται χρησιμοποιώντας το PSS. Χρησιμοποιώντας αυτή τη ρύθμιση, ένας σχεδιαστής δικτύου μπορεί να δώσει σε κάθε κοντινό σταθμό βάσης μια διαφορετική ομάδα ταυτότητας κυψέλης, και μπορεί να διακρίνει τους τομείς της, χρησιμοποιώντας την ταυτότητα κυψέλης μέσα στην ομάδα.



Σχήμα 7.1 Αντιστοίχιση πεδίου χρόνου PSS και SSS.

7.2.2 Πρωτεύον Σήμα Συγχρονισμού

Το Σχήμα 7.1 δείχνει την αντιστοιχία πεδίου χρόνου PSS και SSS. Τα σήματα μεταδίδονται δύο φορές ανά πλαίσιο. Σε κατάσταση FDD, το PSS μεταδίδεται στο τελευταίο σύμβολο των σχισμών 0 και 10, ενώ το SSS έχει σταλεί ένα σύμβολο νωρίτερα. Σε κατάσταση TDD, το PSS μεταδίδεται στο τρίτο σύμβολο των σχισμών 2 και 12, ενώ το SSS έχει σταλεί τρία σύμβολα νωρίτερα.

Στο πεδίο συχνοτήτων, ο σταθμός βάσης αντιστοιχεί τα σήματα συγχρονισμού στις κεντρικές 62 υπο-φέρουσες, και παραγεμίζει το προκύπτον σήμα με μηδενικά έτσι ώστε να καταλαμβάνει τις κεντρικές 72 υπο-φέρουσες (1.08 MHz). Αυτό το δεύτερο εύρος ζώνης είναι η μικρότερη ζώνη μετάδοσης που υποστηρίζει το LTE, η οποία εξασφαλίζει ότι το κινητό μπορεί να λάβει δύο σήματα χωρίς προηγούμενη γνώση του εύρους ζώνης κάτω ζεύξης.

Ο σταθμός βάσης δημιουργεί το πραγματικό σήμα χρησιμοποιώντας μια ακολουθία Zadoff-Chu [4, 5]. Εν συντομία, αυτή είναι μια πολύτιμη μιγαδική ακολουθία που περιέχει σημεία δεδομένων N_{zc} . Υπό ορισμένες προϋποθέσεις, μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα μέγιστο από διαφορετικές ακολουθίες ριζών N_{zc} από κάθε τιμή του N_{zc} , και στη συνέχεια μπορούμε να προσαρμόσουμε κάθε ακολουθία ρίζας περαιτέρω, εφαρμόζοντας ένα μέγιστο από διαφορετικές N_{zc} κυκλικές μετατοπίσεις. Το PSS απλά χρησιμοποιεί τρεις ακολουθίες ριζών για τον προσδιορισμό των τριών πιθανών τιμών του $N_{ID}^{(2)}$.

Για να λάβει το PSS, το κινητό συσχετίζει το εισερχόμενο σήμα με τις τρεις πιθανές ακολουθίες ριζών, για ένα χρονικό διάστημα τουλάχιστον 5 ms. Με αυτόν τον τρόπο, μετρά τις ώρες κατά τις οποίες το PSS φτάνει από κάθε μια από τις κοντινές κυψέλες, και βρίσκει την ταυτότητα της κυψέλης εντός της ομάδας, $N_{ID}^{(2)}$.

Οι ακολουθίες Zadoff-Chu είναι χρήσιμες επειδή έχουν καλές ιδιότητες συσχέτισης. Σε πρακτικό επίπεδο, αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μικρός κίνδυνος να κάνει ένα λάθος το κινητό στη μέτρησή του από το $N_{ID}^{(2)}$, ακόμη και αν ο SINR είναι χαμηλός. Οι ακολουθίες Zadoff-Chu χρησιμοποιούνται επίσης από τα σήματα

αναφοράς άνω ζεύξης (Κεφάλαιο 8) και από το PRACH (Κεφάλαιο 9).

7.2.3 Δευτερεύον Σήμα Συγχρονισμού

Ο σταθμός βάσης μεταδίδει το SSS αμέσως πριν από το PSS σε κατάσταση FDD, ή τρία σύμβολα πριν, σε κατάσταση TDD. Ο ακριβής χρόνος μεταφοράς εξαρτάται από τη διάρκεια CP (κανονική ή παρατεταμένη), δίνοντας τέσσερις πιθανούς χρόνους μετάδοσης συνολικά. Το πραγματικό σήμα δημιουργείται χρησιμοποιώντας ψευδοτυχαίες ακολουθίες, γνωστές ως *Χρυσές ακολουθίες* [6], η ακριβής ακολουθία είναι διαφορετική για τις πρώτες και δεύτερες μεταδόσεις του σήματος μέσα στο πλαίσιο. Μαζί, αυτές οι δύο ακολουθίες δείχνουν την ομάδα ταυτότητας κυψέλης, $N_{ID}^{(1)}$.

Για να ληφθεί το SSS, το κινητό ελέγχει κάθε ένα από τους τέσσερις πιθανούς χρόνους μετάδοσης πάνω από δύο διαδοχικές μεταδόσεις και αναζητά καθεμία από τις πιθανές ακολουθίες SSS. Βρίσκοντας το χρόνο που μεταδίδεται το σήμα, μπορεί να συμπεράνει τη λειτουργία μετάδοσης που χρησιμοποιεί η κυψέλη και τη διάρκεια CP. Με τον προσδιορισμό των μεταδιδόμενων ακολουθιών, μπορεί να συμπεράνει την ομάδα ταυτότητας κυψέλης και επομένως τη φυσική ταυτότητα κυψέλης. Τέλος, συγκρίνοντας τις δύο διαδοχικές ακολουθίες, μπορεί να συμπεράνει ποια είναι η πρώτη ακολουθία στο πλαίσιο, έτσι μπορεί να βρει το χρόνο κατά τον οποίο ένα πλαίσιο 10ms ξεκινάει.

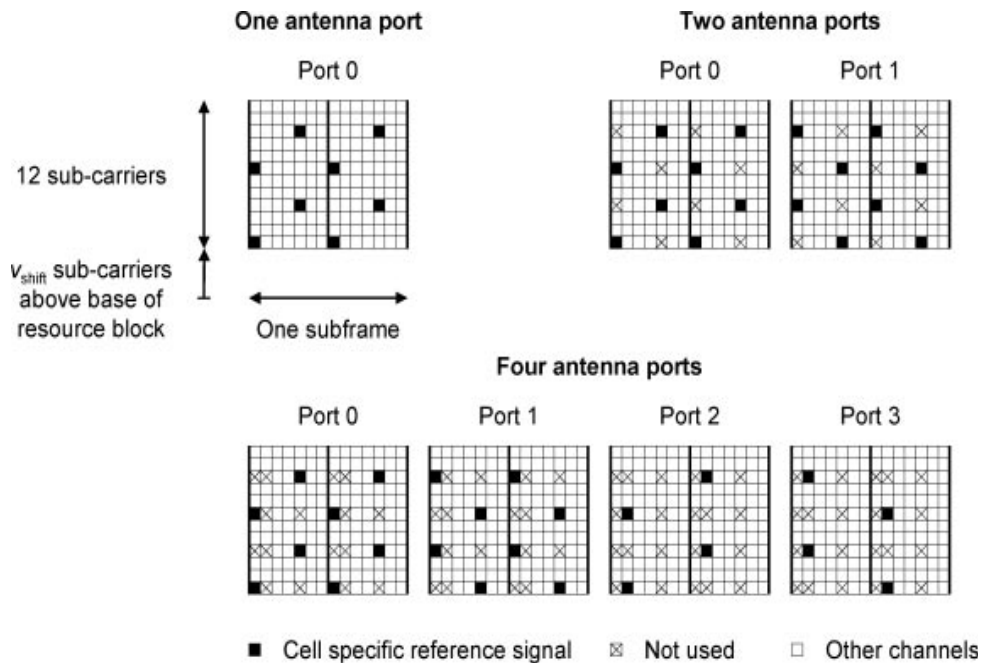
7.3 Σήματα Αναφοράς Κάτω Ζεύξης

Το κινητό ξεκινά τώρα τη λήψη των σημάτων αναφοράς κάτω ζεύξης [7]. Αυτά χρησιμοποιούνται με δύο τρόπους. Ο άμεσος ρόλος τους είναι να δώσουν στο κινητό ένα πλάτος και μια αναφορά φάσης για χρήση στην εκτίμηση καναλιού. Αργότερα, το κινητό θα τα χρησιμοποιήσει για τη μέτρηση ισχύος λαμβανόμενου σήματος, ως συνάρτηση της συχνότητας και για τον υπολογισμό των CQI.

Η Έκδοση 8 χρησιμοποιεί δύο τύπους σήματος αναφοράς κάτω ζεύξης, αλλά τα RS είναι τα πιο σημαντικά. Το Σχήμα 7.2 δείχνει πώς αυτά τα σήματα αντιστοιχίζονται με τα RE, για την περίπτωση ενός κανονικού CP. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η αντιστοίχιση εξαρτάται από τον αριθμό των θυρών κεραιών που χρησιμοποιεί ο σταθμός βάσης και από τον αριθμό θύρας κεραιάς. Όσο μια κεραία μεταδίδει ένα σήμα αναφοράς, όλες οι άλλες σταματούν να λειτουργούν, με τον τρόπο που απαιτείται για την χωρική πολύπλεξη.

Αυτό το βασικό μοτίβο αντισταθμίζεται στο πεδίο συχνοτήτων, για ελαχιστοποίηση των παρεμβολών μεταξύ των σημάτων αναφοράς που μεταδίδονται από γειτονικές κυψέλες. Η μετατόπιση υπο-φέρουσας είναι:

$$v_{\text{shift}} = N_{ID}^{\text{cell}} \bmod 6 \quad (7.2)$$



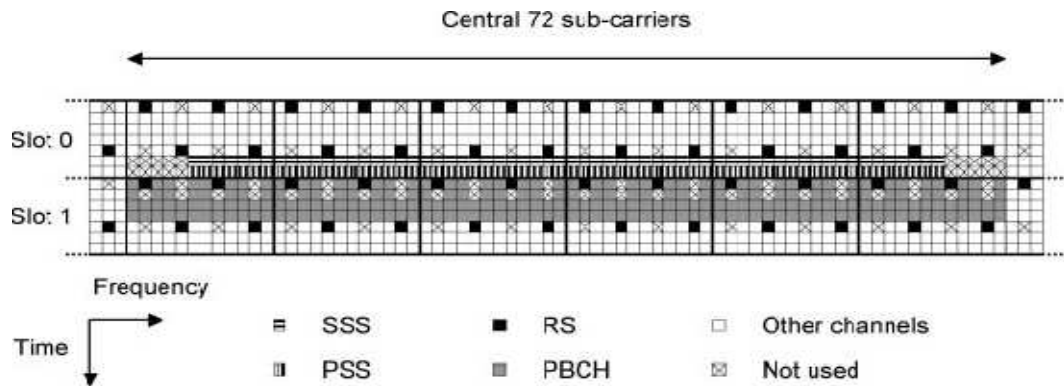
Σχήμα 7.2 Αντιστοίχιση RE για τα RS, χρησιμοποιώντας ένα κανονικό CP. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI.

όπου N_{ID}^{cell} είναι η φυσική ταυτότητα κυψέλης που το κινητό έχει ήδη βρει. Προηγουμένως, το Σχήμα 6.10 έδειξε την αντιστοίχιση RE στην περίπτωση που $u_{shift} = 1$, έτσι ώστε η φυσική ταυτότητα κυψέλης θα μπορούσε να έχει τιμές από 1, 7, 13....

Τα RE συμπληρώνονται με μια Χρυσή ακολουθία που εξαρτάται από τη φυσική ταυτότητα κυψέλης, και πάλι σε μια προσπάθεια για ελαχιστοποίηση των παρεμβολών. Μετρώντας τα λαμβανόμενα σύμβολα αναφοράς και συγκρίνοντάς τα με αυτά που μεταδίδονται, το κινητό μπορεί να μετρήσει τις αλλαγές πλάτους και τις μετατοπίσεις φάσης που εισήγαγε η διεπαφή αέρα. Μπορεί στη συνέχεια να εκτιμήσει τις ποσότητες αυτές στα παρεμβαίνοντα RE, με παρεμβολή.

Οι θύρες κεραιών 0 και 1 χρησιμοποιούν τέσσερα σήματα αναφοράς ανά ομάδα πόρου, ενώ οι θύρες κεραιάς 2 και 3 χρησιμοποιούν μόνο δύο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μια κυψέλη πιθανότατα θα χρησιμοποιήσει τέσσερις θύρες κεραιών όταν κυριαρχείται από κινητά αργής κίνησης, για τα οποία το πλάτος και η φάση λαμβανόμενου σήματος θα μεταβάλλεται αργά με το χρόνο.

Ένας σταθμός βάσης Έκδοσης 8, μπορεί επίσης να μεταδίδει ειδικά σήματα αναφοράς UE από τη θύρα κεραιάς 5, σαν μια αναφορά πλάτους και φάσης για κινητά που χρησιμοποιούν beamforming. Αυτά διαφέρουν από τα RS με τρεις τρόπους. Πρώτον, ο σταθμός βάσης τα μεταδίδει μόνο στις RBs που χρησιμοποιεί για μεταδόσεις beamforming στο PDSCH. Δεύτερον, η Χρυσή ακολουθία εξαρτάται από την ταυτότητα του κινητού στόχου, καθώς και εκείνη του σταθμού βάσης. Τρίτον, ο σταθμός βάσης προκωδικοποιεί τα ειδικά σήματα αναφοράς UE, χρησιμοποιώντας τους ίδιους συντελεστές στάθμισης κεραιών που ισχύουν για το PDSCH. Αυτό το



Σχήμα 7.3 Αντιστοίχιση RE για την PBCH, χρησιμοποιώντας κατάσταση FDD, ένα κανονικό CP, ένα εύρος ζώνης 10 ή 20 MHz, την πρώτη θύρα κεραίας από τις δύο και μια φυσική ID κυψέλης του 1.

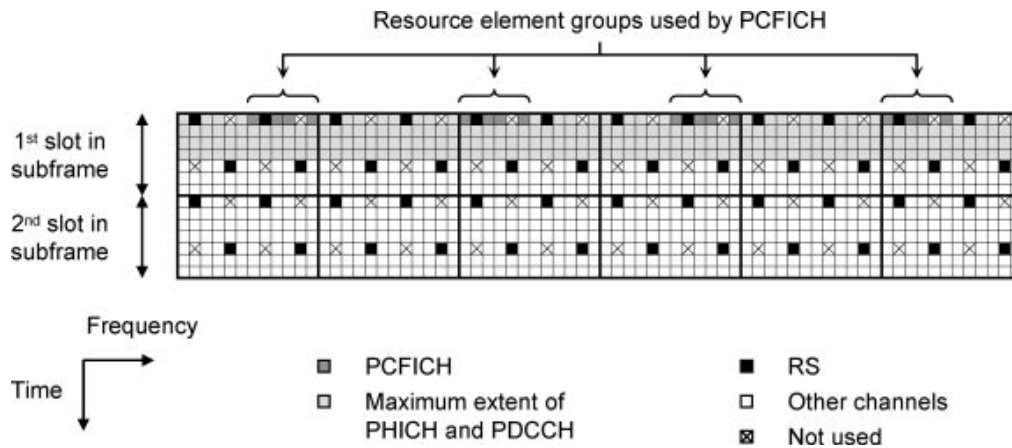
τελευταίο βήμα εξασφαλίζει ότι τα σήματα αναφοράς κατευθύνονται προς τον κινητό στόχο και διασφαλίζει επίσης ότι η διαδικασία στάθμισης είναι απολύτως διαφανής: ανακτώντας τα αρχικά σήματα αναφοράς κατά τη διάρκεια της εκτίμησης καναλιού, το κινητό αφαιρεί αυτόματα όλες τις μετατοπίσεις φάσης που εισήγαγε η διαδικασία στάθμισης.

7.4 Φυσικό Κανάλι Εκπομπής

Η MIB [8] περιλαμβάνει το εύρος ζώνης κάτω ζεύξης και τα οκτώ πιο σημαντικά bits του 10-bit SFN. Περιλαμβάνει επίσης, μια ποσότητα που είναι γνωστή ως *διαμόρφωση PHICH*, η οποία δείχνει τα RE που ο σταθμός βάσης έχει εξασφαλίσει για το PHICH.

Ο σταθμός βάσης μεταδίδει την MIB στο BCH και στο PBCH [9, 10]. Επεξεργάζεται τις πληροφορίες με τον ίδιο τρόπο όπως και κάθε άλλο κανάλι κάτω ζεύξης: στο επόμενο κεφάλαιο, θα παρουσιάσουμε αυτά τα βήματα χρησιμοποιώντας το PDSCH ως παράδειγμα. Η μόνη σημαντική διαφορά είναι ότι ο σταθμός βάσης χειρίζεται το BCH με ένα τρόπο που να υποδεικνύει τα δύο λιγότερο σημαντικά bits SFN και τον αριθμό θυρών κεραίων. Όπως σημειώθηκε στο Κεφάλαιο 6, το BCH χρησιμοποιεί ένα σταθερό ρυθμό κωδικοποίησης και ένα σταθερό σχήμα διαμόρφωσης (QPSK), και μεταδίδεται είτε χρησιμοποιώντας μία κεραία είτε διαφορική μετάδοση ανοικτού βρόχου.

Ο σταθμός βάσης αντιστοιχίζει την MIB σε τέσσερα διαδοχικά πλαίσια, αρχίζοντας με πλαίσια όπου ο SFN είναι ένα πολλαπλάσιο των τεσσάρων. Όταν χρησιμοποιείται ένα κανονικό CP, μεταδίδει το PBCH στις κεντρικές 72 υποφέρουσες χρησιμοποιώντας τα τέσσερα πρώτα σύμβολα της σχισμής 1. Το Σχήμα 7.3 δείχνει ένα παράδειγμα. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η αντιστοίχιση παρακάμπει τα RE που χρησιμοποιούνται για τα RS από ένα σταθμό βάσης με τέσσερις θύρες



Σχήμα 7.4 Αντιστοίχιση RE για το PCFICH, χρησιμοποιώντας ένα κανονικό CP, ένα εύρος ζώνης 1.4MHz, την πρώτη θύρα κεραιάς των δύο και μια φυσική ID κυψέλης του 1.

κεραιών, ανεξάρτητα από το πόσες θύρες έχει στην πραγματικότητα. (Σημειώστε ότι, σε μια αποχώρηση από τη συνηθισμένη σύμβασή μας, αυτό το διάγραμμα δείχνει το χρόνο να απεικονίζεται κάθετα και τη συχνότητα οριζόντια).

Το κινητό επεξεργάζεται τυφλά το PBCH, χρησιμοποιώντας όλους τους πιθανούς τρόπους με τους οποίους ο σταθμός βάσης θα μπορούσε να χειριστεί τις πληροφορίες, επιλέγοντας κάθε συνδυασμό από μία, δύο ή τέσσερις θύρες κεραιών και κάθε συνδυασμό των δύο λιγότερο σημαντικών bits του SFN. Μόνο η σωστή επιλογή επιτρέπει στον CRC να περάσει. Διαβάζοντας την MIB, το κινητό μπορεί στη συνέχεια να ανακαλύψει το εύρος ζώνης κάτω ζεύξης, τα υπόλοιπα bits SFN και τη διαμόρφωση PHICH.

7.5 Φυσικό Κανάλι Ελέγχου του Δείκτη Διαμόρφωσης

Κάθε υποπλαίσιο κάτω ζεύξης ξεκινά με μια περιοχή ελέγχου που περιλαμβάνει τα PCFICH, PHICH και PDCCH και συνεχίζει με μια περιοχή δεδομένων που περιλαμβάνει το PDSCH. Ο αριθμός συμβόλων ελέγχου ανά υποπλαίσιο μπορεί να είναι 2, 3 ή 4 σε ένα εύρος ζώνης των 1.4 MHz και αλλιώς 1, 2 ή 3 και μπορεί να αλλάξει από το ένα υποπλαίσιο στο επόμενο. Κάθε υποπλαίσιο, ο σταθμός βάσης υποδεικνύει τον αριθμό των συμβόλων ελέγχου χρησιμοποιώντας το δείκτη μορφής ελέγχου και μεταδίδει την πληροφορία για το PCFICH [11, 12]. Επόμενος στόχος του κινητού είναι να αρχίσει να λαμβάνει αυτό το κανάλι.

Το PCFICH αντιστοιχεί πάνω σε 16 RE στο πρώτο σύμβολο του κάθε υποπλαισίου, με την ακριβή αντιστοιχία ανάλογα με τη φυσική ταυτότητα της κυψέλης και του εύρους ζώνης κάτω ζεύξης. Το Σχήμα 7.4 δείχνει ένα παράδειγμα, για ένα εύρος ζώνης των 1.4 MHz και μια φυσική ταυτότητα κυψέλης του 1.

Όπως φαίνεται στο σχήμα, τα επιλεγμένα RE είναι οργανωμένα σε τέσσερις ομάδες στοιχείων πόρων (REGs). Κάθε ομάδα περιλαμβάνει τέσσερα RE, τα οποία αποστέλλονται σε κοντινές υπο-φέρουσες που δεν χρειάζονται από τα RS. Οι REGs

Πίνακας 7.2 Οργάνωση πληροφοριών συστήματος

Block	Release	Information	Examples
MIB	R8	Master information block	Downlink bandwidth PHICH configuration System frame number/4
SIB 1	R8	Cell selection parameters Scheduling of other SIBs	PLMN identity list Tracking area code CSG identity TDD configuration $Q_{rxlevmin}$ SIB mapping, period, window size
SIB 2	R8	Radio resource configuration	Downlink reference signal power Default DRX cycle length Time alignment timer
SIB 3	R8	Common cell reselection data	$S_{IntraSearchP}$, $S_{NonIntraSearchP}$
SIB 4	R8	Cell independent intra frequency data	Q_{hyst}
SIB 5	R8	Cell specific intra frequency data	$Q_{offset, s, n}$
SIB 5	R8	Inter frequency reselection data	Target carrier frequency $Thresh_{x, LowP}$, $Thresh_{x, HighP}$
SIB 6	R8	Reselection to UMTS	UMTS neighbour list
SIB 7	R8	Reselection to GSM	GSM neighbour list
SIB 8	R8	Reselection to cdma2000	cdma2000 neighbour list
SIB 9	R8	Home eNB identifier	Name of home eNB
SIB 10	R8	ETWS primary notification	ETWS alert about natural disaster
SIB 11	R8	ETWS secondary notification	Supplementary ETWS information
SIB 12	R9	CMAS notification	CMAS emergency message
SIB 13	R9	MBMS information	Details of MBSFN areas

χρησιμοποιούνται σε ολόκληρη την περιοχή ελέγχου κάτω ζεύξης, έτσι χρησιμοποιούνται επίσης από τα PHICH και PDCCH.

Κατά την έναρξη του κάθε υποπλαισίου, το κινητό πηγαίνει στα RE που καταλαμβάνονται από το PCFICH, διαβάζει τον CFI και καθορίζει το μέγεθος της περιοχής ελέγχου κάτω ζεύξης. Χρησιμοποιώντας τη διαμόρφωση PHICH, μπορεί να επεξεργαστεί ποιες από τις υπόλοιπες REGs χρησιμοποιούνται από το PHICH και ποιες από το PDCCH. Στη συνέχεια μπορεί να συνεχίσει να λαμβάνει DCI στο PDCCH και δεδομένα κάτω ζεύξης στο PDSCH. Ειδικότερα, μπορεί να διαβάσει το υπόλοιπο σύστημα πληροφοριών της κυψέλης, με τον τρόπο που περιγράφεται παρακάτω.

7.6 Πληροφορίες Συστήματος

7.6.1 Οργάνωση Πληροφοριών Συστήματος

Κάθε κυψέλη μεταδίδει RRC μηνύματα πληροφοριών συστήματος [13] που υποδεικνύουν πώς έχει διαμορφωθεί. Ο σταθμός βάσης μεταδίδει αυτά τα μηνύματα στο PDSCH, με έναν τρόπο που είναι σχεδόν ταυτόσημος με οποιαδήποτε άλλη μετάδοση δεδομένων. Το τελικό καθήκον αναγνώρισης του κινητού, είναι να διαβάσει αυτές τις πληροφορίες.

Οι πληροφορίες του συστήματος είναι οργανωμένες στην MIB, που

συζητήσαμε παραπάνω, και σε διάφορες αριθμημένες SIBs. Αυτές παρατίθενται στον Πίνακα 7.2, μαζί με τα παραδείγματα των στοιχείων πληροφοριών που θα χρησιμοποιήσουμε στα υπόλοιπα κεφάλαια.

Η SIB 1 καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο θα πρέπει να προγραμματιστούν οι άλλες SIBs. Περιλαμβάνει επίσης τις παραμέτρους που θα χρειαστεί το κινητό για την επιλογή δικτύου και κυψελών (Κεφάλαιο 11), όπως ο TAC και μια λίστα με τα δίκτυα στα οποία ανήκει η κυψέλη. Αυτή η λίστα μπορεί να προσδιορίσει μέχρι έξι δίκτυα, η οποία επιτρέπει σε ένα σταθμό βάσης να μοιραστεί εύκολα μεταξύ των διαφόρων φορέων εκμετάλλευσης δικτύων. Η SIB 2 περιλαμβάνει παραμέτρους που περιγράφουν τους ραδιοπόρους και τα φυσικά κανάλια της κυψέλης, όπως η ισχύς που εκπέμπει ο σταθμός βάσης στα σήματα αναφοράς κάτω ζεύξης.

Οι SIBs 3 έως 8 βοηθούν στον καθορισμό των διαδικασιών επανεπιλογής κυψελών που χρησιμοποιούνται από κινητά στην RRC_IDLE (Κεφάλαια 14 και 15). Η SIB 3 περιλαμβάνει τις παραμέτρους που χρειάζεται ένα κινητό για κάθε τύπο επανεπιλογής κυψέλης καθώς επίσης και τις ανεξάρτητες παραμέτρους κυψελών που θα χρειαστεί για την επανεπιλογή στην ίδια φέρουσα συχνότητα LTE. Η SIB 4 είναι προαιρετική και περιλαμβάνει οποιεσδήποτε παραμέτρους ειδικές για κυψέλες που ο σταθμός βάσης μπορεί να ορίσει για αυτή τη διαδικασία. Η SIB 5 καλύπτει την επανεπιλογή σε μια διαφορετική συχνότητα LTE, ενώ οι SIBs 6, 7 και 8, αντιστοίχως, καλύπτουν την επανεπιλογή για το UMTS (τόσο για WCDMA όσο και για TD-SCDMA), το GSM και το cdma2000.

Οι υπόλοιπες SIBs είναι πιο εξειδικευμένες. Αν ο σταθμός βάσης ανήκει σε μία CSG, τότε η SIB 9 προσδιορίζει το όνομά του. Το κινητό τότε, μπορεί να το υποδείξει αυτό στο χρήστη, για τη στήριξη της επιλογής CSG. Οι SIBs 10 και 11 περιλαμβάνουν ανακοινώσεις από το ETWS. Σε αυτό το σύστημα, το CBC, μπορεί να λάβει μια ειδοποίηση για μια φυσική καταστροφή και μπορεί να τη διανείμει σε όλους τους σταθμούς βάσης στο δίκτυο, οι οποίοι στη συνέχεια μεταδίδουν το σήμα μέσω του συστήματος πληροφοριών τους. Η SIB 10 περιλαμβάνει μια πρωταρχική ανακοίνωση που πρέπει να διανεμηθεί σε δευτερόλεπτα, ενώ η SIB 11 περιλαμβάνει μια δευτερεύουσα ανακοίνωση που περιλαμβάνει λιγότερο επείγουσες συμπληρωματικές πληροφορίες. Οι SIBs 12 και 13 δεν έχουν παρουσιαστεί μέχρι την Έκδοση 9.

7.6.2 Μετάδοση και Λήψη των Πληροφοριών Συστήματος

Ο σταθμός βάσης μπορεί να μεταδώσει τις πληροφορίες του συστήματός του χρησιμοποιώντας δύο τεχνικές. Στην πρώτη τεχνική, ο σταθμός βάσης εκπέμπει τις πληροφορίες του συστήματος σε όλη την κυψέλη, για χρήση από κινητά σε κατάσταση RRC_IDLE και από κινητά σε RRC_CONNECTED που μόλις παραδόθηκαν σε μια νέα κυψέλη. Αυτό επιτυγχάνεται με τον ίδιο τρόπο όπως και οποιαδήποτε άλλη μετάδοση κάτω ζεύξης (Κεφάλαιο 8), αλλά με μερικές διαφορές. Οι μεταδόσεις πληροφοριών συστήματος δεν υποστηρίζουν ARQs, τα οποία είναι ακατάλληλα για μια-προς-πολλές μεταδόσεις. Ο σταθμός βάσης στέλνει τις

πληροφορίες του συστήματος χρησιμοποιώντας μια κεραία ή διαφορική μετάδοση ανοικτού βρόχου, ανάλογα με τον αριθμό των θυρών κεραιών που έχει, και το σύστημα διαμόρφωσης καθορίζεται σε QPSK.

Υπάρχουν μερικοί κανόνες σχετικά με το χρονοδιάγραμμα αυτών των εκπομπών πληροφοριών συστήματος. Ο σταθμός βάσης μεταδίδει την SIB 1 στο υποπλαίσιο 5 των πλαισίων με ένα ζυγό SFN, με μια πλήρη μετάδοση λαμβάνοντας συνολικά οκτώ πλαίσια. Ορίζει την επιλογή υπο-φερουσών χρησιμοποιώντας την εντολή χρονοδιαγράμματος κάτω ζεύξης του. Ο σταθμός βάσης συλλέγει στη συνέχεια τις υπόλοιπες SIBs σε μηνύματα RRC *Πληροφοριών Συστήματος*, και στέλνει κάθε μήνυμα μέσα σε ένα παράθυρο μετάδοσης που έχει μια διάρκεια από 1 έως 40 ms και μια περίοδο από 80 έως 5120 ms. Η SIB 1 καθορίζει την αντιστοιχία των SIBs πάνω σε μηνύματα, την περίοδο του κάθε μηνύματος και τη διάρκεια παραθύρου, ενώ η εντολή χρονοδιαγράμματος κάτω ζεύξης ορίζει τον ακριβή χρόνο μεταφοράς και την επιλογή υπο-φερουσών.

Αν ο σταθμός βάσης επιθυμεί να ενημερώσει τις πληροφορίες του συστήματος που εκπέμπει, ενημερώνει πρώτα τα κινητά που χρησιμοποιούν τη διαδικασία αναζήτησης (Κεφάλαιο 8). Αυξάνει επίσης μια *σημείωση αξίας* στην SIB 1, για χρήση από κινητά που επιστρέφουν από μία περιοχή φτωχής κάλυψης στην οποία μπορεί να έχουν χάσει ένα μήνυμα αναζήτησης. Ο σταθμός βάσης στη συνέχεια αλλάζει τα στοιχεία του συστήματος σε ένα προκαθορισμένο όριο περιόδου τροποποίησης.

Στη δεύτερη τεχνική, ο σταθμός βάσης μπορεί να ενημερώσει τις πληροφορίες του συστήματος που χρησιμοποιούνται από ένα κινητό σε κατάσταση RRC_CONNECTED, στέλνοντάς του ένα σαφές μήνυμα Πληροφοριών Συστήματος. Αυτό το κάνει με τον ίδιο τρόπο όπως κάθε άλλη μετάδοση σηματοδότησης κάτω ζεύξης.

7.7 Διαδικασίες Μετά την Αναγνώριση

Μόλις το κινητό έχει ολοκληρώσει τη διαδικασία αναγνώρισης, πρέπει να εκτελέσει δύο διαδικασίες υψηλότερου επιπέδου πριν να μπορεί να ανταλλάξει δεδομένα με το δίκτυο.

Στη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης (Κεφάλαιο 9), το κινητό αποκτά τρία είδη πληροφοριών: μία αρχική τιμή για την προήγηση χρόνου άνω ζεύξης, ένα αρχικό σύνολο παραμέτρων για τη μετάδοση δεδομένων άνω ζεύξης για το PUSCH και μια τιμή γνωστή ως ο cell radio network temporary identifier (C-RNTI) που ο σταθμός βάσης θα χρησιμοποιήσει για να το εντοπίσει. Κατά τη διαδικασία εγκατάστασης της σύνδεσης RRC (Κεφάλαιο 11), το κινητό αποκτά διάφορα άλλα μέρη πληροφοριών, κυρίως μια σειρά από παραμέτρους για τη μετάδοση των UCI για το PUCCH και μια σειρά από ρυθμίσεις πρωτοκόλλου για τα δεδομένα και τους SRBs του.

Πριν εξετάσουμε αυτά, ωστόσο, θα πρέπει να καλύψουμε τη βασική διαδικασία που χρησιμοποιεί το LTE για την αποστολή και λήψη δεδομένων. Αυτό είναι το αντικείμενο του επόμενου κεφαλαίου.

Αναφορές

1. 3GPP TS 36.211 (September 2011) *Physical Channels and Modulation*, Release 10.
2. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10.
3. 3GPP TS 36.211 (September 2011) *Physical Channels and Modulation*, Release 10, section 6.11.
4. Frank, R., Zadoff, S. and Heimiller, R. (1962) Phase shift pulse codes with good periodic correlation properties, *IEEE Transactions on Information Theory*, **8**, 381–382.
5. Chu, D. (1972) Polyphase codes with good periodic correlation properties, *IEEE Transactions on Information Theory*, **18**, 531–532.
6. Gold, R. (1967) Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing, *IEEE Transactions on Information Theory*, **13**, 619–621.
7. 3GPP TS 36.211 (September 2011) *Physical Channels and Modulation*, Release 10, section 6.10.
8. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10, section 6.2.2 (*Master Information Block*).
9. 3GPP TS 36.211 (September 2011) *Physical Channels and Modulation*, Release 10, section 6.6.
10. 3GPP TS 36.212 (September 2011) *Multiplexing and Channel Coding*, Release 10, section 5.3.1.
11. 3GPP TS 36.211 (September 2011) *Physical Channels and Modulation*, Release 10, sections 6.2.4, 6.7.
12. 3GPP TS 36.212 (September 2011) *Multiplexing and Channel Coding*, Release 10, section 5.3.4.
13. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10, sections 5.2, 6.2.2 (*System Information, System Information Block Type1*), 6.3.1.

8

Αποστολή και Λήψη Δεδομένων

Η αποστολή και λήψη δεδομένων είναι ένα από τα πιο πολύπλοκα μέρη του LTE. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα ξεκινήσουμε με μια επισκόπηση των διαδικασιών αποστολής και λήψης που χρησιμοποιούνται στην άνω και κάτω ζεύξη. Στη συνέχεια καλύπτουμε τα τρία βασικά στάδια των διαδικασιών αυτών με τη σειρά, δηλαδή την παράδοση των μηνυμάτων χρονοδιαγράμματος από το σταθμό βάσης, την πραγματική διαδικασία μετάδοσης δεδομένων και την παράδοση των επιβεβαιώσεων και οποιεσδήποτε συναφείς πληροφορίες ελέγχου από το δέκτη. Θα καλύψουμε επίσης τη μετάδοση των σημάτων αναφοράς άνω ζεύξης καθώς και δύο σχετικές διαδικασίες, δηλαδή τον έλεγχο ισχύος άνω ζεύξης και την ασυνεχή υποδοχή.

Αρκετές 3GPP προδιαγραφές σχετίζονται με αυτό το κεφάλαιο. Η αποστολή και λήψη δεδομένων ορίζονται από τις προδιαγραφές φυσικού επιπέδου που σημειώσαμε νωρίτερα, ιδιαίτερα των TS 36.211 [1], TS 36.212 [2] και TS 36.213 [3], και ελέγχονται από το πρωτόκολλο MAC κατά τον τρόπο που ορίζεται από την TS 36.321 [4]. Επιπλέον, ο σταθμός βάσης διαμορφώνει το φυσικό επίπεδο και τα πρωτόκολλα MAC του κινητού μέσω της RRC σηματοδότησης [5].

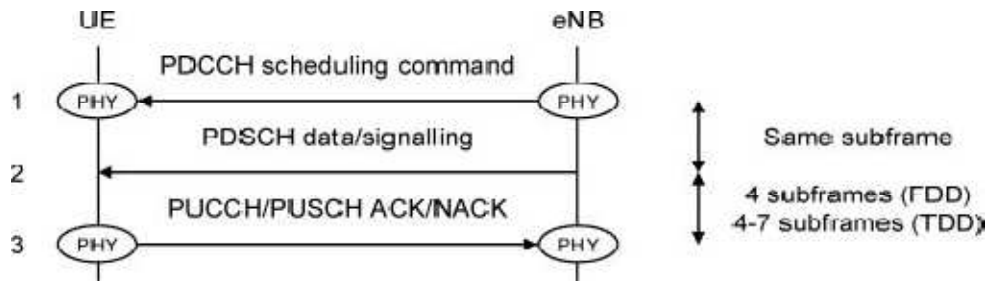
8.1 Διαδικασίες Μετάδοσης Δεδομένων

8.1.1 Αποστολή και Λήψη Κάτω Ζεύξης

Το Σχήμα 8.1 δείχνει τη διαδικασία που χρησιμοποιείται για μετάδοση και λήψη κάτω ζεύξης [6, 7]. Ο σταθμός βάσης ξεκινάει τη διαδικασία στέλνοντας στο κινητό μια *εντολή χρονοδιαγράμματος* (στάδιο 1), η οποία είναι γραμμένη χρησιμοποιώντας τις DCI και μεταδίδεται στο PDCCH. Η εντολή χρονοδιαγράμματος ειδοποιεί το κινητό σε μια επικείμενη μετάδοση δεδομένων και δηλώνει πώς θα σταλεί, καθορίζοντας παραμέτρους όπως η ποσότητα δεδομένων, η κατανομή ομάδας πόρου και το σύστημα διαμόρφωσης.

Στο στάδιο 2, ο σταθμός βάσης μεταδίδει τα δεδομένα στο DL-SCH και το PDSCH. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν είτε μια είτε δύο *ομάδες μεταφοράς*, των οποίων η διάρκεια είναι γνωστή ως το *χρονικό διάστημα μετάδοσης* (TTI), το οποίο ισούται με τη διάρκεια υποπλαισίου του 1 millisecond. Ως απάντηση (στάδιο 3), το κινητό συνθέτει μια επιβεβαίωση HARQ για να δείξει εάν τα στοιχεία έφθασαν σωστά. Στέλνει την αναγνώριση στο PUSCH αν μεταδίδει δεδομένα άνω ζεύξης στο ίδιο υποπλαίσιο και διαφορετικά, στο PUCCH.

Συνήθως, ο σταθμός βάσης κινείται σε μια νέα ομάδα μεταφοράς μετά από μια θετική επιβεβαίωση και μεταδίδει εκ νέου την αρχική μετά από μια αρνητική επιβεβαίωση. Εάν, ωστόσο, ο σταθμός βάσης φθάσει σε ένα ορισμένο μέγιστο αριθμό

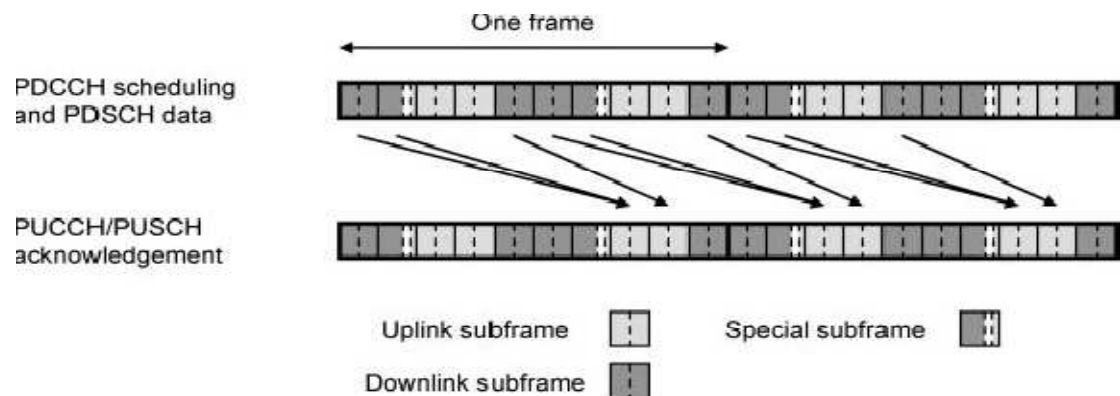


Σχήμα 8.1 Διαδικασία μετάδοσης και λήψης κάτω ζεύξης.

αναμεταδόσεων χωρίς να λάβει μια θετική απάντηση, τότε κινείται σε μια νέα μετάδοση ούτως ή άλλως, με το σκεπτικό ότι ο καταχωρητής λήψης του κινητού μπορεί να έχει καταστραφεί από μια έκρηξη παρεμβολών. Το πρωτόκολλο RLC τότε παίρνει το πρόβλημα, για παράδειγμα στέλνοντας την ομάδα μεταφοράς και πάλι από την αρχή.

Το χρονοδιάγραμμα μετάδοσης κάτω ζεύξης είναι ως ακολούθως. Η εντολή χρονοδιαγράμματος βρίσκεται στην περιοχή ελέγχου στην αρχή ενός υποπλαισίου κάτω ζεύξης, ενώ η ομάδα μεταφορών ανήκει στην περιοχή δεδομένων του ίδιου υποπλαισίου. Σε κατάσταση FDD, υπάρχει μία σταθερή χρονική καθυστέρηση από τέσσερα υποπλαίσια μεταξύ της ομάδας μεταφορών και της αντίστοιχης επιβεβαίωσης, η οποία βοηθάει το σταθμό βάσης να ταιριάζει τα δύο κομμάτια πληροφοριών μαζί. Σε κατάσταση TDD, η καθυστέρηση είναι μεταξύ τεσσάρων και επτά υποπλαισίων, σύμφωνα με μια αντιστοίχιση που εξαρτάται από τη διαμόρφωση TDD. Το Σχήμα 8.2 δείχνει ένα παράδειγμα αντιστοίχισης, για την περίπτωση της TDD διαμόρφωσης 1.

Όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3, η κάτω ζεύξη χρησιμοποιεί διάφορες παράλληλες διεργασίες HARQ, η καθεμία με το δικό της αντίγραφο των Σχημάτων 8.1 και 8.2. Σε κατάσταση FDD, ο μέγιστος αριθμός διεργασιών HARQ είναι οκτώ. Σε κατάσταση TDD, ο μέγιστος αριθμός εξαρτάται από τη διαμόρφωση TDD, μέχρι το απόλυτο ανώτατο όριο των 15 για TDD διαμόρφωση 5. Το LTE κάτω ζεύξης



Σχήμα 8.2 Σχέση μεταξύ χρονισμού δεδομένων κάτω ζεύξης και επιβεβαιώσεων άνω ζεύξης, για TDD διαμόρφωση 1.

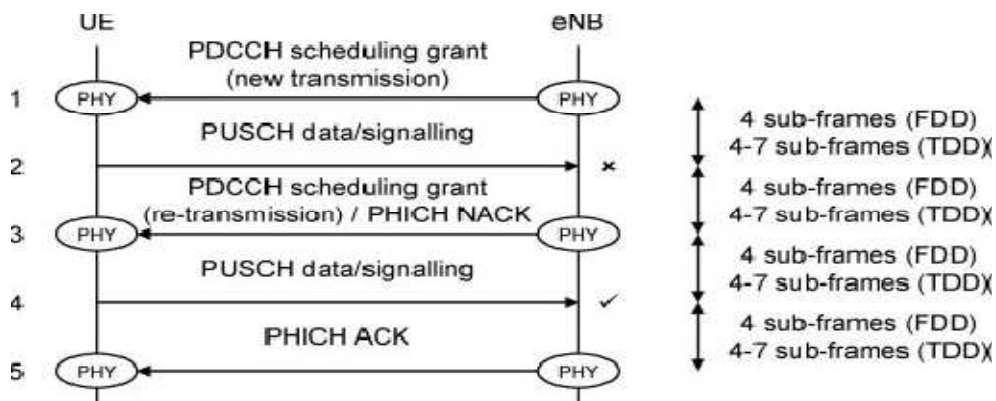
χρησιμοποιεί μια τεχνική γνωστή ως *ασύγχρονη HARQ*, στην οποία ο σταθμός βάσης καθορίζει ρητά τον αριθμό διαδικασίας HARQ σε κάθε εντολή χρονοδιαγράμματος. Ως εκ τούτου, δεν υπάρχει λόγος να καθοριστεί η χρονική καθυστέρηση ανάμεσα σε μια αρνητική επιβεβαίωση και σε μια αναμετάδοση: αντ' αυτού, ο σταθμός βάσης προγραμματίζει μια αναμετάδοση όποτε του αρέσει και δηλώνει απλά τον αριθμό διαδικασίας HARQ που χρησιμοποιεί.

8.1.2 Αποστολή και Λήψη Άνω Ζεύξης

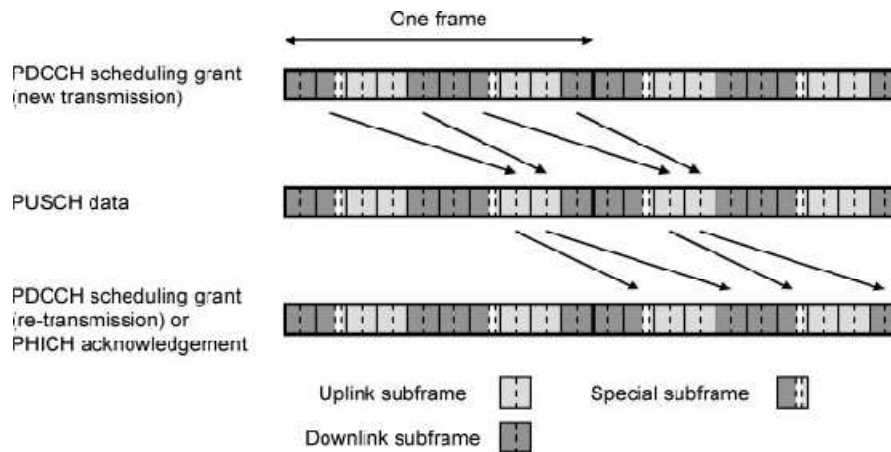
Το Σχήμα 8.3 δείχνει την αντίστοιχη διαδικασία για την άνω ζεύξη [8, 9]. Όπως και στην κάτω ζεύξη, ο σταθμός βάσης ξεκινά τη διαδικασία στέλνοντας στο κινητό μια *παραχώρηση χρονοδιαγράμματος* στο PDCCH (στάδιο 1). Αυτή δίνει άδεια για το κινητό να μεταδώσει και να αναφέρει όλες τις παραμέτρους μετάδοσης που θα πρέπει να χρησιμοποιεί, για παράδειγμα το μέγεθος της ομάδας μεταφοράς, την κατανομή ομάδας πόρων και το σύστημα διαμόρφωσης. Σε απάντηση, το κινητό πραγματοποιεί μια μετάδοση δεδομένων άνω ζεύξης στο UL-SCH και στο PUSCH (στάδιο 2).

Αν ο σταθμός βάσης λαμβάνει τα δεδομένα σωστά, τότε στέλνει στο κινητό μια θετική επιβεβαίωση στο PHICH. Αν δεν το κάνει, τότε υπάρχουν δύο τρόποι για να απαντήσει. Σε μία τεχνική, ο σταθμός βάσης μπορεί να προκαλέσει μια *μη προσαρμοστική αναμετάδοση* στέλνοντας στο κινητό μια αρνητική επιβεβαίωση στο PHICH. Στη συνέχεια το κινητό αναμεταδίδει τα δεδομένα με τις ίδιες παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για πρώτη φορά. Εναλλακτικά, ο σταθμός βάσης μπορεί να προκαλέσει μια *προσαρμοστική αναμετάδοση* στέλνοντας σαφώς στο κινητό άλλη παραχώρηση χρονοδιαγράμματος. Αυτό μπορεί να γίνει για να αλλάξει τις παραμέτρους που χρησιμοποιεί το κινητό για την αναμετάδοση, όπως είναι η χορήγηση ομάδας πόρων ή το σχέδιο διαμόρφωσης άνω ζεύξης. Εάν το κινητό λαμβάνει μια επιβεβαίωση PHICH και μια παραχώρηση χρονοδιαγράμματος PDCCH στο ίδιο υποπλαίσιο, τότε η παραχώρηση χρονοδιαγράμματος έχει προτεραιότητα.

Στο διάγραμμα, τα στάδια 3 έως 5 θεωρούν ότι ο σταθμός βάσης αποτυγχάνει



Σχήμα 8.3 Διαδικασία μετάδοσης και λήψης άνω ζεύξης.



Σχήμα 8.4 Σχέση μεταξύ του συγχρονισμού παραχωρήσεων χρονοδιαγράμματος, δεδομένων άνω ζεύξης και επιβεβαιώσεων κάτω ζεύξης για TDD διαμόρφωση 1.

να αποκωδικοποιήσει την πρώτη μετάδοση του κινητού, αλλά τα καταφέρνει με τη δεύτερη. Αν το κινητό φθάσει σε ένα μέγιστο αριθμό αναμεταδόσεων χωρίς να λάβει θετική απάντηση, τότε κινείται σε μια νέα μετάδοση ούτως ή άλλως και αφήνει το πρωτόκολλο RLC να λύσει το πρόβλημα.

Για άλλη μια φορά, η άνω ζεύξη χρησιμοποιεί αρκετές διεργασίες HARQ, η καθεμιά με το δικό της αντίγραφο του Σχήματος 8.3. Σε κατάσταση FDD, ο μέγιστος αριθμός των διεργασιών υβριδικής ARQ είναι οκτώ. Σε κατάσταση TDD, το απόλυτο μέγιστο είναι επτά σε TDD διαμόρφωση 0.

Η άνω ζεύξη χρησιμοποιεί μια τεχνική γνωστή ως *σύγχρονη HARQ*, στην οποία ο αριθμός διαδικασίας HARQ δεν είναι σαφής, αλλά αντ' αυτού ορίζεται με το χρονοδιάγραμμα μεταφοράς. Σε κατάσταση FDD, υπάρχει μία καθυστέρηση τεσσάρων υποπλαισίων μεταξύ της παραχώρησης χρονοδιαγράμματος και της αντίστοιχης μετάδοσης άνω ζεύξης, και άλλη μια καθυστέρηση υποπλαισίου των τεσσάρων, πριν από κάθε αίτημα αναμετάδοσης στην ίδια διαδικασία HARQ. Αυτό δίνει όλες τις πληροφορίες που χρειάζονται οι συσκευές για να ταιριάζουν με τις παραχωρήσεις χρονοδιαγράμματος, μεταδόσεις, επιβεβαιώσεις και αναμεταδόσεις.

Όπως και στην κάτω ζεύξη, η κατάσταση TDD χρησιμοποιεί ένα μεταβλητό σύνολο από καθυστερήσεις, σύμφωνα με μια αντιστοιχία που εξαρτάται από τη διαμόρφωση TDD. Το Σχήμα 8.4 δείχνει ένα παράδειγμα αντιστοιχίας, για την περίπτωση της TDD διαμόρφωσης 1.

8.1.3 Semi Persistent Scheduling

Κατά τη χρήση *semi persistent scheduling* (SPS) [10-12], ο σταθμός βάσης μπορεί να προγραμματίσει αρκετές μεταδόσεις που εκτείνονται σε πολλά υποπλάισια, στέλνοντας στο κινητό ένα ενιαίο μήνυμα χρονοδιαγράμματος που περιέχει μία μόνο κατανομή πόρων. Ο SPS έχει σχεδιαστεί για παροχή υπηρεσιών, όπως VoIP. Για τις υπηρεσίες αυτές, ο ρυθμός δεδομένων είναι χαμηλός, έτσι η επιβάρυνση του

μηνύματος χρονοδιαγράμματος μπορεί να είναι μεγάλη. Ωστόσο, ο ρυθμός δεδομένων είναι επίσης σταθερός, έτσι ο σταθμός βάσης μπορεί να χρησιμοποιήσει με βεβαιότητα την ίδια κατανομή πόρων από τη μία μετάδοση στην επόμενη.

Ο σταθμός βάσης διαμορφώνει ένα κινητό για SPS μέσω ενός συγκεκριμένου μηνύματος σηματοδότησης κινητού RRC. Ως μέρος του μηνύματος, προσδιορίζει το χρονικό διάστημα μεταξύ των μεταδόσεων, το οποίο βρίσκεται μεταξύ 10 και 640 υποπλαισίων. (Ένα διάστημα υποπλαισίου 20 είναι συχνά κατάλληλο για VoIP, σύμφωνα με τη διάρκεια ομάδας των 20 ms του κωδικοποιητή φωνής *προσαρμοσμένου πολλαπλού ρυθμού* (AMR)). Αργότερα, ο σταθμός βάσης μπορεί να ενεργοποιήσει SPS στέλνοντας στο κινητό μια ειδικά διαμορφωμένη εντολή χρονοδιαγράμματος ή παραχώρηση χρονοδιαγράμματος.

Στην κάτω ζεύξη, ο σταθμός βάσης στέλνει νέες μεταδόσεις στο PDSCH στο διάστημα που ορίζεται από τη διαμόρφωση SPS του κινητού, με τον τρόπο που υποδεικνύεται από την αρχική εντολή χρονοδιαγράμματος. Το κινητό επαναλαμβάνει τον αριθμό διαδικασίας HARQ για κάθε νέα μετάδοση, επειδή ο σταθμός βάσης δεν έχει τη δυνατότητα να το προσδιορίζει. Ωστόσο, ο σταθμός βάσης εξακολουθεί να προγραμματίζει ρητά όλες τις αναμεταδόσεις του, με τον τρόπο που φαίνεται στο Σχήμα 8.1. Μπορεί να καθορίσει συνεπώς διαφορετικές παραμέτρους μετάδοσης για αυτές, όπως διαφορετικές κατανομές ομάδας πόρων ή διαφορετικά συστήματα διαμόρφωσης. Μια παρόμοια κατάσταση ισχύει και στην άνω ζεύξη: το κινητό στέλνει νέες μεταδόσεις στο PUSCH, στο διάστημα που ορίζεται από την SPS διαμόρφωσή του, αλλά ο σταθμός βάσης συνεχίζει να προγραμματίζει τυχόν αναμεταδόσεις με τον τρόπο που φαίνεται στο Σχήμα 8.2.

Τελικά, ο σταθμός βάσης μπορεί να αφήσει την εκχώρηση SPS στέλνοντας στο κινητό άλλο ειδικά διαμορφωμένο μήνυμα χρονοδιαγράμματος. Επιπλέον, το κινητό μπορεί έμμεσα να αφήσει μια εκχώρηση SPS άνω ζεύξης αν έχει φτάσει σε ένα μέγιστο αριθμό ευκαιριών μετάδοσης χωρίς να έχει όλα τα δεδομένα για να στείλει.

8.2 Μετάδοση Μηνυμάτων Χρονοδιαγράμματος για το PDCCH

8.2.1 Πληροφορίες Ελέγχου Κάτω Ζεύξης

Εξετάζοντας τις λεπτομέρειες των διαδικασιών αποστολής και λήψης, θα ξεκινήσουμε με τη μετάδοση DCI στο PDCCH. Ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί τις δικές του πληροφορίες ελέγχου κάτω ζεύξης για να στείλει εντολές DCI, παραχωρήσεις χρονοδιαγράμματος άνω ζεύξης και εντολές ελέγχου ισχύος άνω ζεύξης στο κινητό. Η DCI μπορεί να γραφτεί χρησιμοποιώντας πολλές διαφορετικές μορφές, οι οποίες παρατίθενται στον Πίνακα 8.1 [13]. Κάθε μορφή περιέχει ένα συγκεκριμένο σύνολο πληροφοριών και έχει ένα συγκεκριμένο σκοπό.

DCI μορφή 0 περιέχει παραχωρήσεις χρονοδιαγράμματος για μεταδόσεις άνω ζεύξης του κινητού. Οι εντολές χρονοδιαγράμματος για μεταδόσεις κάτω ζεύξης είναι πιο πολύπλοκες, και διεκπεραιώνονται στην Έκδοση 8 από DCI μορφές 1 έως 1D και

Πίνακας 8.1 Κατάλογος μορφών DCI και οι εφαρμογές τους

DCI format	Release		Purpose	Resource allocation	DL mode
0	R8	UL scheduling grants	1 antenna	-	-
1	R8	DL scheduling commands	1 antenna, open loop diversity, beamforming	Type 0, 1	1, 2, 7
1A	R8		1 antenna, open loop diversity	Type 2	Any
1B	R8		Closed loop diversity	Type 2	6
1C	R8		System information, paging, random access responses	Type 2	Any
1D	R8		Multiple user MIMO	Type 2	5
2	R8	DL scheduling commands	Closed loop MIMO	Type 0, 1	4
2A	R8		Open loop MIMO	Type 0, 1	3
2B	R9		Dual layer beamforming	Type 0, 1	8
2C	R10		8 layer MIMO	Type 0, 1	9
3	R8	UL power control	2 bit power adjustments	-	-
3A	R8		1 bit power adjustments	-	-
4	R10	UL scheduling grants	Closed loop MIMO	-	-

2 έως 2A.

Η DCI μορφή 1 σχεδιάζει δεδομένα που ο σταθμός βάσης θα μεταδώσει, χρησιμοποιώντας μία κεραία, διαφορισμό ανοιχτού βρόχου ή beamforming, για κινητά που έχουν ήδη διαμορφωθεί σε μία από τις λειτουργίες μετάδοσης κάτω ζεύξης 1, 2 ή 7. Όταν χρησιμοποιείται αυτή τη μορφή, ο σταθμός βάσης μπορεί να διαθέσει την RBs κάτω ζεύξης με ευέλικτο τρόπο, μέσω των δύο συστημάτων κατανομής πόρων, γνωστά ως τύπος 0 και τύπος 1 που θα περιγράψουμε παρακάτω.

Η μορφή 1A είναι παρόμοια, αλλά ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί μια συμπιεσμένη μορφή της κατανομής πόρων, γνωστή ως τύπος 2. Η μορφή 1A μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε λειτουργία μετάδοσης κάτω ζεύξης. Εάν το κινητό έχει προηγουμένως ρυθμιστεί σε έναν από τους τρόπους μετάδοσης 3 έως 7, τότε λαμβάνει τα δεδομένα υποχωρώντας στην ενιαία λήψη κεραίας αν ο σταθμός βάσης έχει μια θύρα κεραίας, ή διαφορετικά, διαφορεική μετάδοση ανοικτού βρόχου.

Παρακάμπτοντας μια γραμμή, η μορφή 1C χρησιμοποιεί μια πολύ συμπαγή μορφή που καθορίζει μόνο την κατανομή των πόρων και την ποσότητα των δεδομένων που ο σταθμός βάσης θα στείλει. Στην ακόλουθη μετάδοση δεδομένων, το σύστημα διαμόρφωσης καθορίζεται σε QPSK και η HARQ δεν χρησιμοποιείται. Η μορφή 1C χρησιμοποιείται μόνο για να προγραμματίσει μηνύματα πληροφοριών του συστήματος, μηνύματα αναζήτησης και απαντήσεις τυχαίας πρόσβασης, για της οποίες αυτή η πολύ συμπαγής μορφή είναι κατάλληλη.

Οι μορφές 1B, 1D, 2 και 2A χρησιμοποιούνται αντίστοιχα για διαφορεική μετάδοση κλειστού βρόχου, την Έκδοση 8 υλοποίησης MU-MIMO, και χωρική πολύπλεξη κλειστού και ανοικτού βρόχου. Περιλαμβάνουν επιπλέον πεδία για να επισημάνουν πληροφορίες όπως τον πίνακα προκωδικοποίησης που ο σταθμός βάσης θα εφαρμόσει στο PDSCH και τον αριθμό των στρωμάτων που ο σταθμός βάσης θα μεταδώσει.

Σε αντίθεση με τις άλλες, οι DCI μορφές 3 και 3A δεν προγραμματίζουν

οποιοσδήποτε μεταδόσεις: αντ' αυτού, ελέγχουν την ισχύ που μεταδίδει το κινητό στην άνω ζεύξη μέσω των ενσωματωμένων εντολών ελέγχου ισχύος. Εμείς θα καλύψουμε αυτή τη διαδικασία αργότερα στο κεφάλαιο. Οι μορφές 2B, 2C και 4 εισάγονται στις Εκδόσεις 9 και 10, και καλύπτονται προς το τέλος του βιβλίου.

8.2.2 Κατανομή Πόρων

Ο σταθμός βάσης έχει διάφορους τρόπους κατανομής των RBs σε μεμονωμένα κινητά, στην άνω και κάτω ζεύξη [14, 15]. Στην κάτω ζεύξη, όπως σημειώνεται παραπάνω, μπορεί να χρησιμοποιήσει δύο ευέλικτες μορφές κατανομής πόρων, γνωστές ως τύποι 0 και 1 και μια συμπαγή μορφή, γνωστή ως τύπος 2.

Όταν χρησιμοποιείται κατανομή πόρων κάτω ζεύξης τύπου 0, ο σταθμός βάσης συλλέγει τις RBs σε ομάδες μπλοκ των πόρων (RBGs), τις οποίες εκχωρεί ανεξάρτητα χρησιμοποιώντας ένα αρχείο bitmap. Με τον τύπο 1 κατανομής πόρων, μπορεί να αποδώσει μεμονωμένες RBs μέσα σε μια ομάδα, αλλά έχει λιγότερη ευελιξία πάνω από την εκχώρηση των ίδιων των ομάδων. Η κατανομή τύπου 1 μπορεί να είναι κατάλληλη σε περιβάλλοντα με σοβαρή εξασθένιση που εξαρτάται από τη συχνότητα, στην οποία η ανάλυση συχνότητας τύπου 0 θα μπορούσε να είναι πολύ μεγάλη.

Κατά τη χρήση κατανομής πόρων τύπου 2, ο σταθμός βάσης δίνει στο κινητό μια συνεχόμενη κατανομή *εικονικών ομάδων πόρων* (VRBs). Στην κάτω ζεύξη, αυτές διατίθενται σε δύο ποικιλίες: εντοπισμένη και διανεμημένη. Οι εντοπισμένες VRBs είναι ταυτόσημες με τις φυσικές ομάδες πόρων (PRBs) που έχουμε ήδη εξετάζει κάπου αλλού, έτσι, όταν χρησιμοποιούνται αυτές, το κινητό λαμβάνει απλά μια συνεχόμενη ομάδα κατανομής πόρων. Οι διανεμημένες VRBs σχετίζονται με τις PRBs με μια λειτουργία αντιστοιχίας, η οποία είναι διαφορετική στις πρώτες και στις δεύτερες σχισμές ενός υποπλαισίου. Η χρήση των διανεμημένων VRBs πόρων δίνει στο κινητό επιπλέον διαφορεική συχνότητα και είναι κατάλληλη σε περιβάλλοντα που υπόκεινται σε εξασθένιση που εξαρτάται από τη συχνότητα.

Το κινητό λαμβάνει επίσης μια συνεχόμενη κατανομή VRBs για τις μεταδόσεις της άνω ζεύξης του. Η σημασία τους εξαρτάται από το αν ο σταθμός βάσης έχει ζητήσει τη χρήση *αναπήδησης συχνότητας* σε μορφή DCI 0. Αν η αναπήδηση συχνότητας είναι απενεργοποιημένη, τότε οι VRBs άνω ζεύξης αντιστοιχούν κατευθείαν σε PRBs. Αν η αναπήδηση συχνότητας είναι ενεργοποιημένη, τότε οι VRBs και οι PRBs συνδέονται χρησιμοποιώντας μια αντιστοιχία που είναι είτε ρητά σηματοδοτημένη (αναπήδηση τύπου 1) είτε ακολουθεί ένα ψευδοτυχαίο πρότυπο (αναπήδηση τύπου 2). Ένα κινητό μπορεί επίσης να αλλάξει τη συχνότητα μετάδοσης σε κάθε υποπλαίσιο ή σε κάθε υποδοχή, ανάλογα με μια λειτουργία αναπήδησης που έχει ρυθμιστεί χρησιμοποιώντας RRC σηματοδότηση.

Στην άνω ζεύξη, ο αριθμός των RBs ανά κινητό πρέπει να είναι είτε 1, είτε ένας αριθμός του οποίου πρωταρχικοί παράγοντες είναι 2, 3 ή 5. Ο λόγος έγκειται στον πρόσθετο μετασχηματισμό Fourier που χρησιμοποιείται από το SC-FDMA, το

οποίο τρέχει γρήγορα εάν ο αριθμός των υπο-φερουσών είναι μία δύναμη του 2 ή ένα προϊόν από μικρούς πρώτους αριθμούς και μόνο, αλλά αργά, αν εμπλέκεται ένας μεγάλος πρώτος αριθμός.

8.2.3 Παράδειγμα: DCI Μορφή 1

Για να φανούν οι DCI μορφές, ο πίνακας 8.2 δείχνει τα περιεχόμενα της DCI μορφής 1 στην Έκδοση 8. Οι άλλες μορφές δεν είναι τόσο διαφορετικές: οι λεπτομέρειες μπορούν να βρεθούν στις προδιαγραφές.

Ο σταθμός βάσης υποδεικνύει αν το κινητό θα πρέπει να χρησιμοποιεί την κατανομή πόρου τύπου 0 ή 1 χρησιμοποιώντας την κεφαλίδα κατανομής πόρου και πραγματοποιεί την κατανομή χρησιμοποιώντας την εκχώρηση ομάδας πόρου. Σε ένα εύρος ζώνης 1.4 MHz, η κατανομή τύπου 0 δεν υποστηρίζεται, έτσι το πεδίο κεφαλίδας παραλείπεται.

Η διαμόρφωση και το σύστημα κωδικοποίησης είναι ένας αριθμός 5 bit, από τον οποίο το κινητό μπορεί να αναζητήσει το σχέδιο διαμόρφωσης που θα χρησιμοποιήσει το PDSCH (QPSK, 16-QAM ή 64-QAM) και τον αριθμό των bits στην ομάδα μεταφοράς. Συγκρίνοντας το μέγεθος της ομάδας μεταφοράς με τον αριθμό των RE στην κατανομή της, το κινητό μπορεί να υπολογίσει το ρυθμό κωδικοποίησης για το DL-SCH.

Όπως σημειώθηκε νωρίτερα, ο σταθμός βάσης σηματοδοτεί ρητά τον αριθμό διαδικασίας HARQ σε κάθε εντολή χρονοδιαγράμματος κάτω ζεύξης. Ο σταθμός βάσης εναλλάσσει επίσης το νέο δείκτη δεδομένων για κάθε νέα μετάδοση, ενώ τον αφήνει αμετάβλητο για μια αναμετάδοση. Η έκδοση πλεονασμού υποδεικνύει ποια από τα turbo κωδικοποιημένα bits θα μεταδοθούν μετά το στάδιο προσαρμογής ρυθμού και ποια θα πρέπει να διατρυπηθούν.

Ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί την εντολή *ελέγχου μετάδοσης ισχύος* (TPC) για το PUCCH για να ρυθμίσει την ισχύ που θα χρησιμοποιήσει το κινητό κατά την αποστολή UCI στο PUCCH. (Αυτή είναι μια εναλλακτική τεχνική με την προσαρμογή της εκπομπής ισχύος χρησιμοποιώντας DCI μορφές 3 και 3A). Σε

Πίνακας 8.2 Περιεχόμενα της μορφής DCI 1 στην 3GPP Έκδοση 8

Field	Number of bits
Resource allocation header	0 (1.4 MHz) or 1 (otherwise)
Resource block assignment	6 (1.4 MHz) to 25 (20 MHz)
Modulation and coding scheme	5
HARQ process number	3 (FDD) or 4 (TDD)
New data indicator	1
Redundancy version	2
TPC command for PUCCH	2
Downlink assignment index	2 (TDD only)
Padding	0 or 1

κατάσταση TDD, χρησιμοποιεί το δείκτη ανάθεσης κάτω ζεύξης για να βοηθήσει τη μετάδοση του κινητού στις επιβεβαιώσεις άνω ζεύξης, με τον τρόπο που θα περιγράψουμε αργότερα.

Υπάρχει μια σημαντική παράλειψη από τον Πίνακα 8.2: δεν υπάρχει πεδίο κεφαλίδας για να δείξει ποια είναι στην πραγματικότητα η μορφή DCI. Αν και μερικές από τις άλλες μορφές πράγματι περιέχουν τέτοιες κεφαλίδες, το κινητό συνήθως διακρίνει τις διαφορετικές μορφές DCI από το γεγονός ότι περιέχουν διαφορετικούς αριθμούς από bits. Ο σταθμός βάσης προσθέτει μερικές φορές ένα bit συμπληρώματος στο τέλος της εντολής χρονοδιαγράμματος, για να εξασφαλιστεί ότι η μορφή 1 περιέχει ένα διαφορετικό αριθμό bits από όλες τις άλλες.

8.2.4 Προσωρινά Αναγνωριστικά Ασύρματου Δικτύου

Ο σταθμός βάσης μεταδίδει ένα μήνυμα χρονοδιαγράμματος PDCCH απευθύνοντάς το σε ένα προσωρινό αναγνωριστικό ασύρματου δικτύου (RNTI) [16]. Στο LTE, ένα RNTI ορίζει δύο πράγματα: την ταυτότητα του κινητού (ων) που θα πρέπει να διαβάσουν το μήνυμα χρονοδιαγράμματος και το είδος των πληροφοριών που προγραμματίζονται. Ο Πίνακας 8.3 απαριθμεί τα RNTIs που χρησιμοποιούνται από το LTE, μαζί με τις δεκαεξαδικές τιμές που μπορούν να χρησιμοποιήσουν.

Η *κυψέλη RNTI* (C-RNTI) είναι η πιο σημαντική. Ο σταθμός βάσης εκχωρεί μια μοναδική C-RNTI σε ένα κινητό, ως μέρος της διαδικασίας τυχαίας πρόσβασης. Αργότερα, μπορεί να προγραμματίσει μια μετάδοση που εκτείνεται πάνω από ένα υποπλαίσιο, με την αποστολή ενός μηνύματος χρονοδιαγράμματος στη C-RNTI του κινητού.

Η *SPS C-RNTI* χρησιμοποιείται για SPS. Ο σταθμός βάσης πρώτα καθορίζει μια SPS C-RNTI σε ένα κινητό χρησιμοποιώντας RRC σηματοδότηση ειδικά για κινητά. Αργότερα, μπορεί να προγραμματίσει μια μετάδοση που εκτείνεται πάνω σε αρκετά υποπλάγια με την αποστολή ενός ειδικά διαμορφωμένου μηνύματος χρονοδιαγράμματος στη SPS C-RNTI.

Η *αναζήτηση RNTI* (P-RNTI) και οι *πληροφορίες συστήματος RNTI* (SI-RNTI) είναι σταθερές τιμές, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να προγραμματίσουν τη

Πίνακας 8.3 Κατάλογος RNTIs και οι εφαρμογές τους. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI

Type of RNTI	Release	Information scheduled	Hex value
RA-RNTI	R8	Random access response	0001 - 003C
Temporary C-RNTI	R8	Random access contention resolution	
C-RNTI	R8	One UL or DL transmission	
SPS C-RNTI	R8	Several UL or DL transmissions	003D - FFF3
TPC-PUCCH-RNTI	R8	Embedded PUCCH TPC command	
TPC-PUSCH-RNTI	R8	Embedded PUSCH TPC command	
M-RNTI	R9	MBMS change notification	FFFD
P-RNTI	R8	Paging message	FFFE
SI-RNTI	R8	System information message	FFFF

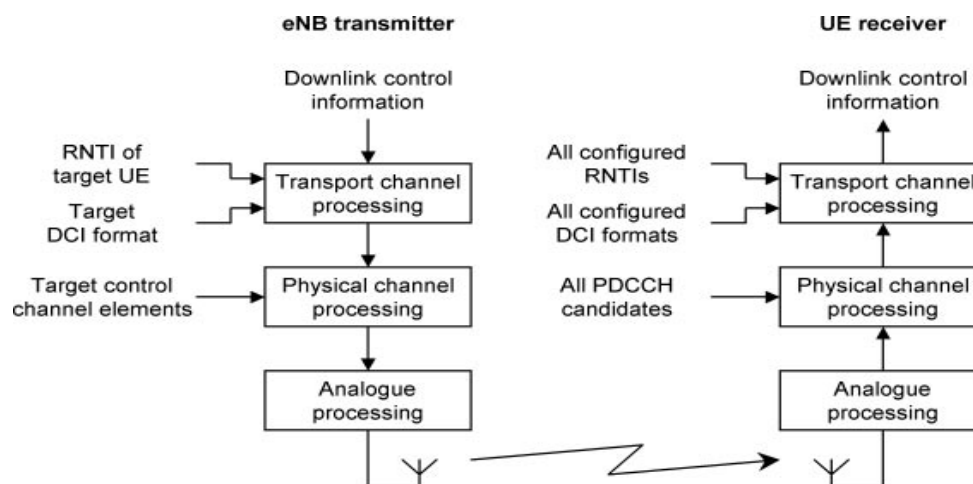
μετάδοση μηνυμάτων αναζήτησης και πληροφοριών συστήματος σε όλα τα κινητά τηλέφωνα στην κυψέλη. Η προσωρινή C-RNTI και το RNTI τυχαίας πρόσβασης (RA-RNTI) είναι προσωρινά πεδία κατά τη διάρκεια της διαδικασίας τυχαίας πρόσβασης (Κεφάλαιο 9), ενώ το MBMS RNTI (M-RNTI) χρησιμοποιείται από την MBMS (Κεφάλαιο 17). Εν τέλει, τα TPC-PUCCH-RNTI και TPC-PUSCH-RNTI χρησιμοποιούνται για να στείλουν ενσωματωμένες εντολές ελέγχου ισχύος άνω ζεύξης χρησιμοποιώντας DCI μορφές 3 και 3A.

8.2.5 Μετάδοση και Λήψη του PDCCH

Τώρα είμαστε σε θέση να συζητήσουμε πώς μεταδίδεται και λαμβάνεται το PDCCH, μια διαδικασία που συνοψίζεται στο Σχήμα 8.5. Στον επεξεργαστή καναλιού μεταφοράς του, ο σταθμός βάσης χειρίζεται πρώτα το DCI με προσάρτηση ενός CRC και κωδικοποίηση διόρθωσης λάθους [17], με ένα τρόπο που εξαρτάται από το RNTI του κινητού στόχου. Στη συνέχεια επεξεργάζεται το PDCCH με διαμόρφωση QPSK και είτε απλή μετάδοση κεραίας είτε διαφορική εκπομπή ανοικτού βρόχου, ανάλογα με τον αριθμό των θυρών κεραιών που έχει [18]. Τέλος, ο σταθμός βάσης καθορίζει το PDCCH πάνω στα επιλεγμένα RE.

Η αντιστοίχιση RE για το PDCCH οργανώνεται χρησιμοποιώντας στοιχεία ελέγχου καναλιού (CCEs) [19], καθένα από τα οποία περιέχει εννέα REGs που δεν έχουν ακόμα εκχωρηθεί στο PCFICH ή στο PHICH. Ανάλογα με το μήκος του μηνύματος DCI, ο σταθμός βάσης μπορεί να μεταδώσει ένα μήνυμα χρονοδιαγράμματος PDCCH αντιστοιχίζοντάς το σε ένα, δύο, τέσσερα ή οκτώ διαδοχικά CCEs, με άλλα λόγια σε 36, 72, 144 ή 288 RE.

Με τη σειρά τους, τα CCEs οργανώνονται σε χώρους αναζήτησης. Αυτοί έρχονται σε δύο τύπους. Οι κοινοί χώροι αναζήτησης είναι διαθέσιμοι σε όλα τα κινητά τηλέφωνα στην κυψέλη και βρίσκονται σε σταθερές θέσεις εντός της περιοχής



Σχήμα 8.5 Μετάδοση και λήψη του PDCCH.

ελέγχου κάτω ζεύξης. Οι *ειδικοί για UE χώροι αναζήτησης* έχουν εκχωρηθεί σε ομάδες κινητών και έχουν θέσεις που εξαρτώνται από τα RNTIs των κινητών. Κάθε χώρος αναζήτησης περιέχει μέχρι και 16 CCEs, έτσι περιέχει αρκετές θέσεις όπου ο σταθμός βάσης μπορεί να μεταδώσει DCI. Ο σταθμός βάσης μπορεί επομένως να χρησιμοποιεί αυτούς τους χώρους αναζήτησης για να στείλει αρκετά μηνύματα PDCCH σε πολλά διαφορετικά κινητά ταυτόχρονα.

Ένα κινητό στη συνέχεια, λαμβάνει το PDCCH ως εξής. Κάθε υποπλαίσιο, το κινητό διαβάζει το δείκτη μορφής ελέγχου, και καθορίζει το μέγεθος της περιοχής ελέγχου κάτω ζεύξης και τις θέσεις των κοινών και ειδικών για UE χώρων αναζήτησης. Σε κάθε χώρο αναζήτησης, προσδιορίζει τα πιθανά *υποψήφια PDCCH*, τα οποία είναι CCEs όπου ο σταθμός βάσης θα μπορούσε να έχει μεταδώσει DCI. Το κινητό επιχειρεί στη συνέχεια να επεξεργαστεί κάθε υποψήφιο PDCCH, χρησιμοποιώντας όλους τους συνδυασμούς RNTI και DCI μορφής που έχει διαμορφώσει για να αναζητήσει. Αν τα παρατηρούμενα CRC bits αντιστοιχούν με αυτά που αναμένονται, τότε καταλήγει στο συμπέρασμα ότι το μήνυμα εστάλη χρησιμοποιώντας τη μορφή RNTI και DCI που έψαχνε. Κατόπιν διαβάζει τις DCI και ενεργεί πάνω σε αυτές.

Ο CRC μπορεί να αποτύχει για διάφορους λόγους: ο σταθμός βάσης μπορεί να μην έχει στείλει ένα μήνυμα χρονοδιαγράμματος σε αυτά τα CCEs ή μπορεί να έχει στείλει ένα μήνυμα χρονοδιαγράμματος χρησιμοποιώντας μια διαφορετική DCI μορφή ή μια διαφορετική RNTI, ή το κινητό ενδέχεται να έχει αποτύχει να διαβάσει το μήνυμα λόγω ενός μη διορθωμένου bit σφάλματος. Οποιαδήποτε κατάσταση ισχύει, η απάντηση του κινητού είναι η ίδια: κινείται στον επόμενο συνδυασμό της υποψήφιας PDCCH, RNTI και DCI μορφής, και προσπαθεί ξανά.

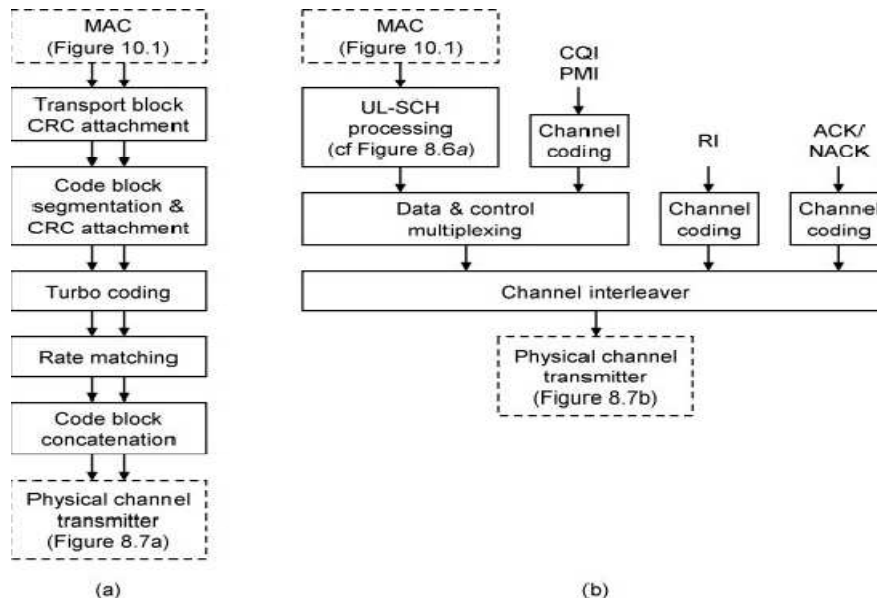
8.3 Μετάδοση Δεδομένων στα PDSCH και PUSCH

8.3.1 Επεξεργασία Μεταφοράς Καναλιού

Αφού ο σταθμός βάσης έχει στείλει στο κινητό μια εντολή χρονοδιαγράμματος, μπορεί να μεταδώσει το DL-SCH με τον τρόπο που ορίζεται η εντολή χρονοδιαγράμματος. Μετά την λήψη μιας παραχώρησης χρονοδιαγράμματος άνω ζεύξης, το κινητό μπορεί να μεταδώσει την UL-SCH με παρόμοιο τρόπο. Το Σχήμα 8.6 δείχνει τα βήματα που χρησιμοποιεί ο επεξεργαστής μεταφοράς καναλιού για να στείλει τα δεδομένα [20].

Στο επάνω μέρος του σχήματος, το πρωτόκολλο MAC στέλνει πληροφορίες στο φυσικό επίπεδο με τη μορφή ομάδων μεταφοράς. Το μέγεθος κάθε ομάδας μεταφοράς ορίζεται από τις DCI, ενώ η διάρκειά της είναι 1 ms TTI.

Στην άνω ζεύξη, το κινητό στέλνει μια ομάδα μεταφοράς τη φορά. Στην κάτω ζεύξη, ο σταθμός βάσης συνήθως στέλνει μια ομάδα μεταφοράς σε κάθε κινητό, αλλά μπορεί να στείλει δύο, κατά τη χρήση χωρικής πολύπλεξης (DCI μορφές 2 και 2A). Οι δύο ομάδες μεταφοράς μπορούν να έχουν διαφορετικά συστήματα διαμόρφωσης και ρυθμούς κωδικοποίησης, αντιστοιχίζονται σε διαφορετικά στρώματα και



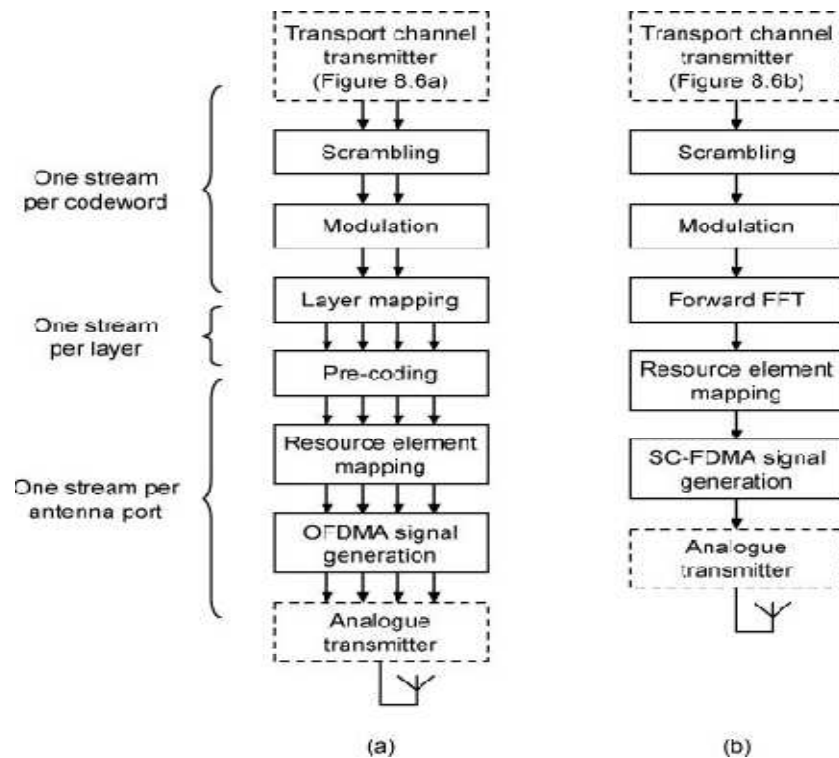
Σχήμα 8.6 Επεξεργασία μεταφοράς καναλιού στις Εκδόσεις 8 και 9, για τα (α) DL-SCH (β) UL-SCH. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI.

επιβεβαιώνονται ξεχωριστά. Αυτό αυξάνει το ποσοστό σηματοδότησης, έτσι προσθέτει κάποια επιβάρυνση στη μετάδοση. Όπως σημειώθηκε στο Κεφάλαιο 5, ωστόσο, διαφορετικά στρώματα μπορούν να φτάσουν το κινητό με διαφορετικές τιμές του SINR, έτσι μπορούμε να βελτιώσουμε την απόδοση της διεπαφής αέρα μεταδίδοντας ένα στρώμα υψηλού SINR χρησιμοποιώντας ένα γρήγορο σχέδιο διαμόρφωσης και ρυθμό κωδικοποίησης, και το αντίστροφο. Με τον περιορισμό του μέγιστου αριθμού των ομάδων μεταφοράς σε δύο αντί για τέσσερις, φτάνουμε σε ένα συμβιβασμό μεταξύ των δύο αυτών αντικρουόμενων κριτηρίων.

Στην κάτω ζεύξη (Σχήμα 8.6a), ο σταθμός βάσης προσθέτει ένα CRC 24 bit σε κάθε ομάδα μεταφοράς DL-SCH, το διαχωρίζει σε ομάδες κωδικών με μέγιστο μέγεθος 6144 bits και προσθέτει άλλο ένα CRC σε κάθε μία. Περνά έπειτα τα δεδομένα μέσω ενός ποσοστού turbo κωδικοποιητή του $\frac{1}{3}$. Το στάδιο ποσοστού αντιστοίχισης αποθηκεύει τα προκύπτοντα bits σε μια κυκλική ενδιάμεση μνήμη και κατόπιν επιλέγει bits από την ενδιάμεση μνήμη για τη μετάδοση. Ο αριθμός των μεταδιδόμενων bits προσδιορίζεται από το μέγεθος της κατανομής πόρου και η ακριβής επιλογή καθορίζεται από την έκδοση πλεονασμού. Τέλος, ο σταθμός βάσης επανασυνδέει τις κωδικοποιημένες ομάδες μεταφοράς και τις στέλνει στο φυσικό επεξεργαστή καναλιού υπό τη μορφή *κωδικών λέξεων*.

Το κινητό επεξεργάζεται τα ληφθέντα δεδομένα με τον τρόπο που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3. Ο turbo αλγόριθμος αποκωδικοποίησης είναι επαναληπτικός, ο οποίος συνεχίζεται μέχρις ότου η CRC ομάδα κώδικα περάσει. Ο δέκτης στη συνέχεια επανασυνδέει κάθε ομάδα μεταφοράς και χρησιμοποιεί την ομάδα μεταφοράς CRC για ανίχνευση λαθών.

Στην άνω ζεύξη (Σχήμα 8.6b), το κινητό μεταδίδει το UL-SCH μέσω των ίδιων βημάτων που ο σταθμός βάσης χρησιμοποίησε στην κάτω ζεύξη. Εάν το κινητό



Σχήμα 8.7 Επεξεργασία φυσικού καναλιού στις Εκδόσεις 8 και 9, για τα (a) PDSCH (b) PUSCH. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI.

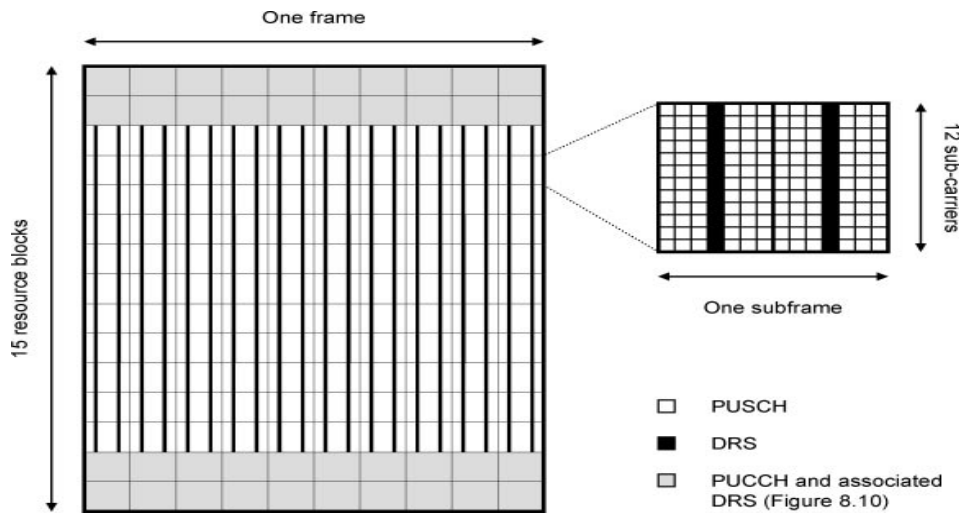
στέλνει UCI στο ίδιο υποπλαίσιο, τότε επεξεργάζεται τα bits ελέγχου χρησιμοποιώντας εμπρόσθια διόρθωση λάθους και τα πολυπλέκει στο UL-SCH, με τον τρόπο που υποδεικνύεται από το διάγραμμα.

8.3.2 Επεξεργασία Φυσικού Καναλιού

Ο επεξεργαστής μεταφοράς καναλιού μεταβιβάζει την εξερχόμενη (εξ) κωδική λέξη (εις) στον επεξεργαστή φυσικού καναλιού, ο οποίος τις μεταδίδει με τον τρόπο που φαίνεται στο Σχήμα 8.7 [21].

Στην κάτω ζεύξη (Σχήμα 8.7a), το στάδιο κρυπτογράφησης αναμιγνύει κάθε κωδική λέξη με μία ψευδοτυχαία ακολουθία που εξαρτάται από τη φυσική ID της κυψέλης και το στόχο RNTI, για να μειώσει την παρεμβολή μεταξύ των μεταδόσεων από γειτονικές κυψέλες. Το πρόγραμμα αντιστοίχισης διαμόρφωσης παίρνει τα προκύπτοντα bits σε ομάδες των δύο, τεσσάρων ή έξι και τα αντιστοιχίζει πάνω στις «σε φάση» και τετραγωνισμό συνιστώσες χρησιμοποιώντας QPSK, 16-QAM ή 64-QAM.

Τα επόμενα δύο στάδια εφαρμόζουν τις τεχνικές μετάδοσης πολλαπλών κεραιών από το Κεφάλαιο 5. Το στάδιο αντιστοίχισης στρώματος παίρνει τις κωδικές λέξεις και τις αντιστοιχίζει πάνω σε ένα έως τέσσερα ανεξάρτητα στρώματα, ενώ το στάδιο προκωδικοποίησης εφαρμόζει τον επιλεγμένο πίνακα προκωδικοποίησης και



Σχήμα 8.8 Αντιστοίχιση RE για το PUSCH και το DRS του, χρησιμοποιώντας κατάσταση FDD, ένα κανονικό CP, ένα εύρος ζώνης 3MHz και δύο ζεύγη RBs για την PUCCH.

αντιστοιχίζει τα στρώματα πάνω στις διαφορετικές θύρες κεραιών.

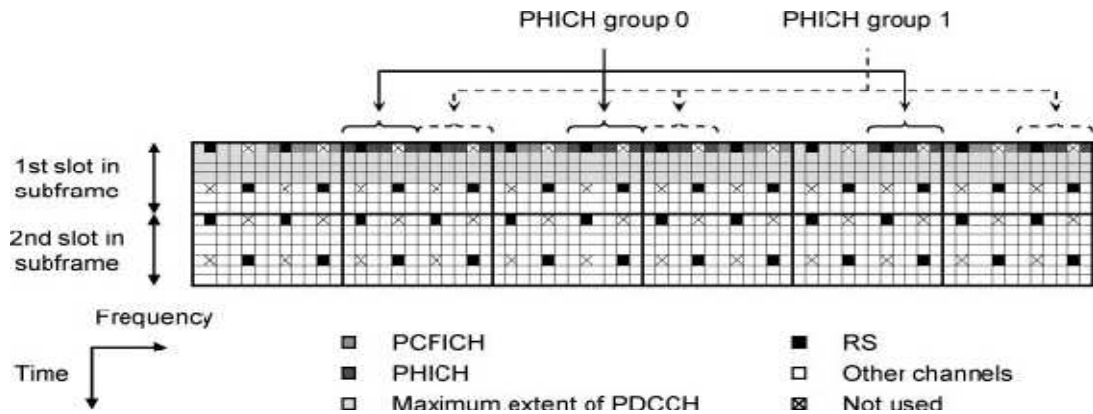
Το πρόγραμμα αντιστοίχισης RE πραγματοποιεί μια σειριακή σε παράλληλη μετατροπή και σχεδιάζει τις προκύπτουσες υπο-ροές επάνω στις επιλεγμένες υπο-φέρουσες, μαζί με τις υπο-ροές που προκύπτουν από όλες τις άλλες μεταδόσεις δεδομένων, τα κανάλια ελέγχου και τα φυσικά σήματα. Το PDSCH καταλαμβάνει REs στην περιοχή δεδομένων του κάθε υποπλαισίου που δεν έχουν εκχωρηθεί σε άλλα κανάλια ή σήματα, με τον τρόπο που φαίνεται στο Σχήμα 6.10. Τέλος, η γεννήτρια σήματος OFDMA, εφαρμόζει έναν αντίστροφο FFT και μια παράλληλη σε σειριακή μετατροπή και εισάγει το CP. Το αποτέλεσμα είναι μια ψηφιακή αναπαράσταση στο πεδίο του χρόνου δεδομένων που θα μεταδοθεί από κάθε θύρα κεραιάς.

Υπάρχουν μόνο μερικές διαφορές στην άνω ζεύξη (Σχήμα 8.7b). Πρώτον, η μέθοδος περιλαμβάνει την εμπρόσθια FFT που είναι το χαρακτηριστικό γνώρισμα του SC-FDMA. Δεύτερον, δεν υπάρχει αντιστοιχία στρώματος ή προκωδικοποίησης, επειδή η άνω ζεύξη δε χρησιμοποιεί SU-MIMO στην Έκδοση 8 του LTE. Τρίτον, το PUSCH καταλαμβάνει ένα συνεχόμενο σύνολο RBs προς το κέντρο της ζώνης άνω ζεύξης, με τα άκρα που προορίζονται για το PUCCH. Κάθε υποπλαίσιο περιέχει έξι σύμβολα PUCCH και ένα σύμβολο αναφοράς αποδιαμόρφωσης, με τον τρόπο που απεικονίζεται στο Σχήμα 8.8.

8.4 Μετάδοση Δεικτών Υβριδικής ARQ στο PHICH

8.4.1 Εισαγωγή

Τώρα μπορούμε να αρχίσουμε να συζητάμε την ανάδραση που ο δέκτης στέλνει πίσω



Σχήμα 8.9 Αντιστοίχιση RE για το PHICH, χρησιμοποιώντας μια κανονική διάρκεια PHICH, ένα κανονικό CP, ένα εύρος ζώνης 1.4MHz, την πρώτη θύρα κεραίας των δύο, μια φυσική ID κυψέλης του 1 και δύο ομάδες PHICH.

στον πομπό. Η ανάδραση του σταθμού βάσης είναι πιο εύκολο να κατανοηθεί από ό,τι του κινητού και είναι μια καλύτερη θέση για να ξεκινήσουμε.

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μετάδοσης και λήψης άνω ζεύξης, ο σταθμός βάσης στέλνει επιβεβαιώσεις στα κινητά υπό τη μορφή HIs και τις μεταδίδει στο PHICH [22-25]. Η ακριβής τεχνική μετάδοσης εξαρτάται από τη διαμόρφωση PHICH της κυψέλης, η οποία περιέχει δύο παραμέτρους: τη *διάρκεια PHICH* (κανονική ή εκτεταμένη) και μια παράμετρο N_g που μπορεί να πάρει τιμές από 1/6, 1/2, 1 ή 2. Η τεχνική μετάδοσης εξαρτάται επίσης από τη διάρκεια CP.

Στη συζήτηση που ακολουθεί, θα υποθέσουμε γενικά ότι ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί την κανονική διάρκεια PHICH και το κανονικό CP. Οι λεπτομέρειες των άλλων τεχνικών είναι αρκετά διαφορετικές, αλλά οι βασικές αρχές παραμένουν οι ίδιες.

8.4.2 Αντιστοίχιση Στοιχείου Πόρου του PHICH

Ο σταθμός βάσης μεταδίδει κάθε δείκτη HARQ στην περιοχή ελέγχου κάτω ζεύξης, χρησιμοποιώντας ένα σύνολο από τρεις REGs (12 RE) που είναι γνωστό ως *ομάδα PHICH*. Ο αριθμός των ομάδων PHICH εξαρτάται από το εύρος ζώνης της κυψέλης και την αξία του N_g . Είναι σταθερό σε κατάσταση FDD, αλλά μπορεί να διαφέρει από το ένα υποπλαίσιο στο επόμενο σε κατάσταση TDD, επειδή ο σταθμός βάσης πρέπει να στείλει περισσότερες επιβεβαιώσεις σε ορισμένα υποπλάγια TDD από ό,τι σε άλλα.

Κάθε ομάδα PHICH αντιστοιχίζεται σε REGs που δεν έχουν ακόμα εκχωρηθεί στο PCFICH. Αυτές βρίσκονται στο πρώτο σύμβολο ενός υποπλαισίου όταν χρησιμοποιείται η κανονική διάρκεια PHICH, αλλά μπορεί να καλύψει δύο ή τρία σύμβολα όταν χρησιμοποιείται η παρατεταμένη διάρκεια PHICH. Το Σχήμα 8.9 δείχνει ένα παράδειγμα αντιστοίχισης, για ένα σταθμό βάσης που χρησιμοποιεί την

κανονική διάρκεια PHICH και δυο ομάδες PHICH.

Μια ομάδα PHICH δεν είναι αποκλειστική για ένα μόνο κινητό: αντ' αυτού, μοιράζεται ανάμεσα σε οκτώ κινητά, εκχωρώντας σε κάθε κινητό ένα διαφορετικό ορθογώνιο δείκτη ακολουθίας. Ένα κινητό καθορίζει τον αριθμό ομάδας PHICH και τον ορθογώνιο δείκτη ακολουθίας που θα πρέπει να επιθεωρεί, χρησιμοποιώντας δύο παραμέτρους από την αρχική παραχώρηση χρονοδιαγράμματός της, δηλαδή την πρώτη φυσική ομάδα πόρου που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση άνω ζεύξης και μία παράμετρο που ονομάζεται κυκλική μετατόπιση που θα δούμε αργότερα στην Ενότητα 8.6. Μαζί, ο αριθμός της ομάδας PHICH και ο ορθογώνιος δείκτης ακολουθίας είναι γνωστοί ως ένας *πόρος PHICH*.

8.4.3 Επεξεργασία Φυσικού Καναλιού του PHICH

Για τη μετάδοση ενός δείκτη HARQ, ο σταθμός βάσης τον διαμορφώνει μέσω του BPSK, χρησιμοποιώντας σύμβολα +1 και -1, για τις θετικές και αρνητικές επιβεβαιώσεις αντίστοιχα. Στη συνέχεια εξαπλώνει κάθε δείκτη στα τέσσερα σύμβολα σε μια ομάδα RE, πολλαπλασιάζοντάς τον με την επιλεγμένη ορθογώνια ακολουθία. Υπάρχουν τέσσερις βασικές ακολουθίες διαθέσιμες προς τον σταθμό βάσης, δηλαδή [+1 +1 +1 +1], [+1 -1 +1 -1], [+1 +1 -1 -1] και [+1 -1 -1 +1], αλλά κάθε μία μπορεί να εφαρμοστεί στις «σε φάση» και τετραγωνισμό συνιστώσες του σήματος, φτιάχνοντας συνολικά οκτώ ορθογώνιες ακολουθίες σε όλα. Ο σταθμός βάσης μπορεί να στείλει ταυτόχρονες επιβεβαιώσεις στα οκτώ κινητά μιας ομάδας PHICH, αναθέτοντάς τους διαφορετικούς ορθογώνιους δείκτες ακολουθίας και προσθέτοντας τα προκύπτοντα σύμβολα. Η τεχνική αυτή θα είναι εξοικειωμένη με ατές με την εμπειρία του CDMA και είναι μία από τις λίγες χρήσεις που κάνει το LTE από το CDMA.

Τα σύμβολα PHICH, στη συνέχεια, επαναλαμβάνονται σε τρεις REGs για την αύξηση της ενέργειας του λαμβανόμενου συμβόλου και μεταδίδονται με παρόμοιο τρόπο με τα άλλα φυσικά κανάλια κάτω ζεύξης.

8.5 Πληροφορίες Ελέγχου Άνω Ζεύξης

8.5.1 Επιβεβαιώσεις Υβριδικής ARQ

Το κινητό στέλνει τρεις τύπους UCI στο σταθμό βάσης [26-28]: επιβεβαιώσεις HARQ των μεταδόσεων κάτω ζεύξης του σταθμού βάσης, SR άνω ζεύξης και CSI. Με τη σειρά τους, οι CSI περιλαμβάνουν το CQI, τον PMI και την RI.

Πρώτα, ας εξετάσουμε τις επιβεβαιώσεις HARQ. Σε κατάσταση FDD, το κινητό υπολογίζει μια ή δύο επιβεβαιώσεις ανά υποπλαίσιο, ανάλογα με τον αριθμό των ομάδων μεταφοράς που έλαβε. Στη συνέχεια τις μεταδίδει τέσσερα υποπλάισια αργότερα.

Σε κατάσταση TDD, τα πράγματα είναι πιο πολύπλοκα. Εάν το κινητό

αναγνωρίζει ένα υποπλαίσιο κάτω ζεύξης τη φορά, τότε πράττει με τον ίδιο τρόπο όπως στην κατάσταση FDD. Υπάρχουν δύο τρόποι για να αναγνωρίσει πολλαπλά υποπλάγια. Χρησιμοποιώντας *ομαδοποίηση ACK/NACK*, το κινητό στέλνει το πολύ δύο επιβεβαιώσεις, μία για κάθε παράλληλο ρεύμα των ομάδων μεταφοράς. Κάθε επιβεβαίωση είναι θετική αν λάβει με επιτυχία την αντίστοιχη ομάδα μεταφοράς σε όλα τα υποπλάγια κάτω ζεύξης και αλλιώς, αρνητική. Χρησιμοποιώντας *πολύπλεξη ACK/NACK*, το κινητό υπολογίζει μία επιβεβαίωση για κάθε υποπλαίσιο κάτω ζεύξης. Κάθε επιβεβαίωση είναι θετική αν λάβει με επιτυχία και τις δύο ομάδες μεταφοράς σε αυτό το υποπλαίσιο και αλλιώς, αρνητική. Όταν χρησιμοποιείται πολύπλεξη ACK/NACK, οι προδιαγραφές απαιτούν μόνο να μεταδώσει το κινητό το πολύ τέσσερις επιβεβαιώσεις ταυτόχρονα, για τα δεδομένα που λαμβάνονται σε τέσσερα υποπλάγια κάτω ζεύξης. Για να επιτευχθεί αυτό, η τεχνική αυτή δεν υποστηρίζεται στην TDD διαμόρφωση 5.

Σε κατάσταση TDD, η εντολή χρονοδιαγράμματος περιελάμβανε μια ποσότητα γνωστή ως, δείκτης ανάθεσης κάτω ζεύξης. Αυτή δείχνει το συνολικό αριθμό των μεταδόσεων κάτω ζεύξης που το κινητό θα πρέπει να αναγνωρίζει ταυτόχρονα ως τα προγραμματισμένα δεδομένα. Μειώνει τον κίνδυνο μιας κακώς διαμορφωμένης επιβεβαίωσης αν το κινητό έχασε μια προηγούμενη εντολή χρονοδιαγράμματος, έτσι μειώνει το συνολικό ποσοστό σφάλματος για τη διεπαφή αέρα.

8.5.2 Δείκτης Ποιότητας Καναλιού

Ο CQI είναι μια ποσότητα 4 bit, η οποία υποδεικνύει τη μέγιστη ταχύτητα δεδομένων που μπορεί να χειριστεί το κινητό με αναλογία ομάδας σφαλμάτων από 10% ή μικρότερη. Η CQI εξαρτάται κυρίως από το λαμβανόμενο SINR, επειδή ένα υψηλό ποσοστό δεδομένων μπορεί να ληφθεί με επιτυχία μόνο σε ένα υψηλό SINR. Ωστόσο, αυτό εξαρτάται επίσης από την εφαρμογή του κινητού δέκτη, γιατί ένας προηγμένος δέκτης μπορεί να επεξεργαστεί με επιτυχία τα εισερχόμενα δεδομένα σε χαμηλότερο SINR από έναν πιο βασικό.

Ο Πίνακας 8.4 δείχνει πώς ερμηνεύεται το CQI, όσον αφορά το σύστημα διαμόρφωσης κάτω ζεύξης και ποσοστού κωδικοποίησης. Η τελευταία στήλη δείχνει τον αριθμό των bits πληροφοριών ανά σύμβολο και υπολογίζεται με τον πολλαπλασιασμό του ρυθμού κωδικοποίησης κατά 2, 4 ή 6.

Λόγω της εξαρτώμενης από τη συχνότητα εξασθένισης, η ποιότητα καναλιού μπορεί συχνά να διαφέρει σε όλη την ζώνη κάτω ζεύξης. Για να αντικατοπτριστεί αυτό, ο σταθμός βάσης μπορεί να ρυθμίσει το κινητό να αναφέρει το CQI με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Η *αναφορά ευρείας ζώνης* καλύπτει ολόκληρη τη ζώνη κάτω ζεύξης. Για *αναφορά υψηλότερου στρώματος διαμορφωμένης υποζώνης*, ο σταθμός βάσης χωρίζει τη ζώνη κάτω ζεύξης σε υποζώνες, και το κινητό αναφέρει μία τιμή CQI για καθεμία. Για *αναφορά επιλεγμένης υποζώνης UE*, το κινητό επιλέγει τις υποζώνες που έχουν την καλύτερη ποιότητα καναλιού και αναφέρει τις θέσεις τους, μαζί με ένα CQI που τις καλύπτει και μια ξεχωριστή ευρεία ζώνη CQI. Αν το κινητό

Πίνακας 8.4 Ερμηνεία του CQI, όσον αφορά το σχήμα διαμόρφωσης και ποσοστού κωδικοποίησης που ένα κινητό μπορεί να λάβει επιτυχώς. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI

CQI	Modulation scheme	Coding rate (units of 1/1024)	Information bits per symbol
0	n/a	0	0.00
1	QPSK	78	0.15
2	QPSK	120	0.23
3	QPSK	193	0.38
4	QPSK	308	0.60
5	QPSK	449	0.88
6	QPSK	602	1.18
7	16-QAM	378	1.48
8	16-QAM	490	1.91
9	16-QAM	616	2.41
10	64-QAM	466	2.73
11	64-QAM	567	3.32
12	64-QAM	666	3.90
13	64-QAM	772	4.52
14	64-QAM	873	5.12
15	64-QAM	948	5.55

λαμβάνει περισσότερες από μία ομάδες μεταφοράς, τότε μπορεί να αναφέρει, επίσης, μια διαφορετική τιμή CQI για την καθεμία, για να αντικατοπτρίσει το γεγονός ότι διαφορετικά στρώματα μπορούν να φτάσουν στο κινητό με διαφορετικές τιμές του SINR.

Ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί το λαμβανόμενο CQI στον υπολογισμό του συστήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης του ρυθμού του, και προς στήριξη του εξαρτώμενου από τη συχνότητα, χρονοδιαγράμματος. Παρά την εξάρτηση συχνότητας της CQI, ωστόσο, ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί ένα μόνο σχήμα διαμόρφωσης ανεξάρτητο από τη συχνότητα και το ρυθμό κωδικοποίησης ανά ομάδα μεταφοράς όταν πρόκειται για τη διαβίβαση των δεδομένων κάτω ζεύξης.

8.5.3 Τάξη Ένδειξης

Το κινητό αναφέρει μια RI όταν έχει ρυθμιστεί για την χωρική πολύπλεξη της λειτουργίας μετάδοσης 3 ή 4. Η RI βρίσκεται μεταξύ του 1 και του αριθμού θυρών κεραιών του σταθμού βάσης και δείχνει το μέγιστο αριθμό στρωμάτων που μπορεί να λάβει επιτυχώς το κινητό.

Το κινητό αναφέρει μια ενιαία RI, η οποία εφαρμόζεται σε ολόκληρη τη ζώνη κάτω ζεύξης. Η RI μπορεί να υπολογιστεί από κοινού με την PMI, επιλέγοντας το συνδυασμό που μεγιστοποιεί το αναμενόμενο ποσοστό δεδομένων κάτω ζεύξης.

8.5.4 Δείκτης Πίνακα Προκωδικοποίησης

Το κινητό αναφέρει έναν PMI, όταν έχει ρυθμιστεί για χωρική πολύπλεξη κλειστού βρόγχου, MU-MIMO ή διαφορετικής μετάδοσης κλειστού βρόγχου στις λειτουργίες μετάδοσης 4, 5 ή 6. Ο δείκτης PMI υποδεικνύει τον πίνακα προκωδικοποίησης που πρέπει να εφαρμόζει ο σταθμός βάσης πριν τη μετάδοση του σήματος.

Ο PMI μπορεί να διαφέρει σε όλη την ζώνη κάτω ζεύξης, με παρόμοιο τρόπο με το CQI. Για να αντικατοπτριστεί αυτό, υπάρχουν δύο επιλογές για την αναφορά PMI. Το κινητό μπορεί να αναφέρει έναν ενιαίο PMI καλύπτοντας ολόκληρη τη ζώνη κάτω ζεύξης ή καλύπτοντας όλες τις επιλεγμένες υποζώνες UE. Όταν χρησιμοποιούνται πολλαπλοί PMIs, αναφέρει είτε και τις δύο αυτές ποσότητες ή αναφέρει έναν PMI για κάθε υψηλότερο στρώμα διαμορφωμένης υποζώνης.

Ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί το λαμβανόμενο PMI για τον υπολογισμό του πίνακα προκωδικοποίησης που θα πρέπει να ισχύει για την επόμενη μετάδοση κάτω ζεύξης του. Για άλλη μια φορά, ο σταθμός βάσης στην πραγματικότητα, μεταδίδει τα δεδομένα χρησιμοποιώντας έναν πίνακα προκωδικοποίησης ανεξάρτητο από τη συχνότητα, παρά την εξάρτηση από τη συχνότητα του PMI.

8.5.5 Μηχανισμοί Αναφοράς Κατάστασης Καναλιού

Το κινητό μπορεί να επιστρέψει CSI στο σταθμό βάσης με δύο τρόπους. Περιοδική αναφορά πραγματοποιείται σε τακτά χρονικά διαστήματα, τα οποία βρίσκονται μεταξύ 2 και 160 ms για τα CQI και PMI και είναι έως 32 φορές μεγαλύτερη για το RI. Οι πληροφορίες συνήθως διεξάγονται από το PUCCH, αλλά μεταφέρονται στο PUSCH αν το κινητό στέλνει δεδομένα άνω ζεύξης στο ίδιο υποπλαίσιο. Ο μέγιστος αριθμός των bits σε κάθε περιοδική αναφορά είναι 11, για να αντικατοπτρίζει το χαμηλό ποσοστό δεδομένων που είναι διαθέσιμα στο PUCCH.

Μη περιοδική αναφορά διεξάγεται ταυτόχρονα με μια μετάδοση δεδομένων PUCCH και ζητείται χρησιμοποιώντας ένα πεδίο στην παραχώρηση χρονοδιαγράμματος του κινητού. Αν και οι δύο τύποι αναφοράς έχουν προγραμματιστεί στο ίδιο υποπλαίσιο, τότε η μη περιοδική αναφορά παίρνει προτεραιότητα.

Και για τις δύο τεχνικές, ο σταθμός βάσης μπορεί να ρυθμίσει το κινητό σε λειτουργία αναφοράς ποιότητας καναλιού χρησιμοποιώντας RRC σηματοδότηση. Ο τρόπος αναφοράς καθορίζει το είδος των πληροφοριών ποιότητας καναλιού που απαιτεί ο σταθμός βάσης κατά τον τρόπο που ορίζεται από τους Πίνακες 8.5 και 8.6. Σε κάθε κατάσταση, ο πρώτος αριθμός περιγράφει το είδος της ανάδρασης CQI που απαιτεί ο σταθμός βάσης ενώ ο δεύτερος περιγράφει το είδος της PMI ανάδρασης. Οι ακριβείς ορισμοί του κάθε τρόπου αναφοράς καλύπτονται στις προδιαγραφές και είναι διαφορετικοί για περιοδικές και μη περιοδικές αναφορές,

Πίνακας 8.5 Τρόποι αναφοράς ποιότητας καναλιού για περιοδική αναφορά στο PUCCH ή PUSCH. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI

PMI feedback type	Downlink transmission modes	CQI feedback type	
		Wideband	UE selected sub-bands
None	1, 2, 3, 7	Mode 1-0	Mode 2-0
Single	4, 5, 6	Mode 1-1	Mode 2-1

Πίνακας 8.6 Τρόποι αναφοράς ποιότητας καναλιού για απεριοδική αναφορά στο PUSCH. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI

PMI feedback type	Downlink transmission modes	CQI feedback type		
		Wideband	UE selected sub-bands	Higher layer configured sub-bands
None	1, 2, 3, 7	-	Mode 2-0	Mode 3-0
Single	4, 5, 6	-	-	Mode 3-1
Multiple	4, 6	Mode 1-2	Mode 2-2	-

λόγω της ανάγκης να περιοριστεί η ποσότητα δεδομένων που μεταφέρονται στο PUCCH. Ειδικότερα, η περιοδική κατάσταση 2-0 ορίζεται διαφορετικά από τη μη περιοδική κατάσταση 2-0.

8.5.6 Αιτήματα Χρονοδιαγράμματος

Εάν το κινητό έχει δεδομένα σε αναμονή για μετάδοση στο PUSCH, τότε τα δεδομένα προκαλούν τελικά ένα SR. Κανονικά, το κινητό συνθέτει ένα SR του ενός bit για μετάδοση στο PUCCH.

Ωστόσο, δε στέλνει το αίτημα αμέσως, γιατί έχει να μοιράσει το PUCCH με άλλα κινητά, αντ' αυτού, μεταδίδει το SR σε ένα υποπλαίσιο που διαμορφώνεται από RRC σηματοδότηση, το οποίο επαναλαμβάνεται με μια περίοδο μεταξύ 5 και 80 ms. Το κινητό δεν στέλνει ποτέ τις CSI ταυτόχρονα με το SR: αντ' αυτού, το SR παίρνει προτεραιότητα.

Ένας σταθμός βάσης καλής συμπεριφοράς θα πρέπει να απαντήσει σε ένα SR δίνοντας στο κινητό μια παραχώρηση χρονοδιαγράμματος. Ωστόσο, δεν είναι υποχρεωμένος να το πράξει. Αν το κινητό φθάσει σε ένα μέγιστο αριθμό SR χωρίς να λάβει απάντηση, τότε ενεργοποιεί τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης που καλύπτεται στο Κεφάλαιο 9. Ο σταθμός βάσης είναι υποχρεωμένος να δώσει στο κινητό παραχώρηση χρονοδιαγράμματος ως μέρος αυτής της διαδικασίας, η οποία λύνει το πρόβλημα.

Ένα κινητό σε κατάσταση RRC_IDLE δε μπορεί να μεταδώσει στο PUCCH, έτσι δε μπορεί να στείλει ένα SR. Αντ' αυτού, χρησιμοποιεί αμέσως τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης.

8.6 Μετάδοση UCI στο PUCCH

8.6.1 Μορφές PUCCH

Αν το κινητό επιθυμεί να στείλει UCI και δεν πραγματοποιεί μια μετάδοση PUSCH στο ίδιο υποπλάσιο, τότε μεταδίδει την πληροφορία στο PUCCH [29-32]. Το PUCCH μπορεί να μεταδοθεί χρησιμοποιώντας πολλές διαφορετικές μορφές. Ο Πίνακας 8.7 δείχνει πώς χρησιμοποιούνται αυτές οι μορφές, για την περίπτωση ενός

Πίνακας 8.7 Κατάλογος PUCCH μορφών και των εφαρμογών τους στην περίπτωση ενός κανονικού CP. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI

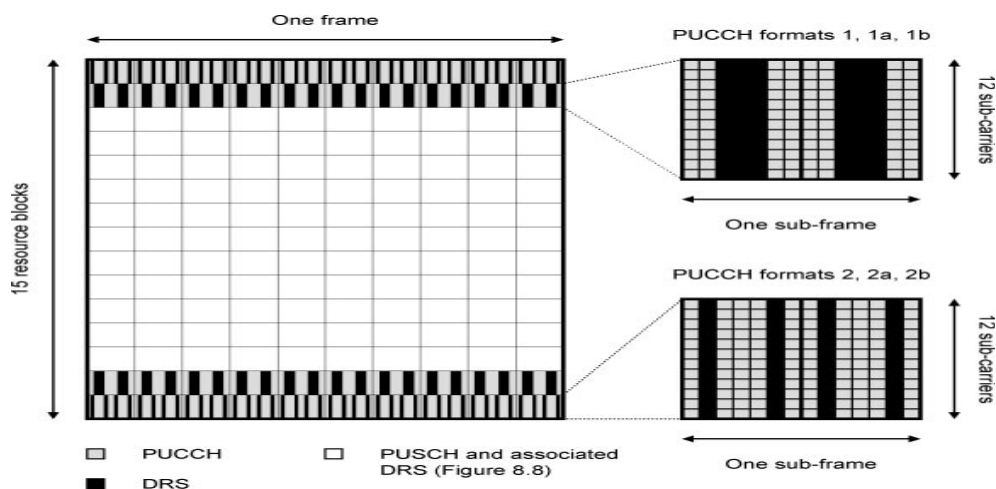
PUCCH format	Release	Application	Number of UCI bits	Number of PUCCH bits
1	R8	SR	1	1
1a	R8	1 bit HARQ-ACK and optional SR	1 or 2	1 or 2
1b	R8	2 bit HARQ-ACK and optional SR	2 or 3	2 or 3
2	R8	CQI, PMI, RI	≤ 11	20
2a	R8	CQI, PMI, RI and 1 bit HARQ-ACK	≤ 12	21
2b	R8	CQI, PMI, RI and 2 bit HARQ-ACK	≤ 13	22
3	R10	20 bit HARQ-ACK and optional SR	≤ 21	48

κανονικού CP.

Όπως υποδεικνύεται προς τα δεξιά του πίνακα, ο επεξεργαστής μεταφοράς καναλιού εφαρμόζει κωδικοποίηση διόρθωσης λάθους με την CSI, η οποία αυξάνει τον αριθμό των CSI bits σε 20. Ωστόσο, στέλνει SR και bits επιβεβαίωσης κατευθείαν κάτω από το φυσικό στρώμα, χωρίς καμία κωδικοποίηση.

Το κινητό μεταδίδει το PUCCH στα άκρα της ζώνης άνω ζεύξης (Σχήμα 8.10), για να την κρατήσει χωριστά από το PUSCH. Ο σταθμός βάσης διατηρεί τις RBs στις ακραίες άκρες της ζώνης για PUCCH μορφές 2, 2a και 2b, με τον ακριβή αριθμό των ομάδων που δημοσιεύονται στο SIB 2. Οι μορφές 1, 1a και 1b χρησιμοποιούν περαιτέρω RBs, με τον αριθμό των ομάδων να μεταβάλλεται δυναμικά από το ένα υποπλάσιο στο επόμενο, ανάλογα με τον αριθμό επιβεβαιώσεων που περιμένει ο σταθμός βάσης. Ο σταθμός βάσης μπορεί επίσης να μοιραστεί ένα ενδιαμέσο ζεύγος RBs ανάμεσα σε όλες τις μορφές PUCCH, το οποίο μπορεί να είναι χρήσιμο, εάν το εύρος ζώνης είναι μικρό. Όταν χρησιμοποιείται το κανονικό CP, οι μορφές 1, 1a και 1b χρησιμοποιούν τέσσερα PUCCH σύμβολα ανά σχισμή και τρία σύμβολα αναφοράς αποδιαμόρφωσης.

Ένα μεμονωμένο κινητό μεταδίδει το PUCCH χρησιμοποιώντας δυο RBs, οι



Σχήμα 8.10 Αντιστοίχιση RE για το PUCCH και το DRS του στις Εκδόσεις 8 και 9, χρησιμοποιώντας κατάσταση FDD, ένα κανονικό CP, ένα εύρος ζώνης 3MHz και ένα ζεύγος RBs της μορφής PUCCH.

οποίες είναι στις πρώτες και δεύτερες σχισμές ενός υποπλαισίου και στις αντίθετες πλευρές της ζώνης συχνοτήτων. Ωστόσο, ένα κινητό δεν έχει αυτές τις RBs για το ίδιο. Στις PUCCH μορφές 2, 2a και 2b, κάθε ζευγάρι των RBs μοιράζεται ανάμεσα σε 12 κινητά, χρησιμοποιώντας μια παράμετρο ειδική για κινητό, γνωστή ως *κυκλική μετατόπιση* που τρέχει από 0 μέχρι 11. Στις PUCCH μορφές 1, 1a και 1b, οι RBs μοιράζονται μεταξύ 36 κινητών, χρησιμοποιώντας την κυκλική μετατόπιση και άλλη μια παράμετρο ειδική για κινητό, τον *ορθογώνιο δείκτη ακολουθίας*, που τρέχει από 0 έως 2.

8.6.2 Πόροι PUCCH

Ένας πόρος PUCCH είναι ένας αριθμός που καθορίζει τρία πράγματα: τις RBs κατά τις οποίες το κινητό πρέπει να μεταδίδει το PUCCH και τον ορθογώνιο δείκτη ακολουθίας και την κυκλική μετατόπιση που θα πρέπει να χρησιμοποιεί. Ο σταθμός βάσης μπορεί να εκχωρήσει τρεις τύπους πόρων PUCCH σε κάθε κινητό.

Ο πρώτος πόρος PUCCH, συμβολίζεται $n_{\text{PUCCH}}^{(1)}$, χρησιμοποιείται για αυτόνομες επιβεβαιώσεις HARQ στις μορφές 1a και 1b. Το κινητό υπολογίζει το $n_{\text{PUCCH}}^{(1)}$ δυναμικά, χρησιμοποιώντας το δείκτη του πρώτου στοιχείου ελέγχου καναλιού που ο σταθμός βάσης χρησιμοποίησε για την εντολή χρονοδιαγράμματος κάτω ζεύξης του.

Ο δεύτερος πόρος PUCCH, συμβολίζεται $n_{\text{PUCCH, SRI}}^{(1)}$, χρησιμοποιείται για SR στη μορφή 1. Ο τρίτος, συμβολίζεται $n_{\text{PUCCH}}^{(2)}$, χρησιμοποιείται για CSI και προαιρετικές επιβεβαιώσεις στις μορφές 2, 2a και 2b. Το κινητό λαμβάνει δύο από αυτούς τους πόρους με τη βοήθεια RRC μηνυμάτων σηματοδότησης ειδικά για το κινητό.

Εάν ένα κινητό επιθυμεί να στείλει επιβεβαιώσεις HARQ την ίδια στιγμή ως ένα SR, τότε επεξεργάζεται τις επιβεβαιώσεις κατά το συνηθισμένο τρόπο, αλλά τις μεταδίδει χρησιμοποιώντας $n_{\text{PUCCH, SRI}}^{(1)}$. Ο σταθμός βάσης ήδη αναμένει τις επιβεβαιώσεις, έτσι ξέρει πώς να τις επεξεργαστεί, ενώ αναγνωρίζει το SR από τη χρήση του $n_{\text{PUCCH, SRI}}^{(1)}$ του κινητού.

Εάν το κινητό χρησιμοποιεί πολύπλεξη ACK/NACK σε κατάσταση TDD, τότε μπορεί να χρειαστεί να στείλει περισσότερες από δύο επιβεβαιώσεις σε ένα υποπλάισιο. Αυτό συνήθως το κάνει μεταδίδοντας σε ένα μέγιστο τεσσάρων PUCCH πόρων, που συμβολίζονται $n_{\text{PUCCH, 0}}^{(1)}$ έως $n_{\text{PUCCH, 3}}^{(1)}$, τα οποία τα υπολογίζει από την πρώτη CCE με παρόμοιο τρόπο προς $n_{\text{PUCCH}}^{(1)}$. Εάν, όμως, επιθυμεί να στείλει ένα SR ή CSI την ίδια στιγμή, τότε συμπιέζει τις επιβεβαιώσεις HARQ μέχρι δύο bits, και τις στέλνει στο $n_{\text{PUCCH, SRI}}^{(1)}$ ή στο $n_{\text{PUCCH}}^{(2)}$ με το συνηθισμένο τρόπο.

8.6.3 Επεξεργασία Φυσικού Καναλιού του PUCCH

Τώρα έχουμε αρκετές πληροφορίες για να περιγράψουμε την επεξεργασία φυσικού

καναλιού για το PUCCH.

Κατά τη χρήση μορφών PUCCH 1a και 1b, το κινητό ρυθμίζει τα bits πάνω σε ένα σύμβολο, χρησιμοποιώντας διαμόρφωση on-off για ένα SR, BPSK για μια επιβεβαίωση ενός bit και QPSK για μια επιβεβαίωση δύο bit. Στη συνέχεια διαδίδει τις πληροφορίες στο πεδίο του χρόνου χρησιμοποιώντας τον ορθογώνιο δείκτη ακολουθίας, συνήθως μέσω τεσσάρων συμβόλων αλλά και μέσω τριών συμβόλων σε σχισμές που υποστηρίζουν ένα SRS, που λαμβάνει προτεραιότητα πάνω από αυτές τις μορφές PUCCH (Ενότητα 8.7.2). Η διαδικασία εξάπλωσης ακολουθεί την ίδια τεχνική που χρησιμοποίησε ο σταθμός βάσης για το PHICH, και επιτρέπει στα σύμβολα να μοιραστούν ανάμεσα σε τρία διαφορετικά κινητά.

Το κινητό στη συνέχεια διαδίδει τις πληροφορίες σε 12 υπο-φέρουσες στο πεδίο συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας κυκλική μετατόπιση. Η τεχνική αυτή υλοποιείται με διαφορετικό τρόπο από την παραπάνω, αλλά έχει τον ίδιο στόχο, δηλαδή την κοινή χρήση των υπο-φερουσών ανάμεσα σε 12 διαφορετικά κινητά. Τέλος, το κινητό επαναλαμβάνει τη μετάδοσή του στις πρώτες και δεύτερες σχισμές του υποπλαισίου.

Κατά τη χρήση μορφής 2 PUCCH, το κινητό ρυθμίζει τα bits CSI σε 10 σύμβολα, χρησιμοποιώντας QPSK και διαδίδει την πληροφορία στο πεδίο συχνοτήτων χρησιμοποιώντας την κυκλική μετατόπιση. Μπορεί επίσης να στείλει ταυτόχρονες επιβεβαιώσεις στις μορφές 2a και 2b, διαμορφώνοντας το δεύτερο σύμβολο αναφοράς σε κάθε υποπλαίσιο, χρησιμοποιώντας BPSK ή QPSK.

8.7 Σήματα Αναφοράς Άνω Ζεύξης

8.7.1 Σήμα Αναφοράς Αποδιαμόρφωσης

Το κινητό μεταδίδει το DRS [33] μαζί με τα PUSCH και PUCCH, για να βοηθήσει το σταθμό βάσης να πραγματοποιήσει εκτίμηση καναλιού. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 8.8 και 8.10, το σήμα καταλαμβάνει τρία σύμβολα ανά σχισμή όταν το κινητό χρησιμοποιεί PUCCH μορφές 1, 1a και 1b, δύο όταν χρησιμοποιεί PUCCH μορφές 2, 2a και 2b, και μία όταν χρησιμοποιεί PUSCH.

Το DRS μπορεί να περιέχει 12, 24, 36, ... σημεία δεδομένων, που αντιστοιχούν στα εύρη ζώνης μετάδοσης των 1, 2, 3, ... RBs. Για να παράγει το σήμα, κάθε κυψέλη έχει εκχωρηθεί σε μία από τις 30 ομάδες ακολουθίας. Με μία εξαίρεση, η οποία περιγράφεται στο τέλος αυτής της ενότητας, κάθε ομάδα ακολουθίας περιέχει μία ακολουθία βάσης κάθε δυνατού μήκους, η οποία παράγεται είτε από μια ακολουθία Zadoff-Chu, είτε, στην περίπτωση των πολύ συντομότερων ακολουθιών, από έναν πίνακα αναζήτησης. Η ακολουθία βάσης, στη συνέχεια, τροποποιήθηκε από μια από τις 12 κυκλικές μετατοπίσεις, για να δημιουργήσει το ίδιο σήμα αναφοράς.

Υπάρχουν δύο τρόποι για την εκχώρηση των ομάδων ακολουθίας. Στο σχεδιασμό της ομάδας ακολουθίας κάθε κυψέλη είναι μόνιμα καταχωρημένη σε μία από τις ομάδες ακολουθίας κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του ασύρματου δικτύου. Κοντινές κυψέλες πρέπει να βρίσκονται σε διαφορετικές ομάδες

ακολουθίας, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η παρεμβολή μεταξύ τους. Στην ομάδα ακολουθίας αναπήδησης, η ομάδα ακολουθίας αλλάζει από τη μία υποδοχή στην επόμενη, σύμφωνα με ένα από τα 510 ψευδοτυχαία πρότυπα αναπήδησης. Το πρότυπο αναπήδησης εξαρτάται από τη φυσική ταυτότητα της κυψέλης και μπορεί να υπολογιστεί χωρίς την ανάγκη για οποιονδήποτε περαιτέρω προγραμματισμό.

Κατά την αποστολή σημάτων αναφοράς PUSCH, το κινητό υπολογίζει την κυκλική μετατόπιση από ένα πεδίο που ο σταθμός βάσης παρείχε στην παραχώρηση χρονοδιαγράμματός του. Στην περίπτωση MU-MIMO άνω ζεύξης, ο σταθμός βάσης μπορεί να διακρίνει διαφορετικά κινητά που μοιράζονται τις ίδιες RBs, δίνοντάς τους διαφορετικές κυκλικές μετατοπίσεις. Οι υπόλοιπες κυκλικές μετατοπίσεις μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να διακρίνουν κοντινές κυψέλες που μοιράζονται την ίδια ομάδα ακολουθίας.

Κατά την αποστολή σημάτων αναφοράς PUCCH, το κινητό εφαρμόζει την ίδια κυκλική μετατόπιση που χρησιμοποιείται για την ίδια τη μετάδοση PUCCH, και τροποποιεί το DRS περαιτέρω, στην περίπτωση των μορφών 1, 1a και 1b χρησιμοποιώντας τον ορθογώνιο δείκτη ακολουθίας. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει στον σταθμό βάσης να διακρίνει τα σήματα αναφοράς από όλα τα κινητά που μοιράζονται κάθε ζεύγος των RBs.

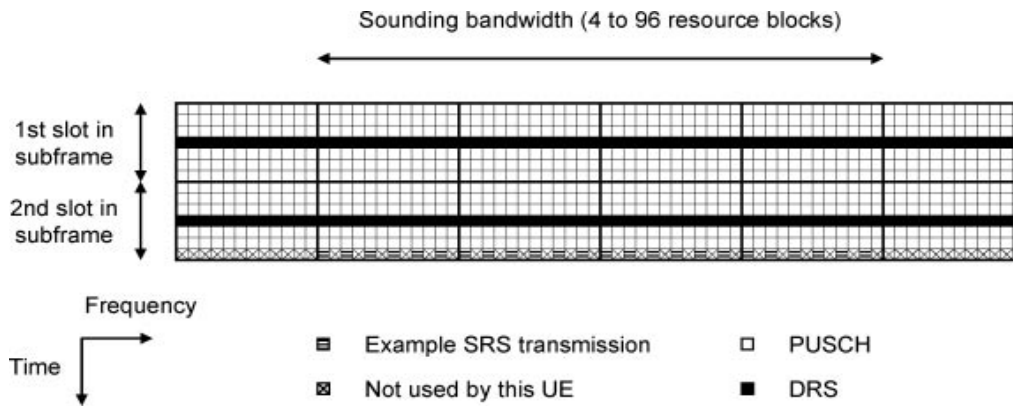
Υπάρχουν άλλες δύο επιπλοκές. Πρώτον, κάθε ομάδα ακολουθίας περιέχει στην πραγματικότητα δύο ακολουθίες βάσης για κάθε εύρος ζώνης μετάδοσης των έξι RBs ή περισσότερων. Στην ακολουθία αναπήδησης, ένα κινητό μπορεί να ρυθμιστεί για την εναλλαγή μεταξύ των δύο ακολουθιών σύμφωνα με ένα ψευδοτυχαίο πρότυπο. Δεύτερον, η κυκλική μετατόπιση αναπήδησης κάνει την κυκλική μετατόπιση να αλλάζει με ένα ψευδοτυχαίο τρόπο από τη μία σχισμή στην επόμενη. Και οι δύο τεχνικές μειώνουν την παρεμβολή μεταξύ κοντινών κυψελών που μοιράζονται την ίδια ομάδα ακολουθίας.

8.7.2 Σήμα Αναφοράς Ήχησης

Το κινητό μεταδίδει το SRS [34-36] για να βοηθήσει το σταθμό βάσης να μετρήσει την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος σε ένα πλατύ εύρος ζώνης μετάδοσης. Ο σταθμός βάσης στη συνέχεια, χρησιμοποιεί τις πληροφορίες για την εξαρτώμενη από το χρονοδιάγραμμα, συχνότητα.

Ο σταθμός βάσης ελέγχει το συγχρονισμό των SRS με δύο τρόπους. Πρώτον, αριθμεί τα κινητά των οποίων τα υποπλαίσια υποστηρίζουν την ήχηση, χρησιμοποιώντας μια παράμετρο στο SIB 2 που ονομάζεται *διαμόρφωση υποπλαισίου SRS*. Δεύτερον, ρυθμίζει κάθε κινητό με μια περίοδο ήχησης από 2 έως 320 υποπλαίσια και μια μετατόπιση εντός αυτής της περιόδου, χρησιμοποιώντας μια παράμετρο ειδικά για κινητό που ονομάζεται *δείκτης διαμόρφωσης SRS*. Ένα κινητό μεταδίδει το SRS κάθε φορά που οι προκύπτοντες χρόνοι μετάδοσης συμπίπτουν με ένα υποπλαίσιο που υποστηρίζει την ήχηση.

Το κινητό συνήθως στέλνει το SRS στο τελευταίο σύμβολο του υποπλαισίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.11. Σε κατάσταση TDD, μπορεί, επίσης, να στείλει το



Σχήμα 8.11 Παράδειγμα αντιστοιχίας RE για το SRS, χρησιμοποιώντας ένα κανονικό CP.

σήμα στην περιοχή άνω ζεύξης ενός ειδικού υποπλαισίου. Το κινητό παράγει το σήμα με παρόμοιο τρόπο με το DRS που περιγράφεται παραπάνω. Η κύρια διαφορά είναι ότι το SRS χρησιμοποιεί οκτώ κυκλικές μετατοπίσεις αντί για 12, έτσι ώστε οκτώ κινητά να μπορούν να μοιράζονται το ίδιο σύνολο RE.

Στο πεδίο συχνοτήτων, ο σταθμός βάσης ελέγχει τη θέση εκκίνησης και το εύρος ζώνης μετάδοσης χρησιμοποιώντας παραμέτρους ειδικά για κυψέλες και κινητά, που ονομάζονται διαμόρφωση εύρους ζώνης SRS, εύρος ζώνης SRS, κατάσταση τομέα συχνότητας και αναπήδηση εύρους ζώνης SRS. Όπως φαίνεται στο σχήμα, ένα μεμονωμένο κινητό εκπέμπει σε εναλλακτικές υπο-φέρουσες, όπως έχει διαμορφωθεί από μια κορυφή κύματος μετάδοσης.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να αποφευχθούν συγκρούσεις μεταξύ του SRS και των άλλων μεταδόσεων του κινητού. Ένα κινητό δεν μεταδίδει το PUSCH στο τελευταίο σύμβολο των υποπλαισίων που υποστηρίζουν ήχηση, έτσι μπορεί πάντα να στέλνει το PUSCH και το SRS στο ίδιο υποπλαίσιο. Οι PUCCH μορφές 2, 2a και 2b έχουν προτεραιότητα έναντι του SRS, όπως έχουν αποκλειστικά συχνότητες στην άκρη της ζώνης μετάδοσης που δεν παρουσιάζουν κανένα ενδιαφέρον για τη διαδικασία ήχησης. Ο σταθμός βάσης μπορεί να διαμορφώσει PUCCH μορφές 1, 1a και 1b για να χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε τεχνική μέσω RRC σηματοδότησης.

8.8 Έλεγχος Ισχύος Άνω Ζεύξης

8.8.1 Υπολογισμός Ισχύος Άνω Ζεύξης

Η διαδικασία ελέγχου ισχύος άνω ζεύξης [37, 38] θέτει την ισχύ μετάδοσης του κινητού στη μικρότερη τιμή που είναι σύμφωνη με την ικανοποιητική λήψη του σήματος. Αυτό μειώνει την παρεμβολή μεταξύ κινητών που εκπέμπουν στα ίδια RE σε κοντινές κυψέλες και αυξάνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας του κινητού. Στο LTE, το κινητό υπολογίζει την ισχύ εκπομπής του καθώς μπορεί, και ο σταθμός βάσης ρυθμίζει αυτή την εκτίμηση χρησιμοποιώντας εντολές ελέγχου ισχύος. Το κινητό χρησιμοποιεί ελαφρώς διαφορετικούς υπολογισμούς για τα PUSCH, PUCCH

και SRS, έτσι, για να τονίσουμε τις αρχές, θα εξετάσουμε μόνο το PUSCH.

Η ισχύς μεταδόσεως PUSCH υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{\text{PUSCH}}(i) = \min(P(i), P_{\text{CMAX}}) \quad (8.1)$$

Σε αυτή την εξίσωση, $P_{\text{PUSCH}}(i)$ είναι η ισχύς που μεταδίδεται στο PUSCH στο υποπλαίσιο i , μετράται σε ντεσιμπέλ σε σχέση με ένα milliwatt (dBm). P_{CMAX} είναι η μέγιστη ισχύς εκπομπής του κινητού, ενώ το $P(i)$ υπολογίζεται ως εξής:

$$P(i) = P_{\text{O_PUSCH}} + 10 \log_{10}(M_{\text{PUSCH}}(i)) + \Delta_{\text{TF}}(i) + a \cdot \text{PL} + f(i) \quad (8.2)$$

Εδώ, $P_{\text{O_PUSCH}}$ είναι η ισχύς που ο σταθμός βάσης αναμένει να λάβει πάνω από ένα εύρος ζώνης από μια ομάδα πόρου. Έχει δύο συνιστώσες, μια γραμμή βάσης $P_{\text{O_NOMINAL_PUSCH}}$ ειδικά για κυψέλη και μια ρύθμιση $P_{\text{O_UE_PUSCH}}$ ειδικά για κινητό, οι οποίες αποστέλλονται στο κινητό χρησιμοποιώντας RRC σηματοδότηση. $M_{\text{PUSCH}}(i)$ είναι ο αριθμός των RBs κατά τον οποίο το κινητό εκπέμπει στο υποπλαίσιο i . $\Delta_{\text{TF}}(i)$ είναι μια προαιρετική προσαρμογή του ρυθμού δεδομένων στο υποπλαίσιο i , η οποία εξασφαλίζει ότι το κινητό χρησιμοποιεί μια υψηλότερη ισχύ μετάδοσης ή ένα μεγαλύτερο ρυθμό κωδικοποίησης ή ένα ταχύτερο σχέδιο διαμόρφωσης, όπως το 64-QAM.

PL είναι η απώλεια διάδοσης κάτω ζεύξης. Ο σταθμός βάσης αναγγέλλει την εκπεμπόμενη ισχύ στα σήματα αναφοράς κάτω ζεύξης ως μέρος της SIB 2, έτσι το κινητό μπορεί να εκτιμήσει το PL διαβάζοντας αυτή την ποσότητα και αφαιρώντας την ισχύ που έλαβε. Το a είναι ένας συντελεστής στάθμισης, που μειώνει τις επιπτώσεις των αλλαγών στην απώλεια διάδοσης, με μια τεχνική γνωστή ως *κλασματικός έλεγχος ισχύος*. Καθορίζοντας το a σε μία τιμή μεταξύ μηδέν και ένα, ο σταθμός βάσης μπορεί να εξασφαλίσει ότι τα κινητά στην άκρη της κυψέλης μεταδίδουν ένα ασθενέστερο σήμα από ό,τι διαφορετικά θα αναμενόταν. Αυτό μειώνει την παρεμβολή που στέλνουν σε κοντινές κυψέλες και μπορεί να αυξήσει την χωρητικότητα του συστήματος.

Χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους που καλύπτονται μέχρι στιγμής, το κινητό μπορεί να κάνει δικές του εκτιμήσεις για την ισχύ εκπομπής PUSCH. Ωστόσο, αυτή η εκτίμηση δεν μπορεί να είναι ακριβής, ιδιαίτερα σε κατάσταση FDD, όπου τα πρότυπα εξασθένισης είναι πιθανόν να είναι διαφορετικά στην άνω και κάτω ζεύξη. Ο σταθμός βάσης, συνεπώς, ρυθμίζει την ισχύ του κινητού χρησιμοποιώντας εντολές ελέγχου ισχύος, οι οποίες χειρίζονται από την τελευταία παράμετρο, $f(i)$.

8.8.2 Εντολές Ελέγχου Ισχύος Άνω Ζεύξης

Ο σταθμός βάσης μπορεί να στείλει εντολές ελέγχου ισχύος για το PUSCH με δύο

τρόπους. Πρώτον, μπορεί να στείλει αυτοδύναμες εντολές ελέγχου ισχύος σε ομάδες κινητών που χρησιμοποιούν DCI μορφές 3 και 3A. Όταν χρησιμοποιούνται αυτές τις

μορφές, ο σταθμός βάσης απευθύνει το PDCCH μήνυμα σε μια ταυτότητα ασύρματου δικτύου γνωστή ως TPC-PUSCH-RNTI, η οποία μοιράζεται μεταξύ όλων των κινητών, στην ομάδα. Το μήνυμα περιέχει μια εντολή ελέγχου ισχύος για καθένα από τα κινητά της ομάδας, που βρίσκεται χρησιμοποιώντας μια μετατόπιση που έχει προηγουμένως ρυθμιστεί μέσω της RRC σηματοδότησης.

Το κινητό στη συνέχεια συγκεντρώνει τις δικές του εντολές ελέγχου ισχύος με τον ακόλουθο τρόπο:

$$f(i) = f(i - 1) + \delta_{\text{PUSCH}}(i - K_{\text{PUSCH}}) \quad (8.3)$$

Εδώ, το κινητό λαμβάνει μια ρύθμιση ισχύος της δ_{PUSCH} στο υποπλαίσιο $i - K_{\text{PUSCH}}$, και το εφαρμόζει στο υποπλαίσιο i . Το K_{PUSCH} είναι τέσσερα, σε κατάσταση FDD, ενώ σε κατάσταση TDD, μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ τεσσάρων και επτά κατά το συνηθισμένο τρόπο. Όταν χρησιμοποιείται DCI μορφή 3, η εντολή ελέγχου ισχύος περιέχει δύο bits και προκαλεί ρυθμίσεις ισχύος -1, 0, 1 και 3 ντεσιμπέλ. Όταν χρησιμοποιείται DCI μορφή 3A, η εντολή περιέχει μόνο ένα bit και προκαλεί ρυθμίσεις ισχύος του -1 και 1 ντεσιμπέλ.

Ο σταθμός βάσης μπορεί επίσης να στείλει εντολές ελέγχου ισχύος των δύο bit σε ένα κινητό ως μέρος μιας παραχώρησης χρονοδιαγράμματος άνω ζεύξης. Συνήθως, το κινητό τις ερμηνεύει με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω. Ωστόσο, ο σταθμός βάσης μπορεί επίσης να απενεργοποιήσει τη συσσώρευση των εντολών ελέγχου ισχύος χρησιμοποιώντας RRC σηματοδότηση, στην οποία περίπτωση το κινητό τις ερμηνεύει ως εξής:

$$f(i) = \delta_{\text{PUSCH}}(i - K_{\text{PUSCH}}) \quad (8.4)$$

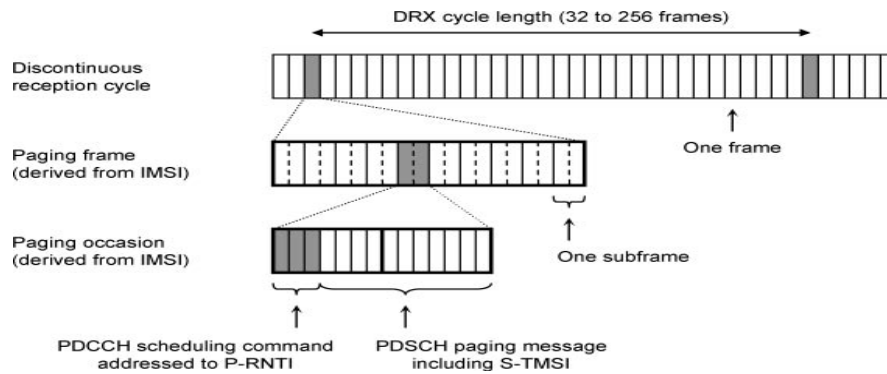
Στην περίπτωση αυτή, η ρύθμιση ισχύος δ_{PUSCH} μπορεί να πάρει τιμές από -4, -1, 1 και 4 ντεσιμπέλ.

8.9 Ασυνεχής Λήψη

8.9.1 Ασυνεχής Λήψη και Αναζήτηση στην RRC_IDLE

Όταν ένα κινητό είναι σε μια κατάσταση *ασυνεχούς λήψης* (DRX), ο σταθμός βάσης μόνο στέλνει DCI για το PDCCH σε ορισμένα υποπλάγια. Μεταξύ αυτών των υποπλαισίων, το κινητό μπορεί να σταματήσει την παρακολούθηση του PDCCH και μπορεί να εισέλθει σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, γνωστή ως *κατάσταση νάρκης*, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής της μπαταρίας του. Η ασυνεχής λήψη υλοποιείται χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικούς μηχανισμούς, που υποστηρίζει την αναζήτηση στην RRC_IDLE και χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στην RRC_CONNECTED.

Σε κατάσταση RRC_IDLE, η ασυνεχής λήψη ορίζεται χρησιμοποιώντας έναν κύκλο DRX [39, 40], ο οποίος βρίσκεται μεταξύ 32 και 256 πλαισίων (0.32 και 2.56 δευτερόλεπτα). Ο σταθμός βάσης καθορίζει ένα προεπιλεγμένο μήκος κύκλου DRX



Σχήμα 8.12 Λειτουργία ασυνεχούς λήψης και αναζήτησης στο RRC_IDLE.

στο SIB 2, αλλά το κινητό μπορεί να ζητήσει ένα διαφορετικό μήκος κύκλου κατά τη διάρκεια ενός αιτήματος επισύναψης ή μιας ενημέρωσης περιοχής εντοπισμού (Κεφάλαια 11 και 14).

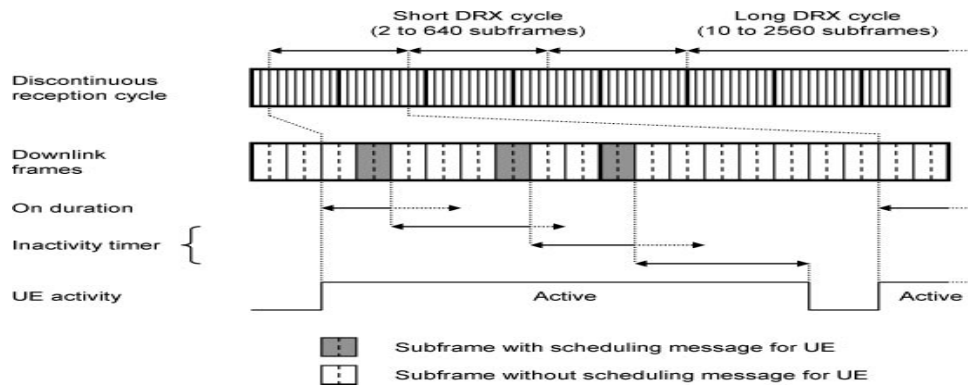
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.12, το κινητό επανέρχεται μία φορά σε κάθε πλαίσιο κύκλου DRX, σε ένα πλαίσιο αναζήτησης του οποίου ο SFN εξαρτάται από την IMSI του κινητού. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, το κινητό ελέγχει ένα υποπλαίσιο γνωστό ως μια ευκαιρία αναζήτησης, η οποία επίσης εξαρτάται από την IMSI. Εάν το κινητό βρίσκει DCI που απευθύνονται στο P-RNTI, τότε συνεχίζει να λαμβάνει ένα μήνυμα Αναζήτησης RRC στο PDSCH.

Πολλά κινητά μπορούν να μοιράζονται την ίδια ευκαιρία αναζήτησης. Για την επίλυση αυτής της σύγκρουσης, το μήνυμα Αναζήτησης περιέχει την ταυτότητα του κινητού στόχου, χρησιμοποιώντας το S-TMSI (εάν υπάρχει) ή την IMSI (διαφορετικά). Εάν το κινητό ανιχνεύσει μια ισοπαλία, τότε ανταποκρίνεται στο μήνυμα αναζήτησης χρησιμοποιώντας μια διαδικασία EMM, γνωστή ως ένα αίτημα υπηρεσίας, με τον τρόπο που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 14.

8.9.2 Ασυνεχής Λήψη σε RRC_CONNECTED

Σε κατάσταση RRC_CONNECTED, ο σταθμός βάσης διαμορφώνει παραμέτρους ασυνεχούς λήψης ενός κινητού μέσω RRC σηματοδότησης ειδικά για κινητό. Κατά τη διάρκεια της ασυνεχούς λήψης (Σχήμα 8.13), το κινητό επανέρχεται σε κάθε υποπλαίσιο κύκλου DRX, σε ένα υποπλαίσιο που ορίζεται από μια αρχή μετατόπισης DRX. Παρακολουθεί το PDCCH συνεχώς για μια διάρκεια γνωστή ως ο ενεργός χρόνος και στη συνέχεια απενεργοποιείται [41, 42].

Αρκετοί χρονομετρητές συμβάλλουν στον ενεργό χρόνο. Αρχικά, το κινητό αφυπνίζεται για ένα χρόνο σε διάρκεια (1 έως 200 υποπλαίσια), περιμένοντας για ένα μήνυμα χρονοδιαγράμματος στο PDCCH. Εάν φτάνει ένα, τότε το κινητό αφυπνίζεται για ένα χρόνο του χρονομετρητή αδράνειας DRX (1 έως 2560 υποπλαίσια) μετά από κάθε εντολή PDCCH. Άλλα χρονόμετρα εξασφαλίζουν ότι το κινητό αφυπνίζεται ενώ περιμένει για πληροφορίες, όπως οι αναμεταδόσεις HARQ,



Σχήμα 8.13 Λειτουργία ασυνεχούς λήψης σε RRC_CONNECTED.

αλλά, αν λήξουν όλοι οι χρονομετρητές, τότε το κινητό απενεργοποιείται. Ο σταθμός βάσης μπορεί επίσης να στείλει το κινητό σαφώς για να απενεργοποιηθεί, στέλνοντάς του ένα MAC στοιχείο ελέγχου (Κεφάλαιο 10) γνωστό ως μια εντολή DRX.

Στην πραγματικότητα υπάρχουν δύο ασυνεχείς κύκλοι λήψης, ο μακρύς κύκλος DRX (10 έως 2560 υποπλαίσια) και ο προαιρετικός σύντομος κύκλος DRX (2 έως 640 υποπλαίσια). Αν και οι δύο έχουν ρυθμιστεί, τότε το κινητό ξεκινά χρησιμοποιώντας το σύντομο κύκλο, αλλά κινείται στο μακρύ κύκλο αν πηγαίνει για κύκλους χρονομετρητή σύντομου κύκλου DRX (1 έως 16) χωρίς να λαμβάνει μια PDCCH εντολή.

Αναφορές

1. 3GPP TS 36.211 (September 2011) *Physical Channels and Modulation*, Release 10.
2. 3GPP TS 36.212 (September 2011) *Multiplexing and Channel Coding*, Release 10.
3. 3GPP TS 36.213 (September 2011) *Physical Layer Procedures*, Release 10.
4. 3GPP TS 36.321 (October 2011) *Medium Access Control (MAC) Protocol Specification*, Release 10.
5. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10.
6. 3GPP TS 36.321 (October 2011) *Medium Access Control (MAC) Protocol Specification*, Release 10, section 5.3.
7. 3GPP TS 36.213 (September 2011) *Physical Layer Procedures*, Release 10, section 7.
8. 3GPP TS 36.321 (October 2011) *Medium Access Control (MAC) Protocol Specification*, Release 10, section 5.4.
9. 3GPP TS 36.213 (September 2011) *Physical Layer Procedures*, Release 10, section 8.
10. 3GPP TS 36.321 (October 2011) *Medium Access Control (MAC) Protocol Specification*, Release 10, section 5.10.
11. 3GPP TS 36.213 (September 2011) *Physical Layer Procedures*, Release 10, section 9.2.
12. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10, section 6.3.2 (SPS- Config).
13. 3GPP TS 36.212 (September 2011) *Multiplexing and Channel Coding*, Release 10, section 5.3.3.1.
14. 3GPP TS 36.213 (September 2011) *Physical Layer Procedures*, Release 10, sections 7.1.6, 8.1, 8.4.

15. 3GPP TS 36.211 (September 2011) *Physical Channels and Modulation*, Release 10, section 5.2.3, 5.3.4, 6.2.3.
16. 3GPP TS 36.321 (October 2011) *Medium Access Control (MAC) Protocol Specification*, Release 10, section 7.1.
17. 3GPP TS 36.212 (September 2011) *Multiplexing and Channel Coding*, Release 10, sections 5.3.3.2, 5.3.3.3, 5.3.3.4.
18. 3GPP TS 36.211 (September 2011) *Physical Channels and Modulation*, Release 10, section 6.8.
19. 3GPP TS 36.213 (September 2011) *Physical Layer Procedures*, Release 10, section 9.1.1.
20. 3GPP TS 36.212 (September 2011) *Multiplexing and Channel Coding*, Release 10, sections 5.1, 5.2.2, 5.2.4, 5.3.2.
21. 3GPP TS 36.211 (March 2010) *Physical Channels and Modulation*, Release 9, sections 5.3, 5.6, 5.8, 6.3, 6.4, 6.12, 6.13.
22. 3GPP TS 36.211 (September 2011) *Physical Channels and Modulation*, Release 10, section 6.9.
23. 3GPP TS 36.212 (September 2011) *Multiplexing and Channel Coding*, Release 10, section 5.3.5.
24. 3GPP TS 36.213 (September 2011) *Physical Layer Procedures*, Release 10, section 9.1.2.
25. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10, section 6.3.2 (*PHICH-Config*).
26. 3GPP TS 36.213 (September 2011) *Physical Layer Procedures*, Release 10, sections 7.2, 7.3, 10.1.
27. 3GPP TS 36.321 (October 2011) *Medium Access Control (MAC) Protocol Specification*, Release 10, section 5.4.4.
28. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10, section 6.3.2 (*CQI-Report Config, Scheduling Request Config*).
29. 3GPP TS 36.211 (September 2011) *Physical Channels and Modulation*, Release 10, section 5.4.
30. 3GPP TS 36.212 (September 2011) *Multiplexing and Channel Coding*, Release 10, section 5.2.3.
31. 3GPP TS 36.213 (September 2011) *Physical Layer Procedures*, Release 10, section 10.1.
32. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10, section 6.3.2 (*PUCCH-Config*).
33. 3GPP TS 36.211 (September 2011) *Physical Channels and Modulation*, Release 10, sections 5.5.1, 5.5.2.
34. 3GPP TS 36.211 (September 2011) *Physical Channels and Modulation*, Release 10, section 5.5.3.
35. 3GPP TS 36.213 (September 2011) *Physical Layer Procedures*, Release 10, section 8.2.
36. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10, section 6.3.2 (*Sounding RS-UL-Config*).
37. 3GPP TS 36.213 (September 2011) *Physical Layer Procedures*, Release 10, section 5.
38. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10, section 6.3.2 (*Uplink Power Control, TPC-PDCCH-Config*).
39. 3GPP TS 36.304 (October 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) Procedures in Idle Mode*, Release 10, section 7.
40. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10, sections 5.3.2, 6.2.2 (*Paging*).
41. 3GPP TS 36.321 (October 2011) *Medium Access Control (MAC) Protocol Specification*, Release 10, section 5.7.
42. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10, section 6.3.2 (*MAC-Main Config*).

9

Τυχαία Πρόσβαση

Όπως περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο σταθμός βάσης προγραμματίζει ρητά όλες τις μεταδόσεις που το κινητό πραγματοποιεί στο PUSCH. Εάν το κινητό επιθυμεί να μεταδώσει το PUSCH αλλά δεν έχει τους πόρους για να το κάνει, τότε στέλνει συνήθως ένα SR για το PUCCH. Αν δεν έχει τους πόρους να το κάνει, τότε ξεκινά τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης. Αυτό μπορεί να συμβεί σε μερικές διαφορετικές καταστάσεις, κυρίως κατά τη δημιουργία μιας σύνδεσης RRC, κατά τη διάρκεια μιας μεταπομπής, ή αν το κινητό έχει χάσει το συγχρονισμό χρόνου με το σταθμό βάσης. Ο σταθμός βάσης μπορεί να ενεργοποιήσει τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης, εάν επιθυμεί να μεταδώσει στο κινητό μετά την απώλεια συγχρονισμού χρόνου.

Η διαδικασία ξεκινάει όταν το κινητό μεταδίδει μια επικεφαλίδα τυχαίας πρόσβασης στο PRACH. Αυτό κινεί μια ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ του κινητού και του σταθμού βάσης η οποία έχει δύο βασικές παραλλαγές, non contention based και contention based. Ως αποτέλεσμα της διαδικασίας, το κινητό λαμβάνει τρεις ποσότητες: πόρους για μια μετάδοση άνω ζεύξης στο PUSCH, μία αρχική τιμή για την προήγηση χρόνου άνω ζεύξης και, αν δεν έχει ήδη ένα, ένα C-RNTI.

Η διαδικασία τυχαίας πρόσβασης καθορίζεται από τις ίδιες προδιαγραφές που χρησιμοποιήθηκαν για τη μετάδοση και λήψη δεδομένων. Οι πιο σημαντικές είναι οι TS 36.211 [1], TS 36.213 [2], TS 36.321 [3] και TS 36.331 [4].

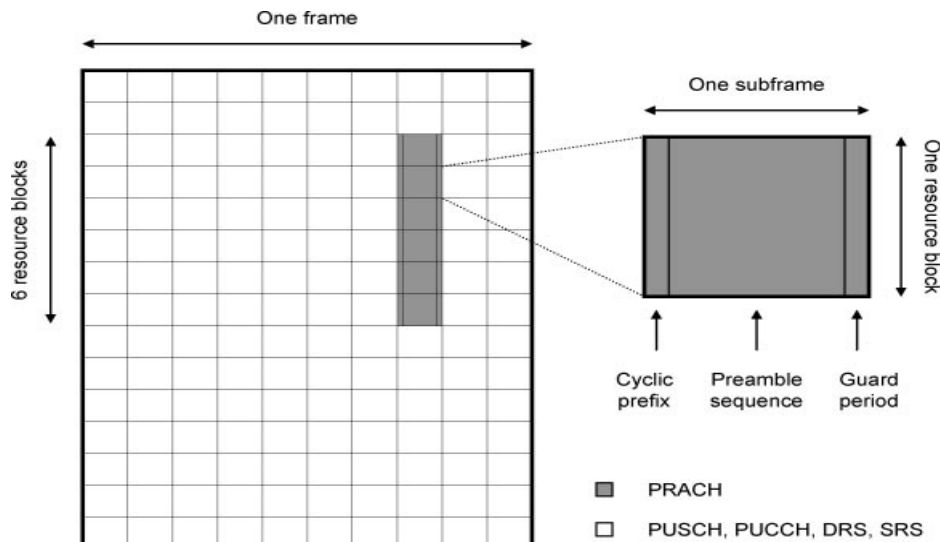
9.1 Μετάδοση Επικεφαλίδων Τυχαίας Πρόσβασης στο PRACH

9.1.1 Αντιστοίχιση Στοιχείου Πόρου

Το καλύτερο σημείο για να αρχίσουμε να συζητάμε το PRACH [5-7] είναι με την αντιστοίχιση RE. Στο πεδίο των συχνοτήτων, μια μετάδοση PRACH έχει ένα εύρος ζώνης έξι RBs. Στο πεδίο του χρόνου, η μετάδοση έχει συνήθως μήκος ενός υποπλαισίου, αλλά μπορεί να είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη. Το Σχήμα 9.1 παρουσιάζει ένα παράδειγμα, για την περίπτωση της κατάστασης FDD και ενός εύρους ζώνης 3 MHz.

Κοιτάζοντας πιο λεπτομερώς, η μετάδοση PRACH περιλαμβάνει ένα CP, μια ακολουθία επικεφαλίδας και μια GP. Με τη σειρά της, η ακολουθία επικεφαλίδας περιέχει ένα ή δύο σύμβολα PRACH, τα οποία έχουν μήκος συνήθως 800 μs. Το κινητό εκπέμπει το PRACH χωρίς καμία προήγηση χρόνου, αλλά η GP το εμποδίζει από την πρόσκρουση στο σταθμό βάσης με τα σύμβολα που ακολουθούν.

Ο σταθμός βάσης μπορεί να καθορίσει τη διάρκεια της κάθε συνιστώσας χρησιμοποιώντας τις μορφές επικεφαλίδας που παρατίθενται στον Πίνακα 9.1. Η πιο



Σχήμα 9.1 Αντιστοίχιση RE για το PRACH, χρησιμοποιώντας κατάσταση FDD, ένα κανονικό CP, ένα εύρος ζώνης 3 MHz, ένα δείκτη διαμόρφωσης PRACH των 5 και μια μετατόπιση συχνότητας PRACH των 7.

Πίνακας 9.1 Μορφές επικεφαλίδας τυχαίας πρόσβασης. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI

Format	Approximate duration (μs)			Total	Application
	Cyclic prefix	Preamble	Guard period		
0	103	800	97	1000	Normal cells
1	684	800	516	2000	Large cells
2	203	1600	197	2000	Weak signals
3	684	1600	716	3000	Large cells and weak signals
4	15	133	9	157	Small TDD cells

κοινή είναι η μορφή 0, στην οποία η μετάδοση καταλαμβάνει ένα υποπλαίσιο. Οι μορφές 1 και 3 έχουν μεγάλες GPs, έτσι είναι χρήσιμες σε μεγάλες κυψέλες, ενώ οι μορφές 2 και 3 έχουν δύο σύμβολα PRACH, έτσι είναι χρήσιμες εάν το λαμβανόμενο σήμα είναι ασθενές. Η μορφή 4 χρησιμοποιείται μόνο από μικρές κυψέλες TDD, και σχεδιάζει το PRACH πάνω στο τμήμα άνω ζεύξης ενός ειδικού υποπλαισίου.

Ο σταθμός βάσης εξασφαλίζει ειδικές RBs για το PRACH χρησιμοποιώντας δύο παραμέτρους που τις γνωστοποιεί σε SIB 2, δηλαδή το *δείκτη διαμόρφωσης PRACH* και τη *μετατόπιση συχνότητας PRACH*. Αυτές οι παράμετροι έχουν διαφορετικές σημασίες στις καταστάσεις FDD και TDD.

Σε κατάσταση FDD, ο δείκτης διαμόρφωσης PRACH καθορίζει τη μορφή επικεφαλίδας και τα υποπλαίσια στα οποία μπορούν να αρχίσουν οι μεταδόσεις τυχαίας πρόσβασης, ενώ η μετατόπιση συχνότητας PRACH προσδιορίζει τη θέση τους στο πεδίο συχνοτήτων. Στο Σχήμα 9.1, για παράδειγμα, ο δείκτης διαμόρφωσης PRACH είναι 5, ο οποίος υποστηρίζει μεταδόσεις PRACH στο υποπλαίσιο 7 κάθε πλαισίου χρησιμοποιώντας μορφή επικεφαλίδας 0. Η μετατόπιση συχνότητας

PRACH είναι 7, έτσι οι μεταδόσεις καταλαμβάνουν RBs 7 έως 12 στο πεδίο των συχνοτήτων.

Σε κατάσταση TDD, μεταδόσεις τυχαίας πρόσβασης δεν μπορούν να λάβουν χώρα κατά τη διάρκεια των υποπλαισίων κάτω ζεύξης, έτσι υπάρχουν λιγότερες ευκαιρίες για αυτές. Για να αντισταθμιστεί αυτό, τα κινητά μπορούν να μεταδώσουν το PRACH σε ένα μέγιστο των έξι θέσεων στο πεδίο των συχνοτήτων, αντί για μία. Μαζί, ο δείκτης διαμόρφωσης PRACH και η μετατόπιση συχνότητας καθορίζουν μια αντιστοίχιση στο δίκτυο πόρου, από το οποίο το κινητό μπορεί να ανακαλύψει τις ώρες και τις συχνότητες που στηρίζουν το PRACH.

9.1.2 Παραγωγή Ακολουθίας Επικεφαλίδας

Κάθε κυψέλη υποστηρίζει 64 διαφορετικές ακολουθίες επικεφαλίδων. Το κινητό τις δημιουργεί από τις ακολουθίες Zadoff-Chu που παρουσιάσαμε στο Κεφάλαιο 7, χρησιμοποιώντας 64 διαφορετικούς συνδυασμούς ακολουθίας ριζών και κυκλικής μετατόπισης. Ο σταθμός βάσης λέει στο κινητό ποιους συνδυασμούς να χρησιμοποιήσει, μέσω μιας παραμέτρου που ονομάζεται *δείκτης ακολουθίας ρίζας* που το κοινοποιεί στο SIB 2. Κοντινές κυψέλες χρησιμοποιούν διαφορετικούς δείκτες ακολουθίας ριζών, οι οποίες έχουν εκχωρηθεί είτε κατά το σχεδιασμό του δικτύου είτε από τις λειτουργίες αυτοβελτιστοποίησης που θα συζητήσουμε στο Κεφάλαιο 19.

Ο σταθμός βάσης μπορεί να διακρίνει κινητά που εκπέμπουν στο ίδιο σύνολο RBs, υπό την προϋπόθεση ότι οι ακολουθίες επικεφαλίδων τους είναι διαφορετικές. Για να επιτευχθεί αυτό, διατηρεί ορισμένες από τις 64 ακολουθίες επικεφαλίδων για τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης non contention based, που θα συζητήσουμε έπειτα, και τις εκχωρεί σε μεμονωμένα κινητά μέσω RRC σηματοδότησης. Οι υπόλοιπες είναι διαθέσιμες για τη διαδικασία contention based και επιλέγονται τυχαία από το κινητό.

9.1.3 Μετάδοση Σήματος

Για τη μετάδοση του PRACH, το κινητό δημιουργεί απλώς την κατάλληλη ακολουθία επικεφαλίδας στο πεδίο του χρόνου και την περνάει στον εμπρόσθιο μετασχηματισμό Fourier στο φυσικό του στρώμα. Υπάρχουν, ωστόσο, ορισμένες διαφορές από τις συνηθισμένες τεχνικές για αντιστοίχιση RE που παρουσιάσαμε στο Κεφάλαιο 6. Ειδικότερα, η διάρκεια συμβόλου PRACH είναι 800 μ s στις μορφές 0 έως 3, αντί της συνηθισμένης τιμής των 66.7 μ s. Αυτό σημαίνει ότι η απόσταση υπο-φέρουσας είναι 1250 Hz, αντί της συνηθισμένης τιμής των 7500 Hz. Στη μορφή 4, η διάρκεια συμβόλου είναι 133 μ s, έτσι η απόσταση υπο-φέρουσας είναι 7500 Hz. Η χρήση μιας μικρότερης απόστασης υπο-φέρουσας σημαίνει ότι οι υπο-φέρουσες PRACH δεν είναι κάθετες προς τις υπο-φέρουσες που χρησιμοποιούνται από τα PUCCH και PUSCH. Λόγω αυτού, η ζώνη μετάδοσης PRACH περιέχει μικρές ζώνες προστασίας στα άνω και κάτω άκρα, για να ελαχιστοποιήσει την ποσότητα της παρεμβολής που

εμφανίζεται.

Ο έλεγχος ισχύος λειτουργεί με διαφορετικό τρόπο για το RACH από τα άλλα κανάλια άνω ζεύξης. Το κινητό μεταδίδει πρώτα μια επικεφαλίδα τυχαίας πρόσβασης με την ακόλουθη ισχύ:

$$P_{\text{PRACH}} = \min (P_{\text{PREAMBLE, INITIAL}} + \text{PL}, P_{\text{CMAX}}) \quad (9.1)$$

Εδώ, P_{CMAX} είναι η μέγιστη ισχύς εκπομπής του κινητού, PL είναι η εκτίμησή του για την απώλεια διάδοσης κάτω ζεύξης και $P_{\text{PREAMBLE, INITIAL}}$ είναι μια παράμετρος που ο σταθμός βάσης κοινοποιεί στο SIB 2, που περιγράφει την ισχύ που αναμένει να λάβει.

Στη συνέχεια το κινητό, αναμένει μια απάντηση από το σταθμό βάσης, σε ένα παράθυρο τυχαίας πρόσβασης του οποίου η διάρκεια βρίσκεται μεταξύ 2 και 10 υποπλαισίων. Εάν δεν λάβει απάντηση εντός της προθεσμίας αυτής, τότε υποθέτει ότι η ισχύς εκπομπής ήταν πολύ χαμηλή για το σταθμό βάσης για να την ακούσει, έτσι αυξάνει την ισχύ μετάδοσης από μια τιμή που βρίσκεται μεταξύ 0 και 6 ντεσιμπέλ και επαναλαμβάνει τη μετάδοση. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρις ότου το κινητό λάβει μια απάντηση ή μέχρις ότου φθάσει σε ένα μέγιστο αριθμό αναμεταδόσεων.

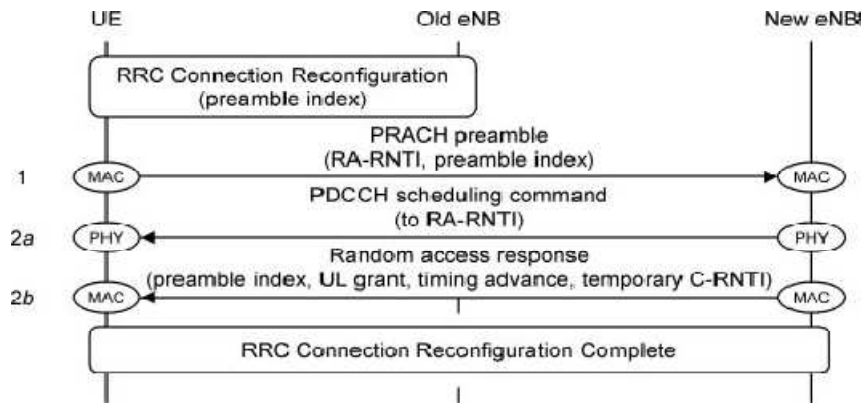
9.2 Διαδικασία Non Contention Based

Όταν το κινητό στέλνει μία μετάδοση PRACH στο σταθμό βάσης ξεκινάει τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης [8-10]. Υπάρχουν δύο παραλλαγές αυτής της διαδικασίας, δηλαδή τις non contention based και contention based.

Εάν το δίκτυο μπορεί να διατηρήσει μια ακολουθία επικεφαλίδας για ένα κινητό, τότε μπορεί να εγγυηθεί ότι κανένα άλλο κινητό δε θα χρησιμοποιεί αυτή την ακολουθία στο ίδιο σύνολο RBs. Αυτή η ιδέα είναι η βάση της διαδικασίας τυχαίας πρόσβασης non contention based, που συνήθως χρησιμοποιείται ως μέρος μιας μεταπομπής όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.2.

Πριν αρχίσει η διαδικασία, ο παλιός σταθμός βάσης στέλνει στο κινητό ένα μήνυμα RRC γνωστό ως *Αναδιαμόρφωση Σύνδεσης RRC*. Αυτό λέει στο κινητό πώς να αναμορφώσει το ίδιο για επικοινωνία με το νέο σταθμό βάσης και προσδιορίζει μια ακολουθία επικεφαλίδας που ο νέος σταθμός βάσης έχει δεσμεύσει για αυτήν. Το κινητό διαβάζει το μήνυμα RRC και ρυθμίζει το ίδιο, σύμφωνα με τις οδηγίες. Ωστόσο, δεν έχει ακόμα συγχρονισμό χρόνου, έτσι ενεργοποιεί τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης.

Το κινητό διαβάζει τη νέα διαμόρφωση τυχαίας πρόσβασης της κυψέλης από το SIB 2, επιλέγει τον επόμενο διαθέσιμο χρόνο μετάδοσης PRACH και στέλνει μια επικεφαλίδα χρησιμοποιώντας τη ζητούμενη ακολουθία (στάδιο 1). Η συχνότητα εκπομπής είναι σταθερή σε κατάσταση FDD, ενώ σε κατάσταση TDD έχει επιλεγεί τυχαία. Μαζί, ο χρόνος μετάδοσης και η συχνότητα καθορίζουν μια ταυτότητα κινητού, γνωστή ως RA-RNTI. Εάν είναι απαραίτητο, το κινητό επαναλαμβάνει την μετάδοση με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω, μέχρι να λάβει απάντηση.



Σχήμα 9.2 Διαδικασία τυχαίας πρόσβασης non contention based, όπως χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια μιας μεταπομπής.

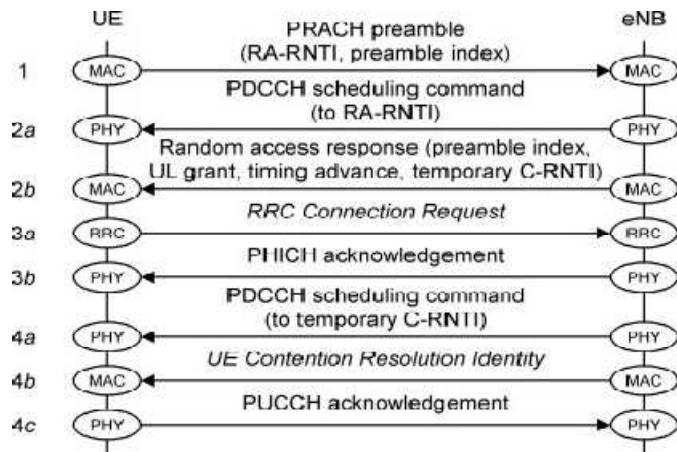
Μόλις ο σταθμός βάσης λάβει την επικεφαλίδα, μετρά την ώρα άφιξης και υπολογίζει την απαιτούμενη προήγηση χρόνου. Πρώτα απαντά με μια εντολή χρονοδιαγράμματος PDCCH (στάδιο 2a), την οποία γράφει χρησιμοποιώντας DCI μορφή 1A ή 1C και διευθύνει την RA-RNTI του κινητού. Την ακολουθεί με μια *απόκριση τυχαίας πρόσβασης* (στάδιο 2b), η οποία προσδιορίζει την ακολουθία επικεφαλίδας που χρησιμοποίησε το κινητό, και δίνει στο κινητό μια παραχώρηση χρονοδιαγράμματος άνω ζεύξης και μία αρχική τιμή για την προήγηση χρόνου άνω ζεύξης. (Ο σταθμός βάσης δίνει επίσης στο κινητό μια ταυτότητα γνωστή ως προσωρινή C-RNTI, αλλά το κινητό δεν τη χρησιμοποιεί πραγματικά σε αυτή την έκδοση της διαδικασίας). Ο σταθμός βάσης μπορεί να εντοπίσει διάφορες ακολουθίες επικεφαλίδας σε μία απάντηση, έτσι μπορεί ταυτόχρονα να απαντήσει σε όλα τα κινητά που μεταδίδονται μέσω των ίδιων RBs, αλλά με διαφορετικές επικεφαλίδες.

Το κινητό λαμβάνει την απάντηση του σταθμού βάσης και προετοιμάζει την προήγηση χρόνου του. Μπορεί τότε να απαντά σε μήνυμα σηματοδότησης του σταθμού βάσης, χρησιμοποιώντας μια *Ολοκληρωμένη Σύνδεση Αναδιαμόρφωσης RRC*.

Ένας σταθμός βάσης μπορεί επίσης να κινήσει τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης non contention based εάν επιθυμεί να μεταδώσει στο κινητό στην κάτω ζεύξη, αλλά έχει χάσει το συγχρονισμό χρόνου με αυτό. Για να το κάνει αυτό, πυροδοτεί τη διαδικασία χρησιμοποιώντας μια παραλλαγή της DCI μορφής 1A που είναι γνωστή ως *σειρά PDCCH* [11]. Η διαδικασία, τότε, συνεχίζει με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω.

9.3 Διαδικασία Contention Based

Ένα κινητό χρησιμοποιεί τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης contention based εάν δεν έχει χορηγηθεί ένας δείκτης επικεφαλίδας. Αυτό συμβαίνει συνήθως ως μέρος μιας διαδικασίας, γνωστής ως εγκατάσταση σύνδεσης RRC, με τον τρόπο που φαίνεται στο Σχήμα 9.3.



Σχήμα 9.3 Διαδικασία τυχαίας πρόσβασης contention based, όπως χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης σύνδεσης RRC.

Σε αυτό το παράδειγμα, το κινητό επιθυμεί να στείλει στο σταθμό βάσης ένα μήνυμα RRC γνωστό ως ένα *Αίτημα Σύνδεσης RRC*, με το οποίο ζητάει να περάσει από την RRC_IDLE στην RRC_CONNECTED. Δεν έχει πόρους PUSCH στους οποίους να στείλει το μήνυμα και πόρους PUCCH στους οποίους να στείλει ένα SR, έτσι ενεργοποιεί τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης.

Το κινητό διαβάζει τη διαμόρφωση τυχαίας πρόσβασης της κυψέλης από το SIB 2 και επιλέγει τυχαία μια ακολουθία επικεφαλίδας από αυτές που διατίθενται. Στη συνέχεια μεταδίδει την επικεφαλίδα κατά τον συνηθισμένο τρόπο (στάδιο 1). Υπάρχει ένας κίνδυνος διαφωνίας, εάν δύο ή περισσότερα κινητά μεταδίδουν στους ίδιους RBs χρησιμοποιώντας την ίδια ακολουθία επικεφαλίδας. Όπως και πριν, ο σταθμός βάσης στέλνει στο κινητό μια εντολή χρονοδιαγράμματος που ακολουθείται από μια απάντηση τυχαίας πρόσβασης (στάδια 2a και 2b).

Χρησιμοποιώντας την παραχώρηση άνω ζεύξης, το κινητό στέλνει το δικό του μήνυμα RRC κατά τον συνηθισμένο τρόπο (στάδιο 3a). Ως μέρος του μηνύματος, το κινητό ταυτίζεται μοναδικά χρησιμοποιώντας είτε το δικό του S-TMSI είτε έναν τυχαίο αριθμό (Ενότητα 11.3.1). Υπάρχει ακόμη ένας κίνδυνος διαφωνίας μεταξύ των κινητών που ξεκίνησαν τη διαδικασία, αλλά αν μία από τις μεταδόσεις είναι πολύ ισχυρότερη από τις άλλες, τότε ο σταθμός βάσης θα είναι σε θέση να το αποκωδικοποιήσει. Οι άλλες μεταδόσεις θα προκαλέσουν μόνο παρεμβολές. Ο σταθμός βάσης στέλνει μια επιβεβαίωση χρησιμοποιώντας τον πόρο PHICH που προέκυψε από την παραχώρηση χρονοδιαγράμματος (στάδιο 3b).

Ο σταθμός βάσης στέλνει τώρα στο κινητό άλλη εντολή χρονοδιαγράμματος (στάδιο 4a), την οποία απευθύνει στην προσωρινή C-RNTI που διέθεσε νωρίτερα. Ακολουθεί την εντολή με ένα στοιχείο ελέγχου MAC που ονομάζεται *ταυτότητα απόφασης ισχυρισμού UE* (στάδιο 4b). Αυτό μεταβιβάζει το μήνυμα RRC που το κινητό μετέδιδε στο στάδιο 3, έτσι περιλαμβάνει την ταυτότητα του επιτυχημένου κινητού.

Αν ένα κινητό λάβει μια ηχώ του μηνύματος που αρχικά μεταδόθηκε, τότε στέλνει μια επιβεβαίωση χρησιμοποιώντας τον πόρο PUCCH που υποδεικνύεται από

την εντολή χρονοδιαγράμματος (στάδιο 4c). Στη συνέχεια προωθεί την προσωρινή C-RNTI σε μια πλήρη C-RNTI και συνεχίζει τη διαδικασία RRC. Αν το μήνυμα δεν ταιριάζει, τότε το κινητό απορρίπτει την προσωρινή C-RNTI και προσπαθεί τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης και πάλι σε μεταγενέστερο χρόνο. Σαν αποτέλεσμα, ο σταθμός βάσης έχει επιλέξει ένα από τα κινητά που αρχικά ανταγωνίζονταν για την προσοχή του και έχει πει στα άλλα να κάνουν πίσω.

Ένα κινητό μπορεί επίσης να κινήσει τη διαδικασία contention based σε κατάσταση RRC_CONNECTED, εάν επιθυμεί να μεταδώσει προς το σταθμό βάσης αλλά έχει χάσει το συγχρονισμό του χρόνου, ή αν έχει φτάσει σε ένα μέγιστο αριθμό SR χωρίς να λάβει μια απάντηση. Σε αυτήν την κατάσταση, ωστόσο, το κινητό έχει ήδη ένα C-RNTI. Στο στάδιο 3 της διαδικασίας, αντικαθιστά το μήνυμα RRC με ένα C-RNTI στοιχείο ελέγχου MAC (Κεφάλαιο 10) και ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί στη συνέχεια το C-RNTI ως βάση για την ανάλυση του ισχυρισμού.

Αναφορές

1. 3GPP TS 36.211 (September 2011) *Physical Channels and Modulation*, Release 10.
2. 3GPP TS 36.213 (September 2011) *Physical Layer Procedures*, Release 10.
3. 3GPP TS 36.321 (October 2011) *Medium Access Control (MAC) Protocol Specification*, Release 10.
4. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10.
5. 3GPP TS 36.211 (September 2011) *Physical Channels and Modulation*, Release 10, section 5.7.
6. 3GPP TS 36.212 (September 2011) *Multiplexing and Channel Coding*, Release 10, section 5.2.1.
7. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10, section 6.3.2 (*PRACH-Config, RACH-Config Common, RACH-Config Dedicated*).
8. 3GPP TS 36.300 (October 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall Description; Stage 2*, Release 10, section 10.1.5.
9. 3GPP TS 36.321 (October 2011) *Medium Access Control (MAC) Protocol Specification*, Release 10, sections 5.1, 6.1.3.2, 6.1.3.4, 6.1.5, 6.2.2, 6.2.3.
10. 3GPP TS 36.213 (September 2011) *Physical Layer Procedures*, Release 10, section 6.
11. 3GPP TS 36.212 (September 2011) *Multiplexing and Channel Coding*, Release 10, section 5.3.3.1.3.

10

Στρώμα 2 Διεπαφής Αέρα

Έχουμε πλέον ολοκληρώσει την έρευνά μας για τη διεπαφή αέρα φυσικού επιπέδου. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα ολοκληρώσουμε τη συζήτησή μας για την LTE διεπαφή αέρα περιγράφοντας τα τρία πρωτόκολλα στο στρώμα ζεύξης δεδομένων, το Στρώμα 2 του μοντέλου OSI. Το πρωτόκολλο MAC προγραμματίζει όλες τις μεταδόσεις που γίνονται για την LTE διεπαφή αέρα και ελέγχει τη χαμηλού επιπέδου λειτουργία του φυσικού στρώματος. Το πρωτόκολλο RLC διατηρεί τη ζεύξη δεδομένων σε ολόκληρη τη διεπαφή αέρα, εάν είναι απαραίτητο, αναμεταδίδοντας πακέτα που το φυσικό επίπεδο δεν παρέδωσε σωστά. Τέλος, το πρωτόκολλο PDCP διατηρεί την ασφάλεια της διεπαφής αέρα, συμπιέζει τις κεφαλίδες των IP πακέτων και εξασφαλίζει την αξιόπιστη παράδοση των πακέτων μετά από μια μεταπομπή.

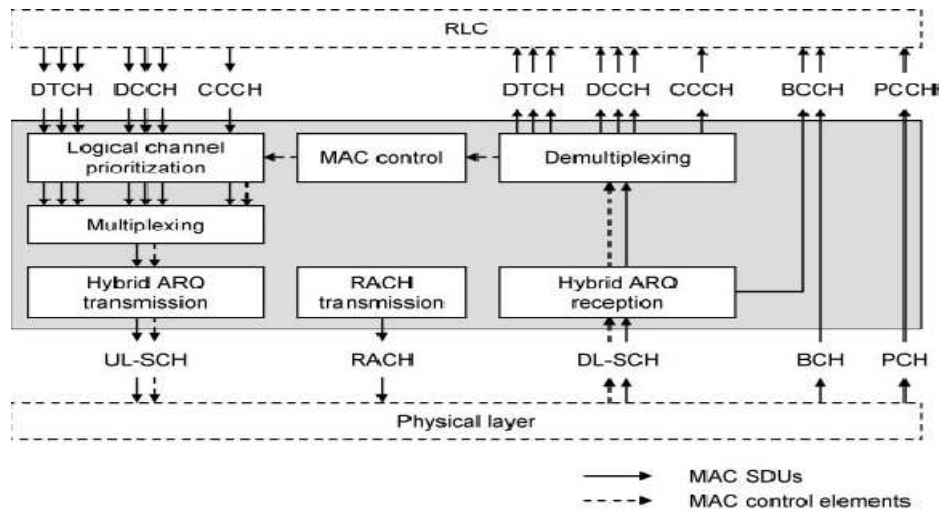
10.1 Πρωτόκολλο MAC

10.1.1 Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλου

Το πρωτόκολλο MAC [1, 2] προγραμματίζει τις μεταδόσεις που εκτελούνται επί της διεπαφής αέρα και ελέγχει τη χαμηλού επιπέδου λειτουργία φυσικού επιπέδου. Υπάρχει ένας φορέας MAC στο σταθμό βάσης και ένας στο κινητό. Για να φανεί η αρχιτεκτονική του, το Σχήμα 10.1 είναι ένα υψηλού επιπέδου διάγραμμα πρωτοκόλλου MAC του κινητού.

Στον πομπό, η συνάρτηση *προτεραιότητας λογικού καναλιού* καθορίζει πόσα δεδομένα θα πρέπει να μεταδώσει το κινητό από κάθε εισερχόμενο λογικό κανάλι σε κάθε TTI. Σε απάντηση, το κινητό παίρνει τα απαιτούμενα δεδομένα από καταχωρητές μετάδοσης στο πρωτόκολλο RLC, υπό τη μορφή των μονάδων δεδομένων υπηρεσιών MAC (SDUs). Η λειτουργία *πολύπλεξης* συνδυάζει τις SDUs μαζί, δίνει μια κεφαλίδα και στέλνει τα δεδομένα που προκύπτουν σε ένα κανάλι μεταφοράς για το φυσικό επίπεδο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της λειτουργίας *μετάδοσης HARQ*, η οποία ελέγχει τη λειτουργία πρωτοκόλλου HARQ του φυσικού επιπέδου. Τα πακέτα δεδομένων εξόδου είναι γνωστά ως μονάδες δεδομένων πρωτοκόλλου MAC (PDUs) και είναι πανομοιότυπα με τις ομάδες μεταφοράς που είδαμε στο Κεφάλαιο 8. Οι λειτουργίες αντιστρέφονται στο δέκτη του κινητού.

Οι αρχές είναι σχεδόν οι ίδιες στο σταθμό βάσης, με τα κανάλια κάτω ζεύξης να μεταδίδουν και τα κανάλια άνω ζεύξης να λαμβάνουν. Ωστόσο, υπάρχουν δύο κύριες διαφορές. Πρώτον, το πρωτόκολλο MAC του σταθμού βάσης πρέπει να πραγματοποιεί μεταδόσεις σε διαφορετικά κινητά στην κάτω ζεύξη και να λαμβάνει μεταδόσεις από διαφορετικά κινητά στην άνω ζεύξη. Δεύτερον, το πρωτόκολλο περιλαμβάνει μια λειτουργία *χρονοδιαγράμματος*, η οποία οργανώνει τις μεταδόσεις



Σχήμα 10.1 Αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου του πρωτοκόλλου MAC του κινητού. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI.

του σταθμού βάσης στην κάτω ζεύξη και τις μεταδόσεις των κινητών στην άνω ζεύξη, και η οποία τελικά καθορίζει τα περιεχόμενα των εντολών χρονοδιαγράμματος PDCCH και τις παραχωρήσεις χρονοδιαγράμματος.

Το πρωτόκολλο MAC στέλνει επίσης και λαμβάνει μια σειρά από *MAC στοιχεία ελέγχου*, που ελέγχουν την χαμηλού επιπέδου λειτουργία του φυσικού επιπέδου. Υπάρχουν διάφοροι τύποι στοιχείων ελέγχου, οι οποίοι παρατίθενται στον Πίνακα 10.1. Έχουμε δει ήδη τρεις από αυτούς. Κατά τη διάρκεια ασυνεχούς λήψης στην RRC_CONNECTED, ο σταθμός βάσης μπορεί να απενεργοποιήσει το κινητό χρησιμοποιώντας μια *εντολή DRX*, ενώ η *ταυτότητα ανάλυσης ισχυρισμού UE* και τα στοιχεία ελέγχου C-RNTI χρησιμοποιούνται και τα δύο από τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης contention based. Θα συζητήσουμε παρακάτω τα υπόλοιπα στοιχεία ελέγχου της Ενότητας 8, πριν προχωρήσουμε στις υπόλοιπες ομάδες στο διάγραμμα.

10.1.2 Εντολές Προήγησης Χρόνου

Μετά την αρχικοποίηση προήγησης χρόνου ενός κινητού, χρησιμοποιώντας τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης, ο σταθμός βάσης το ενημερώνει χρησιμοποιώντας MAC στοιχεία ελέγχου γνωστά ως *Εντολές Προήγησης Χρόνου*. Κάθε εντολή ρυθμίζει την προήγηση χρόνου κατά ένα ποσό που κυμαίνεται από $-496 T_s$ έως $+512 T_s$, με μια ανάλυση $16 T_s$ [3]. Αυτό αντιστοιχεί σε μια αλλαγή από -2.4 έως $+2.5$ km στην απόσταση μεταξύ του κινητού και του σταθμού βάσης, με μια ανάλυση 80 μέτρων.

Το κινητό αναμένει να λάβει εντολές προήγησης χρόνου από το σταθμό βάσης σε τακτά χρονικά διαστήματα. Το μέγιστο επιτρεπόμενο χρονικό διάστημα είναι μια ποσότητα γνωστή ως *Χρονοδιακόπτης Ευθυγράμμισης*, που μπορεί να πάρει μια τιμή από 500 έως 10240 υποπλαίσια (0.5 έως 10.24 δευτερόλεπτα), ή μπορεί να είναι άπειρη εάν το μέγεθος κυψέλης είναι μικρό [4]. Αν ο χρόνος που έχει παρέλθει από

Πίνακας10.1 Κατάλογος MAC στοιχείων ελέγχου

MAC control element	Release	Application	Direction
Buffer status report	R8	UE transmit buffer occupancy	UL
C-RNTI	R8	UE identification option during random access	
Power headroom	R8	UE transmit power headroom	DL
Extended power headroom	R10	Power headroom during carrier aggregation	
DRX command	R8	Sends UE to sleep during DRX	DL
Timing advance command	R8	Adjusts UE timing advance	
UE contention resolution identity	R8	Resolves contention during random access	
MCH scheduling information	R9	Informs UE about scheduling of MBMS	DL
Activation/deactivation	R10	Activates/deactivates secondary cells	

την προηγούμενη εντολή προήγησης χρόνου υπερβαίνει την τιμή αυτή, τότε το κινητό καταλήγει στο συμπέρασμα ότι έχει χάσει το συγχρονισμό χρόνου με τον σταθμό βάσης. Σε απάντηση, απελευθερώνει όλους τους πόρους PUSCH και PUCCH, κυρίως τις παραμέτρους $n_{PUCCH}^{(1)}$, $n_{PUCCH, SRI}^{(1)}$ και $n_{PUCCH}^{(2)}$ από το Κεφάλαιο 8. Κάθε μεταγενέστερη προσπάθεια για να μεταδώσει, θα ενεργοποιήσει τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης, μέσω της οποίας το κινητό μπορεί να ανακτήσει το συγχρονισμό χρόνου του.

10.1.3 Αναφορά Κατάστασης Καταχωρητή

Το κινητό μεταδίδει MAC στοιχεία ελέγχου αναφοράς κατάστασης Καταχωρητή (BSR) για να πει στο σταθμό βάσης για το πόσα δεδομένα έχει διαθέσιμα για μετάδοση. Υπάρχουν τρεις τύποι BSR, από τους οποίους ο πιο σημαντικός είναι ο τακτικός BSR. Ένα κινητό τον στέλνει σε τρεις περιπτώσεις: αν τα δεδομένα είναι έτοιμα για μετάδοση όταν οι καταχωρητές μετάδοσης ήταν προηγουμένως άδειοι, ή αν τα δεδομένα είναι έτοιμα για μετάδοση σε ένα λογικό κανάλι με μια μεγαλύτερη προτεραιότητα από ό,τι είχαν προηγουμένως αποθηκεύσει οι καταχωρητές, ή αν ένας χρονοδιακόπτης λήξει ενώ τα δεδομένα είναι σε αναμονή για μετάδοση. Το κινητό περιμένει το σταθμό βάσης να απαντήσει με μια παραχώρηση χρονοδιαγράμματος.

Αν το κινητό επιθυμεί να στείλει έναν τακτικό BSR, αλλά δεν έχει τους πόρους PUSCH για να το πράξει, τότε αντ' αυτού, στέλνει στο σταθμό βάσης ένα SR στο PUCCH. (Στην πραγματικότητα, ένα SR είναι πάντα ενεργοποιημένο με αυτό τον τρόπο, από μία αδυναμία να στείλει έναν τακτικό BSR). Εάν, ωστόσο, το κινητό είναι σε RRC_IDLE ή έχει χάσει το συγχρονισμό χρόνου με το σταθμό βάσης, τότε δεν έχει ούτε PUCCH πόρους. Στην περίπτωση αυτή, εκτελεί τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης αντί γι' αυτό.

Υπάρχουν δύο άλλα είδη BSR. Το κινητό μεταδίδει περιοδικούς BSRs σε τακτά χρονικά διαστήματα κατά τη μετάδοση δεδομένων στο PUSCH, και παραγεμισμένους BSRs αν έχει αρκετό ελεύθερο χώρο, κατά τη διάρκεια μιας κανονικής μετάδοσης PUSCH.

10.1.4 Αναφορά Περιθωρίου Ισχύος

Το περιθώριο ισχύος ενός κινητού είναι η διαφορά μεταξύ της μέγιστης ισχύος εκπομπής του και της ισχύος που ζητείται για την PUSCH μετάδοσή του [5]. Το περιθώριο ισχύος είναι συνήθως θετικό, αλλά μπορεί να είναι αρνητικό αν η ζητούμενη ισχύς υπερβαίνει την διαθέσιμη ισχύ.

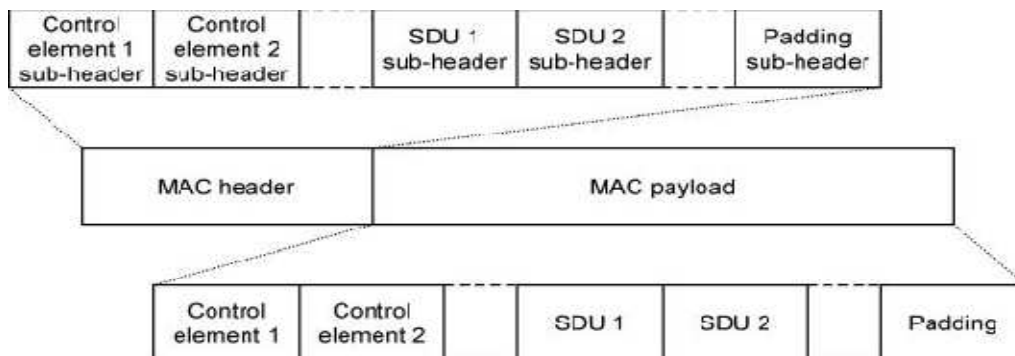
Το κινητό αναφέρει το περιθώριο ισχύος του στο σταθμό βάσης χρησιμοποιώντας ένα MAC στοιχείο ελέγχου *περιθωρίου ισχύος*. Μπορεί να το κάνει σε δύο περιπτώσεις: περιοδικά ή αν η απώλεια διάδοσης κάτω ζεύξης έχει αλλάξει σημαντικά από την τελευταία αναφορά. Ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί τις πληροφορίες για να υποστηρίξει τη διαδικασία χρονοδιαγράμματος άνω ζεύξης του, τυπικά περιορίζοντας το ρυθμό δεδομένων με τον οποίο ζητά το κινητό για να μεταδώσει.

10.1.5 Πολύπλεξη και Αποπολύπλεξη

Μπορούμε τώρα να συζητήσουμε την εσωτερική δομή μιας MAC PDU και τον τρόπο με τον οποίο συναρμολογείται. Στην πιο γενική μορφή της (Σχήμα 10.2), μια MAC PDU , περιέχει αρκετές MAC SDUs και πολλά στοιχεία ελέγχου, που απαρτίζουν συλλογικά το ωφέλιμο φορτίο MAC. Κάθε SDU περιέχει τα δεδομένα που λαμβάνονται από την RLC σε ένα ενιαίο λογικό κανάλι, ενώ κάθε στοιχείο ελέγχου είναι ένα από τα στοιχεία που παρατίθενται στον Πίνακα 10.1. Το ωφέλιμο φορτίο μπορεί να περιέχει επίσης επένδυση, η οποία περικλείει την PDU σε ένα από τα επιτρεπόμενα μεγέθη ομάδας μεταφοράς.

Κάθε στοιχείο στο ωφέλιμο φορτίο MAC συνδέεται με μια υποκεφαλίδα. Η υποκεφαλίδα SDU προσδιορίζει το μέγεθος της SDUs και το λογικό κανάλι από το οποίο προήλθε, ενώ η υποκεφαλίδα στοιχείου ελέγχου προσδιορίζει το μέγεθος και τον τύπο του στοιχείου ελέγχου.

Στην άνω ζεύξη, το κινητό ανακαλύπτει το απαιτούμενο μέγεθος PDU από την παραχώρηση χρονοδιαγράμματος του σταθμού βάσης. Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο ιεράρχησης που περιγράφεται παρακάτω, το κινητό αποφασίζει πώς θα



Σχήμα 10.2 Δομή ενός MAC PDU. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI.

γεμίσει το διαθέσιμο χώρο στην PDU, παίρνει τις SDUs από τους καταχωρητές στο πρωτόκολλο υπερκειμένου RLC και παίρνει τα στοιχεία ελέγχου από τη μονάδα ελέγχου MAC. Η λειτουργία πολύπλεξης, στη συνέχεια, γράφει τις αντίστοιχες υποκεφαλίδες και συγκεντρώνει το PDU. Η ίδια τεχνική χρησιμοποιείται στην κάτω ζεύξη, εκτός του ότι, όπως θα δούμε, η διαδικασία ιεράρχησης είναι μάλλον διαφορετική.

10.1.6 Προτεραιότητα Λογικού Καναλιού

Είδαμε παραπάνω ότι ο σταθμός βάσης λέει στο κινητό για το μέγεθος της κάθε MAC PDU άνω ζεύξης χρησιμοποιώντας την παραχώρηση χρονοδιαγράμματός του. Ωστόσο, η παραχώρηση χρονοδιαγράμματος δε λέει τίποτα για το τι θα πρέπει να περιέχει η PDU. Το κινητό επομένως εκτελεί έναν αλγόριθμο ιεράρχησης, για να αποφασίσει πώς να τη γεμίσει.

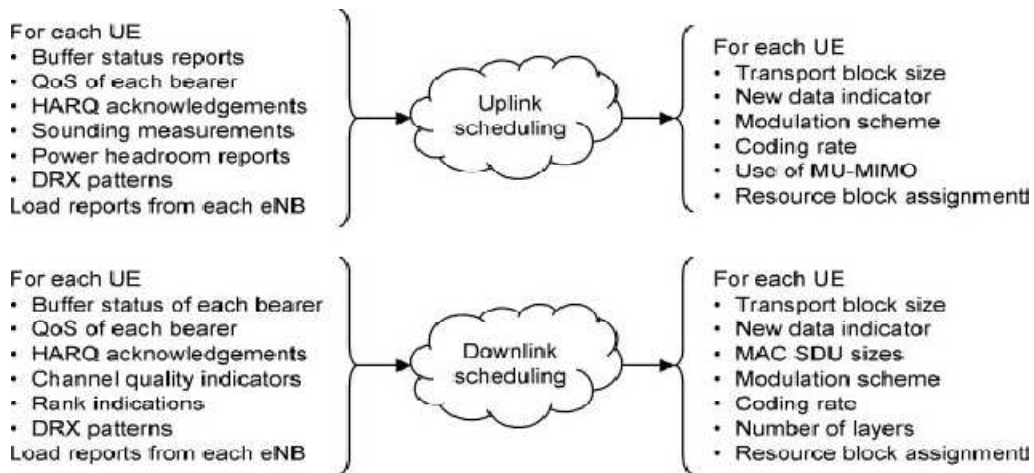
Για τη στήριξη του αλγορίθμου, κάθε λογικό κανάλι σχετίζεται με μια προτεραιότητα από 1 έως 16, όπου ένας μικρός αριθμός αντιστοιχεί σε μια υψηλή προτεραιότητα. Το λογικό κανάλι συνδέεται επίσης με έναν ρυθμό *bit προτεραιότητας* (PBR), η οποία εκτείνεται από μηδέν έως 256 kbps και είναι ένας στόχος για το μακροπρόθεσμο μέσο ρυθμό bit. Οι προδιαγραφές υποστηρίζουν επίσης, έναν ατέρμονο PBR, με την ερμηνεία «το συντομότερο δυνατόν». Τελικά, αυτές οι παράμετροι προέρχονται όλες από την QoS των παραμέτρων που θα συζητήσουμε στο Κεφάλαιο 13.

Ο αλγόριθμος ορίζεται πλήρως με την προδιαγραφή MAC πρωτοκόλλου και οι αρχές είναι ως ακολούθως. Πρώτον, ο MAC διασχίζει τα λογικά κανάλια με σειρά προτεραιότητας και παίρνει τα δεδομένα από τα κανάλια που μένουν πίσω από τους μακροπρόθεσμους μέσους ρυθμούς bit τους. Στη συνέχεια διασχίζει τα κανάλια κατά σειρά προτεραιότητας για άλλη μια φορά και γεμίζει κάθε χώρο του PDU που παραμένει. Ο αλγόριθμος επίσης δίνει προτεραιότητα στα στοιχεία ελέγχου, και η προκύπτουσα σειρά προτεραιότητας έχει ως εξής: δεδομένα σχετικά με το CCCH μαζί με τυχόν στοιχεία ελέγχου που συνδέονται με το C-RNTI, τακτικές ή περιοδικές BSR, αναφορές περιθωρίου ισχύος, δεδομένα σχετικά με άλλα λογικά κανάλια και τέλος, παραγεμισμένα BSR.

Η ιεράρχηση στην κάτω ζεύξη είναι κάπως διαφορετική, επειδή ο σταθμός βάσης είναι ελεύθερος να γεμίσει τα PDUs με οποιονδήποτε τρόπο θέλει. Στην πράξη, ο αλγόριθμος ιεράρχησης κάτω ζεύξης, θα αποτελέσει μέρος του ιδιόκτητου αλγορίθμου χρονοδιαγράμματος που θα συζητήσουμε παρακάτω.

10.1.7 Χρονοδιάγραμμα Μεταδόσεων στη Διεπαφή Αέρα

Ο αλγόριθμος χρονοδιαγράμματος του σταθμού βάσης πρέπει να αποφασίσει τα περιεχόμενα της κάθε εντολής χρονοδιαγράμματος κάτω ζεύξης και της παραχώρησης χρονοδιαγράμματος άνω ζεύξης, με βάση όλες τις πληροφορίες που



Σχήμα 10.3 Είσοδοι και έξοδοι για τους αλγόριθμους χρονοδιαγράμματος άνω και κάτω ζεύξης.

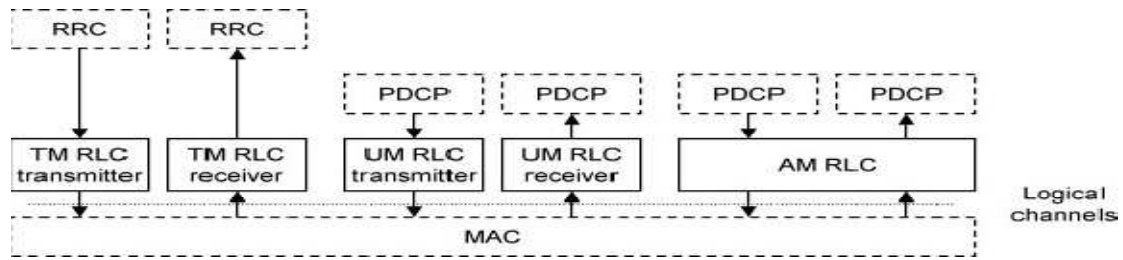
έχει στη διάθεσή του τότε. Οι προδιαγραφές δε λένε τίποτα για το πώς θα πρέπει να λειτουργεί, αλλά για να τονιστεί η λειτουργία του, το Σχήμα 10.3 δείχνει μερικές από τις κύριες εισόδους και εξόδους.

Οι πληροφορίες που διατίθενται στον προγραμματιστή κάτω ζεύξης περιλαμβάνουν τα ακόλουθα. Κάθε φορέας συνδέεται με έναν καταχωρητή πληρότητας, καθώς και πληροφορίες σχετικά με την QoS του, όπως η προτεραιότητα και ο PBR που παρουσιάσαμε νωρίτερα. Για τη στήριξη της λειτουργίας χρονοδιαγράμματος, το κινητό επιστρέφει επιβεβαιώσεις HARQ, CQI και RIs. Ο σταθμός βάσης γνωρίζει επίσης το ασυνεχές σχέδιο λήψης για κάθε κινητό στην κυψέλη και μπορεί να λάβει πληροφορίες φορτίου από τις γειτονικές κυψέλες για δική τους χρήση των υπο-φερουσών κάτω ζεύξης.

Χρησιμοποιώντας αυτές τις πληροφορίες, ο προγραμματιστής πρέπει να αποφασίσει πόσα bits πληροφοριών να στείλει σε κάθε κινητό, είτε για να στείλει μια νέα μετάδοση είτε μια αναμετάδοση και πώς να μοιράσει νέες μεταδόσεις μεταξύ των διαθέσιμων φορέων. Θα πρέπει επίσης να αποφασίσει τα συστήματα διαμόρφωσης και τα ποσοστά κωδικοποίησης που θα χρησιμοποιήσει, τον αριθμό των στρωμάτων στην περίπτωση της χωρικής πολύπλεξης, και την κατανομή των RBs για κάθε κινητό.

Ο προγραμματιστής άνω ζεύξης ακολουθεί τις ίδιες αρχές, αν και ορισμένες από τις εισόδους και εξόδους είναι διαφορετικές. Για παράδειγμα, ο σταθμός βάσης δεν έχει πλήρη γνώση του καταχωρητή πληρότητας άνω ζεύξης και δε λέει στα κινητά ποια λογικά κανάλια θα πρέπει να χρησιμοποιούν για τις μεταδόσεις άνω ζεύξης τους. Επιπλέον, ο σταθμός βάσης αντλεί τις δικές του πληροφορίες ποιότητας καναλιού από τη διαδικασία ήχησης, αντί για τους CQI των κινητών.

Σε ένα βασικό επίπεδο, δύο ακραίοι αλγόριθμοι χρονοδιαγράμματος είναι διαθέσιμοι. Ένας προγραμματιστής μέγιστου ποσοστού διαθέτει πόρους για τα κινητά με τους υψηλότερους λόγους σήματος προς θόρυβο, οι οποίοι μπορούν να μεταδώσουν ή να λάβουν στα υψηλότερα ποσοστά δεδομένων. Αυτό μεγιστοποιεί την απόδοση της κυψέλης αλλά είναι κατάφωρα άδικο, ως απομακρυσμένα κινητά δεν



Σχήμα 10.4 Αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου του πρωτοκόλλου RLC. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI.

μπορούν να έχουν μια ευκαιρία να μεταδώσουν ή να λάβουν εντελώς. Στο άλλο άκρο, ένας προγραμματιστής εξυπηρέτησης εκ' περιτροπής, δίνει τον ίδιο ρυθμό δεδομένων σε κάθε κινητό. Αυτό είναι δίκαιο, αλλά κατάφωρα αναποτελεσματικό, ως απομακρυσμένα κινητά με χαμηλούς λόγους σήματος προς θόρυβο θα επικρατήσουν στη χρήση των πόρων της κυψέλης. Στην πράξη, τεχνικές όπως ο *proportional fair scheduling* προσπαθούν να επιτύχουν μια ισορροπία μεταξύ των δύο άκρων.

Για να συνοψίσουμε, ο χρονοδρομολογητής είναι ένα πολύπλοκο κομμάτι λογισμικού, και ένα από τα δυσκολότερα μέρη του συστήματος για αποτελεσματική εφαρμογή. Είναι πιθανό να είναι ένας σημαντικός παράγοντας διαφοροποίησης μεταξύ των κατασκευαστών εξοπλισμού και των φορέων εκμετάλλευσης δικτύου.

10.2 Πρωτόκολλο Ελέγχου Ραδιοζεύξης

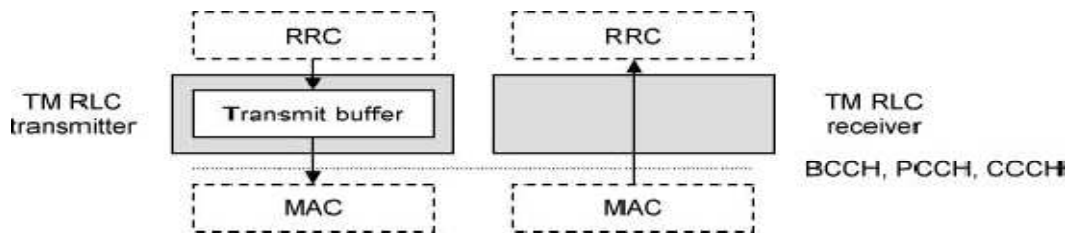
10.2.1 Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλου

Το πρωτόκολλο RLC [6, 7] διατηρεί το στρώμα 2 ζεύξης δεδομένων μεταξύ του κινητού και του σταθμού βάσης, για παράδειγμα διασφαλίζοντας αξιόπιστη παράδοση για ροές δεδομένων που πρέπει να φτάσουν σωστά στο δέκτη. Το Σχήμα 10.4 δείχνει την υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονική του RLC. Ο πομπός δέχεται SDUs από υψηλότερα στρώματα με τη μορφή τροποποιημένων IP πακέτων ή μηνυμάτων σηματοδότησης, και στέλνει PDUs στο πρωτόκολλο MAC για τα λογικά κανάλια. Η διαδικασία αντιστρέφεται στο δέκτη.

Το RLC έχει τρεις τρόπους λειτουργίας, δηλαδή *διαφανή λειτουργία (TM)*, *μη αναγνωρισμένη λειτουργία (UM)* και *αναγνωρισμένη λειτουργία (AM)*. Αυτές έχουν φτιαχτεί σε μια βάση κανάλι προς κανάλι, έτσι ώστε κάθε λογικό κανάλι να σχετίζεται με ένα αντικείμενο RLC που έχει ρυθμιστεί με έναν από αυτούς τους τρόπους λειτουργίας. Τα RLC αντικείμενα TM και UM είναι μονής κατεύθυνσης, ενώ το αντικείμενο AM είναι αμφίδρομο.

10.2.2 Διαφανής Λειτουργία

Η TM χειρίζεται τρεις τύπους μηνύματος σηματοδότησης: μηνύματα συστήματος



Σχήμα 10.5 Εσωτερική αρχιτεκτονική του πρωτοκόλλου RLC στην TM. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI.

πληροφοριών στο BCCH, μηνύματα αναζήτησης στο PCCH και RRC μηνύματα εγκατάστασης της σύνδεσης στο CCCH. Η αρχιτεκτονική της (Σχήμα 10.5) είναι πολύ απλή.

Στον πομπό, το RLC λαμβάνει μηνύματα σηματοδότης απευθείας από το πρωτόκολλο RRC, και τα αποθηκεύει σε έναν καταχωρητή. Το πρωτόκολλο MAC παίρνει τα μηνύματα από τον καταχωρητή, ως RLC PDUs, χωρίς καμία τροποποίηση. (Τα μηνύματα είναι αρκετά μικρά για να χωρέσουν σε μια ενιαία ομάδα μεταφοράς, χωρίς την κατάτμησή τους). Στο δέκτη, το RLC περνάει τα μηνύματα που έλαβε απευθείας μέχρι το RRC.

10.2.3 Μη Αναγνωρισμένη Λειτουργία

Η UM χειρίζεται ροές δεδομένων στο DTCH για το οποίο η έγκαιρη παράδοση είναι πιο σημαντική από την αξιοπιστία, όπως VoIP και βίντεο συνεχούς ροής. Η αρχιτεκτονική της φαίνεται στο Σχήμα 10.6.

Ο πομπός RLC λαμβάνει SDUs από το PDCP με τη μορφή τροποποιημένων πακέτων IP και τα αποθηκεύει σε έναν καταχωρητή με τον ίδιο τρόπο όπως πριν. Αυτή τη φορά, ωστόσο, το πρωτόκολλο MAC λέει στο RLC να στείλει ένα PDU με ένα συγκεκριμένο μέγεθος. Σε απάντηση, η λειτουργία κατάτμησης και ακολουθίας μειώνει τα ρυθμιζόμενα πακέτα IP και συνδέει τα άκρα τους μαζί, έτσι ώστε να παραδώσει ένα PDU με το σωστό μέγεθος μέχρι το MAC. Σαν αποτέλεσμα, το μέγεθος εξόδου PDU δεν έχει καμία ομοιότητα με το μέγεθος εισόδου SDU. Τέλος,

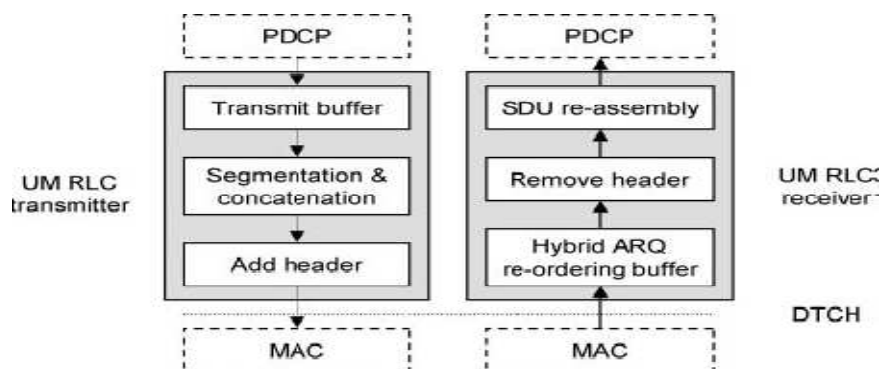
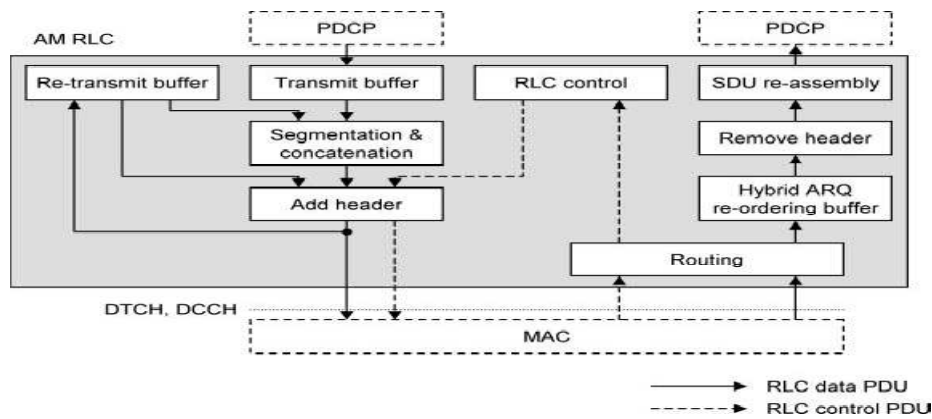


Figure 10.6 Εσωτερική αρχιτεκτονική του πρωτοκόλλου RLC στη UM. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI.



Σχήμα 10.7 Εσωτερική αρχιτεκτονική πρωτοκόλλου RLC στην AM. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI.

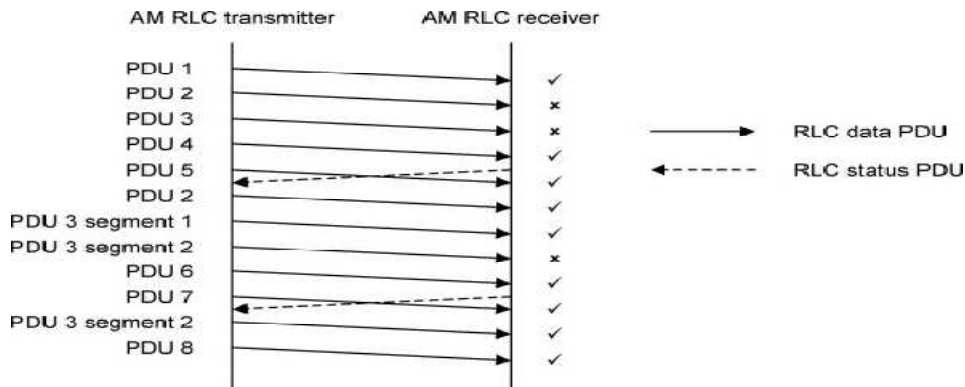
το RLC προσθέτει μια κεφαλίδα που περιέχει δύο σημαντικά μέρη πληροφοριών: έναν αριθμό ακολουθίας PDU, και μια περιγραφή οποιασδήποτε κατάτμησης και αλληλουχίας που έχει κάνει.

Οι PDUs μπορούν να φτάσουν το πρωτόκολλο RLC του δέκτη με διαφορετική σειρά, λόγω των σχετικών διεργασιών HARQ. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, η λειτουργία αναδιάταξης HARQ αποθηκεύει τα λαμβανόμενα PDUs σε έναν καταχωρητή, και χρησιμοποιεί τους αριθμούς ακολουθίας τους για να τους στείλει προς τα πάνω, με τη σωστή σειρά. Ο δέκτης μπορεί στη συνέχεια να αφαιρέσει την κεφαλίδα από κάθε PDU, να χρησιμοποιήσει τις πληροφορίες κεφαλίδας για να αναιρέσει την κατάτμηση και τη διαδικασία αλληλουχίας και να ανακατασκευάσει τα αρχικά πακέτα.

10.2.4 Αναγνωρισμένη Λειτουργία

Η AM χειρίζεται δύο τύπους πληροφοριών: ροές δεδομένων στο DTCH, όπως ιστοσελίδες και μηνύματα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, για τα οποία η αξιοπιστία είναι πιο σημαντική από την ταχύτητα παράδοσης, και μηνύματα σηματοδότησης ειδικά για κινητά στο DCCH. Είναι παρόμοια με την UM, αλλά επίσης αναμεταδίδει οποιαδήποτε πακέτα δεν έχουν φθάσει σωστά στο δέκτη. Η αρχιτεκτονική (Σχήμα 10.7) είναι αμφίδρομη, με την έννοια ότι το ίδιο αντικείμενο αναγνωρισμένης AM χειρίζεται τη μετάδοση και τη λήψη. Υπάρχουν επίσης δύο τύποι PDU: δεδομένα PDUs μεταφέρουν δεδομένα υψηλότερου επιπέδου και μηνύματα σηματοδότησης, και ελέγχουν PDUs που μεταφέρουν πληροφορίες ελέγχου ειδικά για RLC.

Ο πομπός στέλνει πακέτα δεδομένων με ένα παρόμοιο τρόπο με την UM RLC. Αυτή τη φορά, ωστόσο, αποθηκεύει τα μεταδιδόμενα PDUs σε έναν καταχωρητή, μέχρι να μάθει ότι έχουν φθάσει σωστά στο δέκτη. Σε τακτά χρονικά διαστήματα, ο πομπός καθορίζει επίσης ένα *bit* διαδοχικής διερεύνησης σε μια από τις κεφαλίδες δεδομένων PDU. Αυτό λέει στο δέκτη να επιστρέψει ένα είδος ελέγχου PDU, γνωστό ως μια *κατάσταση PDU*, η οποία απαριθμεί τα δεδομένα PDUs που έχει



Σχήμα 10.8 Λειτουργία μετάδοσης, ανακατάκτησης και αναμετάδοσης στην AM RLC.

λάβει και αυτά που έχει χάσει. Σε απάντηση, ο πομπός απορρίπτει τα δεδομένα PDUs που έχουν φτάσει σωστά και αναμεταδίδει αυτά που δεν έχουν.

Υπάρχει ένα πρόβλημα. Εάν ο SINR μειώνεται, τότε το πρωτόκολλο MAC μπορεί να ζητήσει ένα μικρότερο μέγεθος PDU για την αναμετάδοση από ό,τι έκανε πρώτη φορά. Οι PDUs στον καταχωρητή αναμετάδοσης θα είναι πολύ μεγάλοι για αποστολή. Για την επίλυση του προβλήματος, το πρωτόκολλο RLC μπορεί να κόψει μια ήδη μεταδιδόμενη PDU σε μικρότερα τμήματα. Για την υποστήριξη αυτής της διαδικασίας, η επικεφαλίδα δεδομένων PDU περιλαμβάνει επιπλέον πεδία, τα οποία περιγράφουν τη θέση ενός τμήματος αναμετάδοσης μέσα σε ένα ήδη μεταδιδόμενο PDU. Ο δέκτης μπορεί να αναγνωρίσει κάθε τμήμα ξεχωριστά, χρησιμοποιώντας παρόμοια πεδία στην κατάσταση PDU.

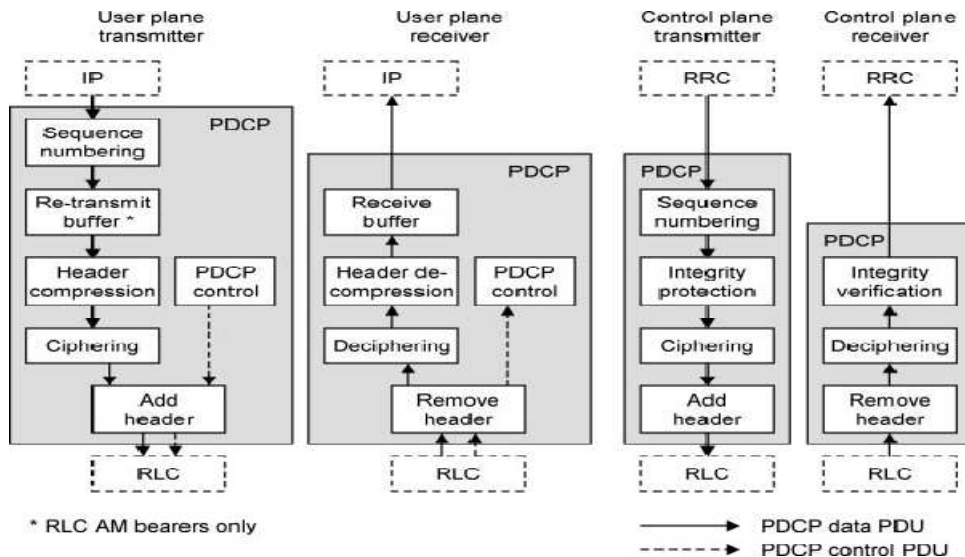
Το Σχήμα 10.8 δείχνει ένα παράδειγμα. Κατά την έναρξη της ακολουθίας, ο πομπός στέλνει τέσσερα δεδομένα PDUs στο δέκτη και σημειώνει το καθένα με έναν αριθμό ακολουθίας. Οι PDUs 1 και 4 φτάνουν σωστά το δέκτη, αλλά οι PDUs 2 και 3 χάνονται. (Για να είμαστε ακριβείς, ο πομπός HARQ φθάνει στο μέγιστο αριθμό των αναμεταδόσεών του, και κινείται προς την επόμενη PDU).

Ο πομπός καθορίζει ένα bit διαδοχικής διερεύνησης στην PDU 4 και ο δέκτης απαντά επιστρέφοντας μια κατάσταση PDU. Ο πομπός μπορεί να αναμεταδώσει την PDU 2, αλλά μια πτώση του SINR σημαίνει ότι η PDU 3 είναι πλέον πολύ μεγάλη. Σε απάντηση, ο πομπός κόβει την PDU 3 σε δύο τμήματα και τα αναμεταδίδει ξεχωριστά. Το πρώτο τμήμα της PDU 3 φτάνει σωστά, αλλά το δεύτερο χάνεται. Απαντώντας σε μια άλλη κατάσταση PDU, ο πομπός μπορεί να απορρίψει το πρώτο τμήμα και μπορεί να αναμεταδώσει το δεύτερο.

10.3 Πρωτόκολλο Σύγκλισης Πακέτων Δεδομένων

10.3.1 Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλου

Το πρωτόκολλο PDCP [8, 9] υποστηρίζει ροές δεδομένων που χρησιμοποιούν AM RLC, εξασφαλίζοντας ότι κανένα από τα πακέτα τους δε χάνεται κατά τη διάρκεια



Σχήμα 10.9 Αρχιτεκτονική του PDCP.

μιας παράδοσης. Επίσης, διαχειρίζεται τρεις λειτουργίες διεπαφής αέρα, δηλαδή συμπίεση κεφαλίδας, κρυπτογράφηση και προστασία ακεραιότητας. Εμείς θα καλύψουμε τη συμπίεση κεφαλίδας εδώ, αφήνοντας την κρυπτογράφηση και την προστασία της ακεραιότητας μέχρι την συζήτηση μας για την ασφάλεια στο Κεφάλαιο 12.

Το PDCP χρησιμοποιείται μόνο από τα κανάλια αποκλειστικής μεταφοράς και ελέγχου, για τα οποία το βασικό πρωτόκολλο RLC λειτουργεί σε UM ή AM. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 10.9, υπάρχουν διαφορετικές αρχιτεκτονικές για τα δεδομένα και τη σηματοδότηση.

Στο επίπεδο χρήστη, ο πομπός λαμβάνει SDUs PDCP με τη μορφή πακέτων IP, προσθέτει έναν αριθμό ακολουθίας PDCP και αποθηκεύει τυχόν πακέτα που χρησιμοποιούν AM RLC σε έναν καταχωρητή αναμετάδοσης. Στη συνέχεια συμπιέζει τις IP κεφαλίδες, κρυπτογραφεί τις πληροφορίες, προσθέτει μια κεφαλίδα PDCP και εξάγει την προκύπτουσα PDU. Ο δέκτης αντιστρέφει τη διαδικασία, αποθηκεύει τα εισερχόμενα πακέτα στον καταχωρητή λήψης και χρησιμοποιεί τον αριθμό ακολουθίας για να τους παραδώσει στη σωστή σειρά, σε υψηλότερα στρώματα.

Στο επίπεδο ελέγχου, τα μηνύματα σηματοδότησης προστατεύονται από μια επιπλέον διαδικασία ασφάλειας, που είναι γνωστή ως προστασία ακεραιότητας. Δεν υπάρχει καταχωρητής αναμετάδοσης, διότι η λειτουργία αναμετάδοσης χρησιμοποιείται μόνο για τα δεδομένα και δεν υπάρχουν IP κεφαλίδες για να συμπίεσει.

10.3.2 Συμπίεση Κεφαλίδας

Οι κεφαλίδες μπορούν να ξαναφτιάξουν ένα μεγάλο ποσοστό ενός αργού ρεύματος

πακέτων δεδομένων. Στην περίπτωση του VoIP, για παράδειγμα, ο κωδικοποιητής στενής ζώνης AMR έχει ένα μέγιστο ρυθμό bit των 12.2 kbps και διάρκεια πακέτου 20 ms, δίνοντας ένα τυπικό μέγεθος πακέτου των 31 bytes [10]. Ωστόσο, η κεφαλίδα τυπικά περιέχει 40 ή 60 bytes, περιλαμβάνοντας 12 bytes από το *πρωτόκολλο πραγματικού χρόνου* (RTP), 8 bytes από το UDP και είτε 20 bytes από την IPv4 είτε 40 bytes από την IPv6. Μια τέτοια επιβάρυνση είναι ακατάλληλη σε όλο το σημείο συμφόρησης της διεπαφής αέρα.

Για την επίλυση του προβλήματος, το PDCP περιλαμβάνει ένα πρωτόκολλο IETF γνωστό ως *ισχυρή συμπίεση κεφαλίδας* (ROHC) [11]. Το κριτήριο είναι ότι ο πομπός στέλνει την πλήρη κεφαλίδα στο πρώτο πακέτο, αλλά στέλνει μόνο διαφορές στα επόμενα πακέτα. Το μεγαλύτερο μέρος της κεφαλίδας παραμένει το ίδιο από το ένα πακέτο στο άλλο, έτσι τα πεδία διαφοράς είναι αρκετά μικρότερα. Το πρωτόκολλο μπορεί να συμπίεσει τις αρχικές 40 και 60 κεφαλίδες byte σε τόσο λίγο όσο 1 και 3 bytes αντιστοίχως, το οποίο μειώνει σημαντικά την επιβάρυνση.

Η ROHC έχει ένα πλεονέκτημα σε σχέση με άλλα πρωτόκολλα συμπίεσης κεφαλίδας, στο ότι είναι σχεδιασμένη να λειτουργεί καλά ακόμη και αν ο βασικός ρυθμός απώλειας πακέτων είναι υψηλός. Αυτό την καθιστά κατάλληλη για μια αναξιόπιστη ζεύξη δεδομένων όπως η διεπαφή αέρα LTE, ιδιαίτερα σε ρεύματα δεδομένων πραγματικού χρόνου, όπως VoIP, που χρησιμοποιούν UM RLC.

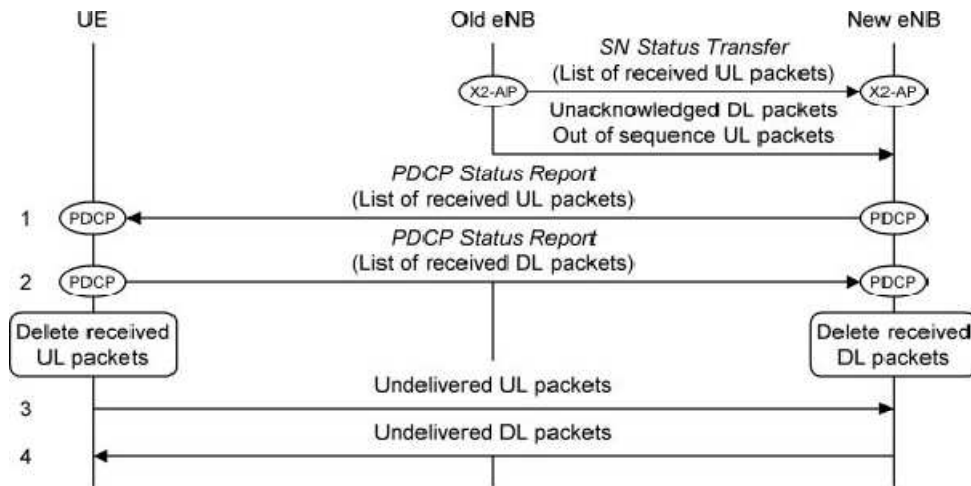
10.3.3 Πρόληψη Απώλειας Πακέτων Κατά Την Μεταπομπή

Κατά τη διαβίβαση ροών δεδομένων που χρησιμοποιούν AM RLC, το PDCP αποθηκεύει κάθε SDU σε έναν καταχωρητή αναμετάδοσης, μέχρι το RLC να του πει ότι η SDU έχει ληφθεί επιτυχώς. Κατά τη διάρκεια μιας μεταπομπής, οι διαδικασίες μετάδοσης και λήψης διακόπτονται στιγμιαία, οπότε υπάρχει ο κίνδυνος της απώλειας πακέτων. Με την ολοκλήρωση της μεταπομπής, το PDCP λύνει το πρόβλημα με την αναμετάδοση τυχόν SDUs που εξακολουθεί να αποθηκεύει.

Υπάρχει, ωστόσο, ένα δευτερεύον πρόβλημα: ορισμένες από αυτές τις SDUs μπορεί στην πραγματικότητα να έχουν φθάσει στο δέκτη, αλλά οι επιβεβαιώσεις μπορεί, αντίθετα, να έχουν χαθεί. Για να τους αποτρέψει από το να μεταδίδονται δύο φορές, το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιήσει μια δεύτερη διαδικασία, γνωστή ως *αναφορά κατάστασης PDCP*. Το Σχήμα 10.10 δείχνει το συνδυασμένο αποτέλεσμα των δύο διαδικασιών. Σημειώστε ότι τα μηνύματα σε αυτό το σχήμα ισχύουν μόνο για φορείς που χρησιμοποιούν AM RLC.

Ως μέρος της διαδικασίας μεταπομπής που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 14, ο παλιός σταθμός βάσης στέλνει στο νέο σταθμό βάσης ένα μήνυμα X2-AP, γνωστό ως *Μεταφορά Κατάστασης SN*, στο οποίο απαριθμεί τους PDCP αριθμούς ακολουθίας που έλαβε στην άνω ζεύξη. Επίσης, προωθεί τυχόν SDUs PDCP κάτω ζεύξης που το κινητό δεν έχει ακόμη αναγνωρίσει, καθώς και κάθε SDUs άνω ζεύξης που έχει λάβει από την ακολουθία.

Ο νέος σταθμός βάσης μπορεί τώρα να στείλει στο κινητό ένα PDCP ελέγχου PDU, γνωστό ως μια *Αναφορά Κατάστασης PDCP* (στάδιο 1), στην οποία απαριθμεί



Σχήμα 10.10 Αναφορά κατάστασης PDCP και πρόληψη απώλειας πακέτων μετά από μια μεταπομπή.

τους αριθμούς ακολουθίας που έχει μόλις λάβει από τον παλιό σταθμό βάσης. Το κινητό μπορεί να τα διαγράψει από τον καταχωρητή αναμετάδοσής του, και πρέπει μόνο να αναμεταδώσει το υπόλοιπο (στάδιο 3). Την ίδια στιγμή, το κινητό μπορεί να στείλει μια Αναφορά Κατάστασης PDCP στο νέο σταθμό βάσης (στάδιο 2), στην οποία απαριθμεί τους αριθμούς ακολουθίας PDCP που έχει λάβει στην κάτω ζεύξη. Ο νέος σταθμός βάσης μπορεί να τους διαγράψει με τον ίδιο τρόπο, πριν από την έναρξη της δικής του αναμετάδοσης (στάδιο 4).

Αναφορές

1. 3GPP TS 36.321 (October 2011) *Medium Access Control (MAC) Protocol Specification*, Release 10.
2. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10, section 6.3.2 (*Logical Channel Config, MAC-Main Config*).
3. 3GPP TS 36.213 (September 2011) *Physical Layer Procedures*, Release 10, section 4.2.3.
4. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10, section 6.3.2 (*Time Alignment Timer*).
5. 3GPP TS 36.133 (October 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for Support of Radio Resource Management*, Release 10, section 9.1.8.
6. 3GPP TS 36.322 (December 2010) *Radio Link Control (RLC) Protocol Specification*, Release 10.
7. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10, section 6.3.2 (*RLC-Config*).
8. 3GPP TS 36.323 (March 2011) *Packet Data Convergence Protocol (PDCP) Specification*, Release 10.
9. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10, section 6.3.2 (*PDCP-Config*).
10. 3GPP TS 26.101 (April 2011) *Mandatory Speech Codec Speech Processing Functions; Adaptive Multi-Rate (AMR) Speech Codec Frame Structure*, Release 10, annex A.
11. IETF RFC 4995 (July 2007) *The RObust Header Compression (ROHC) Framework*.

11

Διαδικασίες Ενεργοποίησης και Απενεργοποίησης

Έχουμε ολοκληρώσει τώρα τη συζήτησή μας για την LTE διεπαφή αέρα. Κατά τη διάρκεια των επόμενων πέντε κεφαλαίων, θα καλύψουμε τις διαδικασίες σηματοδότησης που διέπουν την υψηλού επιπέδου λειτουργία του LTE.

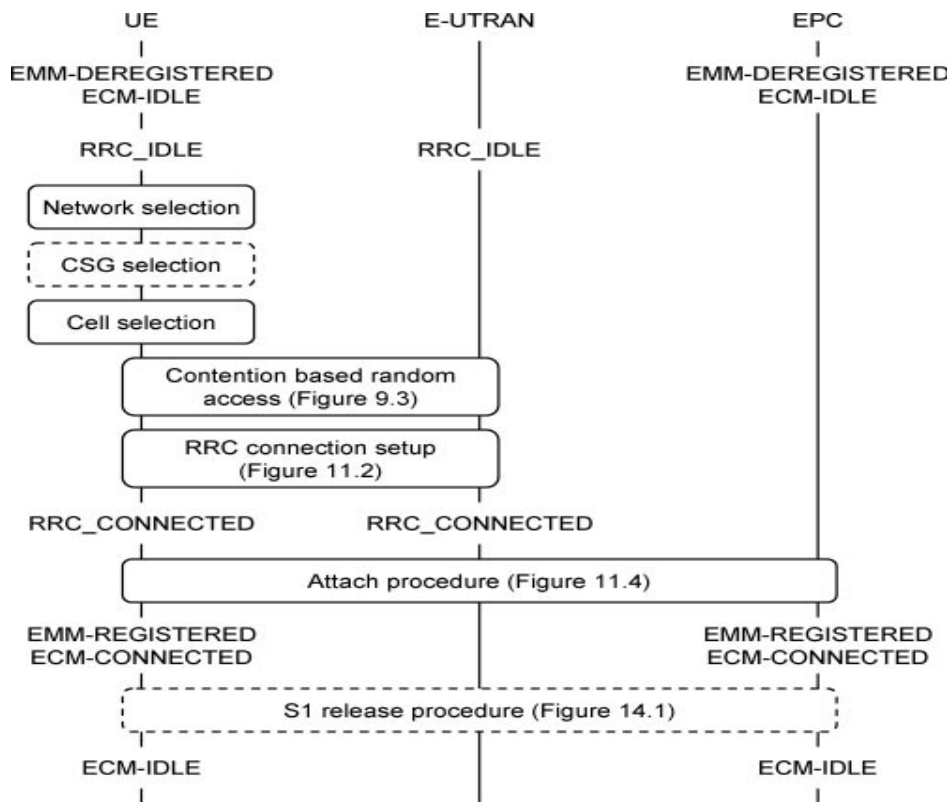
Σε αυτό το κεφάλαιο, περιγράφουμε τις διαδικασίες που ακολουθεί ένα κινητό μόλις ενεργοποιηθεί, για να επιλέξει μια κυψέλη και να καταχωρήσει τη θέση του με το δίκτυο. Θα ξεκινήσουμε επανεξετάζοντας τη διαδικασία σε ένα υψηλό επίπεδο και στη συνέχεια θα συνεχίσουμε με τα τρία βασικά στάδια του δικτύου και της επιλογής κυψέλης, της RRC εγκατάστασης σύνδεσης και της εγγραφής με τον EPC. Μια τελευταία ενότητα περιγράφει τη διαδικασία αποσύνδεσης, μέσω της οποίας το κινητό απενεργοποιείται. Ως μέρος του κεφαλαίου, θα αναφερθούμε σε πολλές από τις διαδικασίες χαμηλού επιπέδου που έχουμε ήδη συναντήσει, ιδίως αυτές για την αναγνώριση κυψέλης και τυχαίας πρόσβασης.

Το δίκτυο και η επιλογή κυψέλης καλύπτονται από δύο προδιαγραφές, οι οποίες περιγράφουν τις διαδικασίες λειτουργίας αδράνειας για τα NAS [1] και AS [2]. Οι διαδικασίες σηματοδότησης στο υπόλοιπο κεφάλαιο συνοψίζονται από τις συνηθισμένες προδιαγραφές του σταδίου 2 για το LTE [3, 4]. Οι αναγνώστες που απαιτούν μεγαλύτερη λεπτομέρεια σχετικά με τις διαδικασίες αυτές μπορούν να τη βρουν ψάχνοντας κάτω από τις σχετικές προδιαγραφές σηματοδότησης του σταδίου 3 [5-9], που καθορίζουν τόσο τις διαδικασίες της κάθε διεπαφής όσο και τα περιεχόμενα του κάθε μηνύματος σηματοδότησης.

11.1 Ακολουθία Ενεργοποίησης

Το Σχήμα 11.1 συνοψίζει τις διαδικασίες που ακολουθεί το κινητό μόλις ενεργοποιηθεί. Το κινητό ξεκινάει εκτελώντας τη διαδικασία για την επιλογή δικτύου και κυψέλης, η οποία έχει τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο, το κινητό επιλέγει ένα PLMN με το οποίο θα εγγραφεί. Στο δεύτερο στάδιο, το κινητό μπορεί προαιρετικά να ζητήσει από το χρήστη να επιλέξει μια CSG για εγγραφή. Στο τρίτο, το κινητό επιλέγει μια κυψέλη που ανήκει στο επιλεγμένο δίκτυο και εάν είναι απαραίτητο, με την επιλεγμένη CSG. Με αυτό τον τρόπο, λέγεται να *κατασκηνώσει* στην κυψέλη.

Το κινητό, στη συνέχεια, έρχεται σε επαφή με τον αντίστοιχο σταθμό βάσης χρησιμοποιώντας τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης contention based από το Κεφάλαιο 9 και κινεί τη διαδικασία για την εγκατάσταση σύνδεσης RRC. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας RRC, το κινητό καθιερώνει μια σύνδεση σηματοδότησης με τον επιλεγμένο σταθμό βάσης, ρυθμίζει τον κομιστή 1 ασύρματης σηματοδότησης και μετακινείται από το RRC_IDLE στο RRC_CONNECTED. Αποκτά επίσης, ένα σύνολο παραμέτρων μέσω του οποίου να μπορεί να επικοινωνεί με το σταθμό βάσης,



Σχήμα 11.1 Επισκόπηση των διαδικασιών ενεργοποίησης του κινητού.

όπως ένα σύνολο πόρων για τη μετάδοση UCI στο PUCCH.

Στο τελευταίο στάδιο, το κινητό χρησιμοποιεί τη διαδικασία επισύναψης για να επικοινωνήσει με τον EPC. Ως αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, το κινητό καταχωρεί τη θέση του με έναν MME και κινείται προς τις καταστάσεις EMM-REGISTERED και ECM-CONNECTED. Διαμορφώνει επίσης τη σηματοδότηση ασύρματου φορέα 2, αποκτά μια διεύθυνση IP και καθιερώνει έναν προεπιλεγμένο φορέα μέσω του οποίου μπορεί να επικοινωνεί με τον έξω κόσμο.

Το κινητό βρίσκεται τώρα στις καταστάσεις EMM-REGISTERED, ECM-CONNECTED και RRC_CONNECTED, και θα παραμείνει σε αυτές τις καταστάσεις για όσο χρονικό διάστημα ανταλλάσσει δεδομένα με το δίκτυο. Εάν ο χρήστης δεν κάνει τίποτα, τότε το δίκτυο μπορεί να μεταφέρει το κινητό στις ECM-IDLE και RRC_IDLE, χρησιμοποιώντας μια διαδικασία γνωστή ως έκδοση S1, η οποία καλύπτεται στο Κεφάλαιο 14.

11.2 Επιλογή Δικτύου και Κυψέλης

11.2.1 Επιλογή Δικτύου

Στη διαδικασία επιλογής δικτύου [10-12], το κινητό επιλέγει ένα PLMN, με το οποίο θα εγγραφεί. Για να ξεκινήσει η διαδικασία, ο ME διερωτά τον USIM και ανακτά την

GUTI που χρησιμοποιούσε όταν ενεργοποιήθηκε τελευταία, καθώς και την TAI στην οποία είχε καταχωρηθεί. Από αυτές τις ποσότητες, μπορεί να προσδιορίσει το αντίστοιχο δίκτυο, το οποίο είναι γνωστό ως το *εγγεγραμμένο PLMN*. Το κινητό εκτελεί το CSG και τις διαδικασίες επιλογής κυψέλης που περιγράφονται παρακάτω, με την ελπίδα της εύρεσης κατάλληλης κυψέλης που ανήκει στο εγγεγραμμένο PLMN.

Αν το κινητό δε μπορεί να βρει το εγγεγραμμένο PLMN, τότε σαρώνει όλες τις LTE φέρουσες συχνότητες που υποστηρίζει και προσδιορίζει τα δίκτυα που μπορεί πραγματικά να βρει. Για να γίνει αυτό, το κινητό χρησιμοποιεί τη διαδικασία αναγνώρισης από το Κεφάλαιο 7 για να βρει την ισχυρότερη LTE κυψέλη σε κάθε συχνότητα, διαβάζει τη SIB 1 από τις πληροφορίες του συστήματος και προσδιορίζει το δίκτυο ή τα δίκτυα που ανήκει η κυψέλη. Αν το κινητό επίσης υποστηρίζει UMTS, GSM και cdma2000, τότε εκτελεί μια παρόμοια διαδικασία για να βρει δίκτυα που χρησιμοποιούν αυτές τις τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης.

Υπάρχουν τότε, δύο τρόποι λειτουργίας επιλογής δικτύου, ο αυτόματος και ο χειροκίνητος. Στον *αυτόματο τρόπο λειτουργίας*, το κινητό λειτουργεί με σειρά προτεραιότητας μέσα από μια λίστα δικτύων που θα πρέπει να αντιμετωπίζει σαν οικείους PLMNs, μαζί με μια σχετική λίστα τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης. (Αυτές οι λίστες είναι και οι δύο αποθηκευμένες στον USIM). Όταν συναντά ένα δίκτυο που έχει βρει στο παρελθόν, το κινητό εκτελεί τη CSG και τις διαδικασίες επιλογής κυψέλης με τον τρόπο που περιγράφεται παρακάτω.

Αν το κινητό δε μπορεί να βρει έναν οικείο PLMN, τότε επαναλαμβάνει τη διαδικασία χρησιμοποιώντας πρώτα κάθε λίστα των δικτύων και των τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης καθορισμένων από το χρήστη, και στη συνέχεια κάθε λίστα που ορίζεται από το χειριστή. Εάν δεν μπορεί να βρει κάποιο από αυτά τα δίκτυα, τότε το κινητό προσπαθεί να επιλέξει μια κυψέλη από οποιοδήποτε δίκτυο είναι διαθέσιμο. Σε αυτή την τελευταία περίπτωση, εισέρχεται σε μια περιορισμένη κατάσταση υπηρεσίας, στην οποία μπορεί να κάνει μόνο κλήσεις έκτακτης ανάγκης και να λαμβάνει προειδοποιήσεις από το ETWS.

Στον *χειροκίνητο τρόπο λειτουργίας*, το κινητό παρουσιάζει τον χρήστη με τη λίστα δικτύων που έχει βρεθεί, χρησιμοποιώντας την ίδια σειρά προτεραιότητας όπως στον αυτόματο τρόπο λειτουργίας. Ο χρήστης επιλέγει ένα προτιμώμενο δίκτυο και το κινητό προχωρά στις διαδικασίες CSG και επιλογής κυψέλης, όπως πριν.

11.2.2 Επιλογή Κλειστής Ομάδας Συνδρομητή

Ένας κεντρικός σταθμός βάσης είναι ένας σταθμός βάσης που ελέγχει ένα femtocell, το οποίο μπορεί να επιλεγεί μόνο από εγγεγραμμένους συνδρομητές. Για την υποστήριξη αυτού του περιορισμού, ο σταθμός βάσης συνδέεται με μια CSG και ένα όνομα HeNB, τα οποία κοινοποιεί στα SIB 1 και SIB 9 αντίστοιχα. Κάθε USIM παραθέτει τυχόν CSG που ο συνδρομητής επιτρέπεται να χρησιμοποιήσει [13], μαζί με τις ταυτότητες των αντίστοιχων δικτύων.

Αν ο USIM περιέχει τυχόν CSG, τότε το κινητό θα πρέπει να εκτελέσει μια

πρόσθετη διαδικασία, γνωστή ως *επιλογή CSG* [14, 15]. Η διαδικασία έχει δύο τρόπους λειτουργίας, αυτόματο και χειροκίνητο, οι οποίοι είναι διαφορετικοί από τους τρόπους λειτουργίας επιλογής δικτύου που περιγράφονται παραπάνω. Στον *αυτόματο τρόπο λειτουργίας*, το κινητό στέλνει τον κατάλογο των επιτρεπόμενων CSG με τη διαδικασία επιλογής κυψέλης, η οποία επιλέγει είτε μια κυψέλη non-CSG, είτε μια κυψέλη της οποίας η CSG είναι στη λίστα. Ο *χειροκίνητος τρόπος λειτουργίας* είναι πιο περιοριστικός. Εδώ, το κινητό αναγνωρίζει τις κυψέλες CSG που μπορεί να βρει στο επιλεγμένο δίκτυο. Παρουσιάζει τη λίστα αυτή στο χρήστη, υποδεικνύει τα αντίστοιχα ονόματα HeNB και δείχνει αν κάθε CSG είναι στη λίστα των επιτρεπόμενων CSGs. Ο χρήστης επιλέγει μια προτιμώμενη CSG και το κινητό επιλέγει μια κυψέλη που ανήκει σε αυτή τη CSG.

11.2.3 Επιλογή Κυψέλης

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας *επιλογής κυψέλης* [16], το κινητό επιλέγει μια *κατάλληλη κυψέλη* που ανήκει στο επιλεγμένο δίκτυο και, εάν είναι απαραίτητο, στην επιλεγμένη CSG. Αυτό μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Συνήθως, έχει πρόσβαση σε αποθηκευμένες πληροφορίες σχετικά με πιθανές LTE φέρουσες συχνότητες και κυψέλες, είτε από όταν ήταν τελευταία ενεργοποιημένο, είτε από τη διαδικασία επιλογής δικτύου που περιγράφεται παραπάνω. Εάν αυτή η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη, τότε το κινητό σαρώνει όλες τις φέρουσες συχνότητες LTE που υποστηρίζει και προσδιορίζει την ισχυρότερη κυψέλη σε κάθε φορέα που ανήκει στο επιλεγμένο δίκτυο.

Μια κατάλληλη κυψέλη είναι μια κυψέλη που ικανοποιεί διάφορα κριτήρια. Το πιο σημαντικό είναι το κριτήριο επιλογής κυψέλης:

$$S_{\text{rxlev}} > 0 \quad (11.1)$$

Κατά την αρχική επιλογή δικτύου, το κινητό υπολογίζει το S_{rxlev} ως ακολούθως:

$$S_{\text{rxlev}} = Q_{\text{rxlevmeas}} - Q_{\text{rxlevmin}} - P_{\text{compensation}} \quad (11.2)$$

Σε αυτή την εξίσωση, $Q_{\text{rxlevmeas}}$ είναι η *λαμβανόμενη ισχύς σήματος αναφοράς* (RSRP) της κυψέλης, η οποία είναι η μέση ισχύς ανά RE που λαμβάνει το κινητό στα RS [17]. Q_{rxlevmin} είναι μια ελάχιστη τιμή για το RSRP, την οποία κοινοποιεί ο σταθμός βάσης στη SIB 1. Οι ποσότητες αυτές εξασφαλίζουν ότι το κινητό θα επιλέξει μόνο την κυψέλη αν μπορεί να ακούσει τις μεταδόσεις του σταθμού βάσης στην κάτω ζεύξη. Η τελευταία παράμετρος, $P_{\text{compensation}}$, υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{\text{compensation}} = \max(P_{\text{EMAX}} - P_{\text{PowerClass}}, 0) \quad (11.3)$$

Εδώ, P_{EMAX} είναι ένα ανώτερο όριο της ισχύος εκπομπής που ένα κινητό έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει, το οποίο ο σταθμός βάσης κοινοποιεί ως μέρος

της SIB 1. $P_{\text{PowerClass}}$ είναι η εγγενής μέγιστη ισχύς του κινητού. Με το συνδυασμό αυτών των ποσοτήτων, το $P_{\text{compensation}}$ μειώνει την αξία του S_{rxlev} αν το κινητό δε μπορεί να φθάσει το όριο ισχύος που αναλαμβάνει ο σταθμός βάσης. Εξασφαλίζει, συνεπώς, ότι ένα κινητό θα επιλέξει μόνο την κυψέλη αν ο σταθμός βάσης μπορεί να την ακούσει, στην άνω ζεύξη.

Η διαδικασία επιλογής κυψέλης ενισχύεται στην έκδοση 9 των 3GPP προδιαγραφών, έτσι ώστε μια κατάλληλη κυψέλη πρέπει επίσης να ικανοποιεί το ακόλουθο κριτήριο:

$$S_{\text{qual}} > 0 \quad (11.4)$$

όπου,

$$S_{\text{qual}} = Q_{\text{qualmeas}} - Q_{\text{qualmin}} \quad (11.5)$$

Σε αυτή την εξίσωση, Q_{qualmeas} είναι η *λαμβανόμενη ποιότητα σήματος αναφοράς* (RSRQ), η οποία είναι ο SINR των RS. Q_{qualmin} είναι μια ελάχιστη τιμή για το RSRQ, την οποία κοινοποιεί ο σταθμός βάσης στη SIB 1 όπως πριν. Αυτή η κατάσταση εμποδίζει ένα κινητό από την επιλογή μιας κυψέλης σε μια φέρουσα συχνότητα που υπόκειται σε υψηλά επίπεδα παρεμβολών.

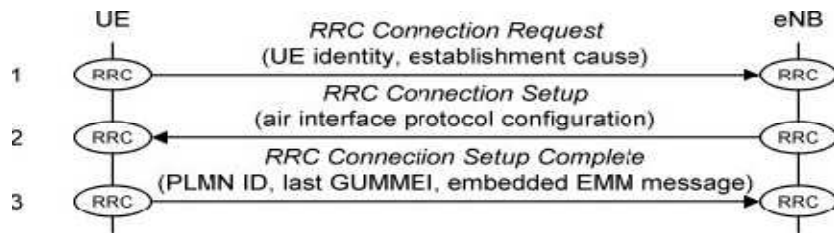
Μια κατάλληλη κυψέλη πρέπει επίσης να ικανοποιεί μια σειρά από άλλα κριτήρια. Αν ο USIM περιέχει μια λίστα CSG, τότε η κυψέλη θα πρέπει να πληροί τα κριτήρια για την αυτόματη ή χειροκίνητη επιλογή CSG που ορίζεται παραπάνω. Αν ο USIM δεν το κάνει, τότε η κυψέλη πρέπει να βρίσκεται έξω από οποιοσδήποτε CSG. Επιπλέον, ο φορέας εκμετάλλευσης δικτύου μπορεί να αποκλείσει μια κυψέλη σε όλους τους χρήστες ή να την κρατήσει για χρήση χειριστή, μέσω των σημαιών στη SIB 1.

11.3 Εγκατάσταση Σύνδεσης RRC

11.3.1 Βασική Διαδικασία

Όταν το κινητό έχει επιλέξει ένα δίκτυο και μια κυψέλη για να κατασκηνώσει, εκτελεί τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης contention based από το Κεφάλαιο 9. Με τον τρόπο αυτό, αποκτά ένα C-RNTI, μία αρχική τιμή για την προήγηση χρόνου και πόρους για το PUSCH μέσω του οποίου μπορεί να στείλει ένα μήνυμα στο δίκτυο.

Το κινητό μπορεί στη συνέχεια να αρχίσει μια διαδικασία γνωστή ως *εγκατάσταση σύνδεσης RRC* [18]. Το Σχήμα 11.2 δείχνει την ακολουθία μηνύματος. Στο στάδιο 1, το RRC πρωτόκολλο του κινητού συνθέτει ένα μήνυμα γνωστό ως *Αίτημα Σύνδεσης RRC*. Σε αυτό το μήνυμα, προσδιορίζει δύο παραμέτρους. Η πρώτη είναι μια μοναδική ταυτότητα NAS, είτε το STMSI (αν το κινητό έχει καταχωρηθεί στην περιοχή εντοπισμού της κυψέλης, όταν ενεργοποιήθηκε τελευταία), είτε μια τυχαία επιλεγμένη τιμή (διαφορετικά). Η δεύτερη είναι η αιτία εγκατάστασης, η



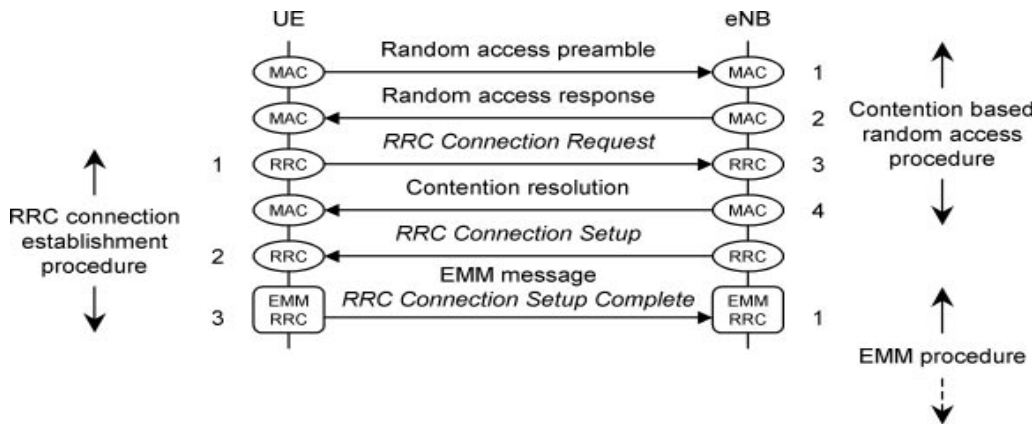
Σχήμα 11.2 Διαδικασία εγκατάστασης σύνδεσης RRC. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI.

οποία μπορεί να είναι σηματοδότηση προερχόμενη από κινητό (όπως σε αυτό το παράδειγμα), δεδομένα που προήλθαν από κινητό, πρόσβαση τερματισμού κινητού (για απάντηση στην αναζήτηση), πρόσβαση υψηλής προτεραιότητας ή μια κλήση έκτακτης ανάγκης.

Το κινητό μεταδίδει το μήνυμα χρησιμοποιώντας το φορέα 0 ασύρματης σηματοδότησης, ο οποίος έχει μια απλή διαμόρφωση που ο σταθμός βάσης κοινοποιεί στο SIB 2. Το μήνυμα αποστέλλεται στο CCCH, το UL-SCH και το PUSCH.

Ο σταθμός βάσης διαβάζει το μήνυμα, αναλαμβάνει το ρόλο του eNB εξυπηρέτησης και συνθέτει μια απάντηση γνωστή ως *Εγκατάσταση Σύνδεσης RRC* (στάδιο 2). Σε αυτό το μήνυμα, διαμορφώνει το φυσικό στρώμα και τα MAC πρωτόκολλα του κινητού, καθώς και τη SRB 1. Αυτές οι ρυθμίσεις περιλαμβάνουν διάφορες παραμέτρους που έχουμε ήδη δει. Για παράδειγμα, οι παράμετροι φυσικού επιπέδου περιλαμβάνουν τους PUCCH πόρους $n_{\text{PUCCH.SRI}}^{(1)}$ και $n_{\text{PUCCH}}^{(2)}$, τον τρόπο αναφοράς CQI και τις προσωρινές ταυτότητες ασύρματου δικτύου TPC-PUCCH-RNTI και TPC-PUSCH-RNTI. Παρομοίως, οι παράμετροι MAC περιλαμβάνουν το χρονοδιακόπτη ευθυγράμμισης, το χρονοδιακόπτη για περιοδικές BSR και το μέγιστο αριθμό μεταδόσεων HARQ στην άνω ζεύξη. Τέλος, οι παράμετροι για τη SRB 1 περιλαμβάνουν τις προτεραιότητες και τους PBR των αντίστοιχων λογικών καναλιών και οι παράμετροι που διέπουν δημοσκόπηση και αναφορά κατάστασης στο RLC. Για να μειωθεί το μέγεθος του μηνύματος, ο σταθμός βάσης μπορεί να ρυθμίσει διάφορες παραμέτρους στις προεπιλεγμένες τιμές που ορίζονται στις προδιαγραφές. Ο σταθμός βάσης μεταδίδει το μήνυμά του για SRB 0, όπως και πριν, επειδή το κινητό δεν κατανοεί ακόμα τη διαμόρφωση της SRB 1.

Το κινητό διαβάζει το μήνυμα, ρυθμίζει τα πρωτόκολλά του με τον τρόπο που απαιτείται και κινείται σε RRC_CONNECTED. Στη συνέχεια γράφει ένα μήνυμα επιβεβαίωσης γνωστό ως *Πλήρης Εγκατάσταση Σύνδεσης RRC* (στάδιο 3) και το μεταδίδει στην SRB 1. Στο μήνυμα, το κινητό περιλαμβάνει τρία στοιχεία πληροφοριών. Το πρώτο προσδιορίζει το PLMN με το οποίο θα ήθελε να εγγραφεί. Το δεύτερο είναι η παγκοσμίως μοναδική ταυτότητα του MME που εξυπηρετούσε προηγουμένως το κινητό, την οποία το κινητό έχει αποσπάσει από το GUTI του. Το τρίτο είναι ένα ενσωματωμένο μήνυμα EMM, το οποίο στο παράδειγμα αυτό είναι ένα αίτημα απόδοσης, αλλά μπορεί επίσης να είναι ένα αίτημα αποσύνδεσης, ένα αίτημα εξυπηρέτησης ή ένα αίτημα περιοχής εντοπισμού άνω ζεύξης.



Σχήμα 11.3 Σχέσεις μεταξύ εγκατάστασης σύνδεσης RRC και άλλων διαδικασιών

Η διαδικασία εγκατάστασης σύνδεσης RRC χρησιμοποιείται επίσης αργότερα, κάθε φορά που ένα κινητό στην RRC_IDLE επιθυμεί να επικοινωνήσει με το δίκτυο. Θα δούμε μερικά παραδείγματα στα κεφάλαια που ακολουθούν.

11.3.2 Σχέση με Άλλες Διαδικασίες

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.3, η διαδικασία εγκατάστασης σύνδεσης RRC, συμπίπτει με δύο άλλες διαδικασίες, δηλαδή τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης που προηγείται αυτής και τη διαδικασία EMM που ακολουθεί.

Το κινητό στέλνει το RRC Αίτημα Σύνδεσής του στο τρίτο στάδιο της διαδικασίας τυχαίας πρόσβασης contention based. Ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί συνεπώς το μήνυμα με δύο τρόπους: μεταβιβάζει το μήνυμα κατά τη διάρκεια απόφασης ισχυρισμού και απαντάει στο μήνυμα με την RRC Εγκατάσταση Σύνδεσής του. Ομοίως, το μήνυμα Ολοκλήρωσης Εγκατάστασης Σύνδεσης RRC είναι επίσης το πρώτο στάδιο της διαδικασίας EMM, που ακολουθεί. Ο σταθμός βάσης αποδέχεται το μήνυμα RRC ως μια επιβεβαίωση της RRC Εγκατάστασης Σύνδεσής του και προωθεί το ενσωματωμένο μήνυμα EMM σε μια κατάλληλη MME. Επικαλύπτοντας τις διαδικασίες, καθιστά πιο δύσκολο να παρακολουθεί τι συμβαίνει, αλλά φέρνει ένα μεγάλο πλεονέκτημα: κάνει τις καθυστερήσεις σηματοδότησης χαμηλότερες σε σχέση με προηγούμενα συστήματα, το οποίο βοηθά το σύστημα να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις λανθάνουσας κατάστασης που συγκεντρώθηκαν στο Κεφάλαιο 1.

Υπάρχει ένα τελευταίο σημείο να φτιάξουμε. Στα Σχήματα 11.2 και 11.3, έχουμε δείξει μόνο τα υψηλού επιπέδου μηνύματα σηματοδοσίας που μεταδίδονται στα PUSCH και PDSCH. Έχουμε παραλείψει τις πληροφορίες ελέγχου χαμηλότερου επιπέδου στα PUCCH, PDCCH και PHICH, καθώς και τη δυνατότητα των αναμεταδόσεων. Θα ακολουθήσετε αυτή τη σύμβαση σε όλο το υπόλοιπο του βιβλίου, αλλά αξίζει να θυμηθούμε ότι η πλήρης ακολουθία των μηνυμάτων διεπαφής αέρα μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από ό,τι υποδηλώνουν τα προκύπτοντα στοιχεία.

11.4 Διαδικασία Σύνδεσης

11.4.1 Κατανομή Διεύθυνσης IP

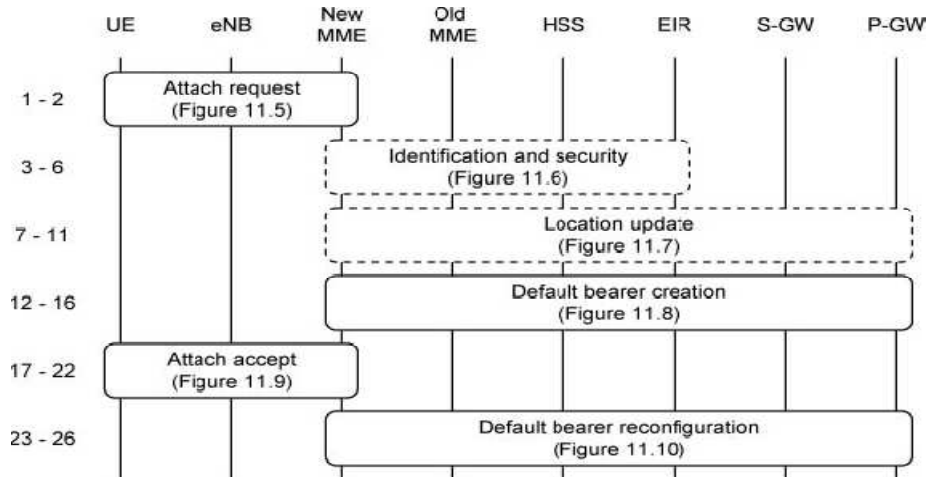
Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σύνδεσης, το κινητό αποκτά μια διεύθυνση IPv4 και / ή μια διεύθυνση IPv6, τις οποίες στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσει για να επικοινωνήσει με τον έξω κόσμο. Πριν εξετάσουμε την απόδοση της ίδιας της διαδικασίας, είναι χρήσιμο να συζητήσουμε τις μεθόδους που μπορεί να χρησιμοποιήσει το δίκτυο για την κατανομή διευθύνσεων IP [19].

Οι διευθύνσεις IPv4 είναι 32 bits. Κατά τη συνηθισμένη τεχνική, η πύλη PDN διαθέτει μια δυναμική διεύθυνση IPv4 στο κινητό, ως μέρος της διαδικασίας απόδοσης. Μπορεί είτε να διαθέσει τη διεύθυνση IP από μόνη της, είτε να αποκτήσει μια κατάλληλη διεύθυνση IP από έναν εξυπηρετητή *dynamic host configuration protocol version 4* (DHCPv4). Ως εναλλακτική λύση, το κινητό μπορεί να χρησιμοποιήσει τον ίδιο DHCPv4 για να αποκτήσει μια δυναμική διεύθυνση IP, μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία απόδοσης. Για να το κάνει αυτό, έρχεται σε επαφή με την πύλη PDN πάνω από το επίπεδο του χρήστη, με την πύλη PDN να ενεργεί ως εξυπηρετητής DHCPv4 προς το κινητό. Όπως και πριν, η πύλη PDN μπορεί να αποκτήσει μια κατάλληλη διεύθυνση IP από κάπου αλλού, ενεργώντας ως πελάτης DHCPv4 προς έναν άλλο εξυπηρετητή DHCPv4.

Οι IPv6 διευθύνσεις είναι 128 bits και έχουν δύο μέρη, δηλαδή ένα πρόθεμα δικτύου 64 bit και ένα αναγνωριστικό διεπαφής 64 bit. Διατίθενται χρησιμοποιώντας μια διαδικασία, γνωστή ως *IPv6 stateless address auto-configuration* [20]. Στην εφαρμογή LTE της διαδικασίας, η πύλη PDN εκχωρεί στο κινητό ένα παγκοσμίως μοναδικό IPv6 πρόθεμα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας απόδοσης, καθώς και ένα προσωρινό αναγνωριστικό διεπαφής. Επιστρέφει το αναγνωριστικό διεπαφής στο κινητό, το οποίο το χρησιμοποιεί για να κατασκευάσει μια προσωρινή σύνδεση τοπικής διεύθυνσης IPv6. Μόλις η διαδικασία απόδοσης έχει ολοκληρωθεί, το κινητό χρησιμοποιεί την προσωρινή διεύθυνση για να επικοινωνήσει με την πύλη PDN πάνω από το επίπεδο χρήστη και να ανακτήσει το IPv6 πρόθεμα, σε μια διεργασία γνωστή ως *router solicitation*. Στη συνέχεια χρησιμοποιεί το πρόθεμα για την κατασκευή μιας πλήρους IPv6 διεύθυνσης. Επειδή το πρόθεμα είναι παγκοσμίως μοναδικό, το κινητό μπορεί πράγματι να το κάνει αυτό χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε ID διεπαφής θέλει.

Ένα κινητό μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει μια στατική διεύθυνση IPv4 ή ένα πρόθεμα IPv6. Το κινητό δεν τα αποθηκεύει μόνιμα, ωστόσο: αντ' αυτού, το δίκτυο τα αποθηκεύει στον HSS ή σε έναν εξυπηρετητή DHCP και τα στέλνει στο κινητό κατά τη διάρκεια της διαδικασίας απόδοσης. Οι στατικές IP διευθύνσεις είναι ασυνήθιστες στην περίπτωση του IPv4, λόγω της χρόνιας έλλειψης διευθύνσεων IPv4.

Ακολούθως, το κινητό θα χρησιμοποιεί την ίδια διεύθυνση IP για οποιουσδήποτε αποκλειστικούς φορείς δημιουργεί με το ίδιο δίκτυο πακέτων δεδομένων. Αν δημιουργήσει επικοινωνίες με άλλο δίκτυο πακέτων δεδομένων, τότε θα αποκτήσει μια άλλη διεύθυνση IP χρησιμοποιώντας την ίδια τεχνική.



Σχήμα 11.4 Επισκόπηση της διαδικασίας επισύναψης.

11.4.2 Επισκόπηση της Διαδικασίας Επισύναψης

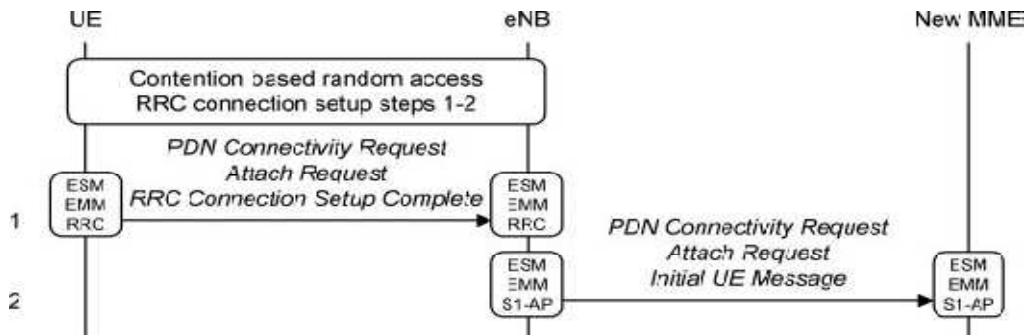
Η διαδικασία επισύναψης έχει τέσσερις κύριους στόχους. Το κινητό χρησιμοποιεί τη διαδικασία για να καταχωρήσει τη θέση του με έναν MME εξυπηρέτησης. Το δίκτυο ρυθμίζει τη σηματοδότηση ασύρματου φορέα 2, ο οποίος στη συνέχεια μεταφέρει μηνύματα σηματοδότησης NAS σε όλη τη διεπαφή αέρα. Το δίκτυο δίνει επίσης στο κινητό μια διεύθυνση IPv4 και / ή μια διεύθυνση IPv6, χρησιμοποιώντας τη μια ή και τις δύο από τις τεχνικές που περιγράφονται παραπάνω, και δημιουργεί έναν προεπιλεγμένο φορέα EPS, ο οποίος προμηθεύει το κινητό με συνεχή συνδεσιμότητα σε μια PDN προεπιλογή.

Το Σχήμα 11.4 συνοψίζει τη διαδικασία επισύναψης. Θα εξετάσουμε γρήγορα τα επιμέρους στάδια της διαδικασίας στις ακόλουθες ενότητες, για την περίπτωση όπου η διεπαφή S5/S8 χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο σηράγωσης GPRS (GTP). Σε αυτό το σχήμα και σε αυτά που ακολουθούν, οι συνεχείς γραμμές δείχνουν υποχρεωτικά μηνύματα, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές υποδεικνύουν τα μηνύματα που είναι προαιρετικά ή υπό όρους. Οι αριθμοί μηνύματος είναι οι ίδιοι όπως στο TS 23.401 [21], μια σύμβαση που θα ακολουθήσουμε για τις περισσότερες από τις άλλες διαδικασίες στο βιβλίο.

11.4.3 Αίτημα Επισύναψης

Το Σχήμα 11.5 δείχνει τα πρώτα δύο στάδια της διαδικασίας, που καλύπτουν το αίτημα επισύναψης του κινητού. Το κινητό ξεκινά εκτελώντας τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης contention based και τα δύο πρώτα στάδια της εγκατάστασης σύνδεσης RRC, με τον τρόπο που περιγράφηκε προηγουμένως.

Το κινητό, στη συνέχεια, συνθέτει ένα μήνυμα ESM, *Αίτημα Συνδεσιμότητας PDN*, το οποίο ζητά από το δίκτυο να δημιουργήσει έναν προεπιλεγμένο φορέα EPS. Το μήνυμα περιλαμβάνει έναν τύπο PDN, ο οποίος δείχνει αν το κινητό υποστηρίζει



Σχήμα 11.5 Διαδικασία επισύναψης. (1) Αίτημα επισύναψης. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI.

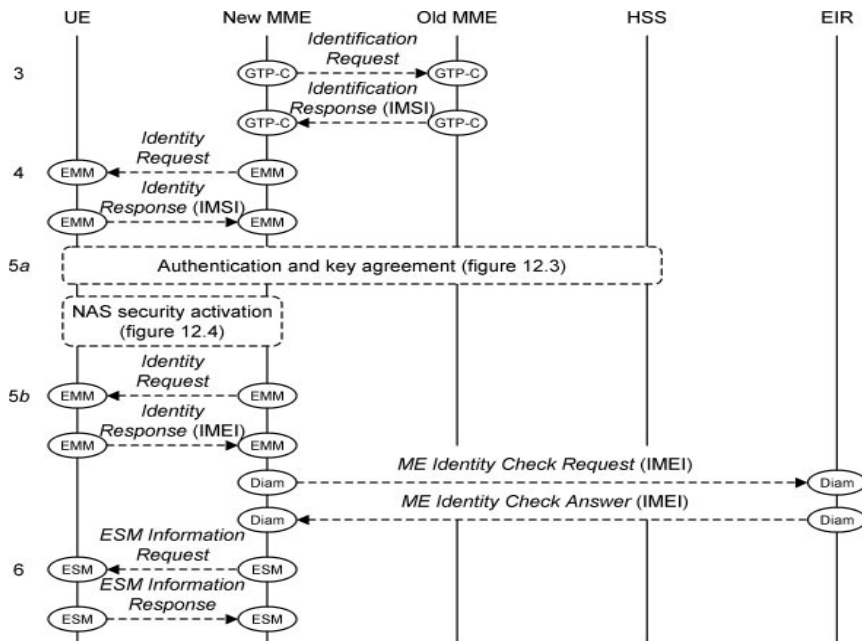
το IPv4, το IPv6 ή και τα δύο. Μπορεί επίσης να περιλαμβάνει μια σειρά από επιλογές διαμόρφωσης πρωτοκόλλου, που απαριθμούν τυχόν παραμέτρους που σχετίζονται με το εξωτερικό δίκτυο, όπως ένα προτιμώμενο APN, ή ένα αίτημα για να λάβει μια διεύθυνση IPv4 πάνω από το επίπεδο χρήστη μέσω DHCPv4. Το κινητό μπορεί είτε να απαριθμήσει τις επιλογές διαμόρφωσής του εδώ είτε να ορίσει μια σημαία μεταφοράς ESM πληροφορίας, γεγονός που δείχνει μια επιθυμία να στείλει τις επιλογές με ασφάλεια αργότερα, μετά την ενεργοποίηση ασφαλείας. Το κινητό χρησιμοποιεί πάντα την τελευταία επιλογή εάν επιθυμεί να υποδείξει ένα προτιμώμενο APN.

Το κινητό ενσωματώνει το PDN αίτημα συνδεσιμότητας σε ένα EMM *Αίτημα Επισύναψης*, με το οποίο ζητάει την καταχώρηση με έναν MME εξυπηρέτησης. Το μήνυμα περιλαμβάνει το GUTI που χρησιμοποιούσε το κινητό όταν ενεργοποιήθηκε τελευταία και την ταυτότητα της περιοχής εντοπισμού στην οποία το κινητό βρίσκεται τελευταία. Περιλαμβάνει επίσης τις δυνατότητες NAS του κινητού, κυρίως τους αλγόριθμους ασφαλείας που υποστηρίζει.

Με τη σειρά του, το κινητό ενσωματώνει το Αίτημα Επισύναψης στο τελευταίο μήνυμα από τη διαδικασία εγκατάστασης της σύνδεσης RRC, την Ολοκλήρωση Ρύθμισης Σύνδεσης RRC. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, το μήνυμα RRC προσδιορίζει επίσης το PLMN με το οποίο το κινητό θα ήθελε να εγγραφεί και την ταυτότητα της τελευταίας MME εξυπηρέτησής του. Στο στάδιο 1 της διαδικασίας επισύναψης, το κινητό στέλνει αυτό το μήνυμα στον eNB εξυπηρέτησης.

Όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 12, το κινητό και ο MME μπορούν να αποθηκεύσουν τα LTE κλειδιά ασφαλείας τους μετά την απενεργοποίηση του κινητού. Αν το κινητό έχει ένα έγκυρο σύνολο κλειδιών ασφαλείας, τότε τα χρησιμοποιεί για να εξασφαλίσει τη διαδικασία επισύναψης χρησιμοποιώντας μια διεργασία, γνωστή ως προστασία ακεραιότητας. Αυτό εξασφαλίζει στον MME ότι αίτημα προέρχεται από ένα γνήσιο κινητό, και όχι από έναν εισβολέα.

Ο σταθμός βάσης εξάγει τα μηνύματα EMM και ESM και τα ενσωματώνει σε ένα S1-AP *Αρχικό Μήνυμα UE*, το οποίο ζητά τη δημιουργία μιας S1 σύνδεσης σηματοδότησης για το κινητό. Ως μέρος αυτού του μηνύματος, ο σταθμός βάσης προσδιορίζει την αιτία δημιουργίας RRC και της αιτούμενης PLMN, η οποία λαμβάνεται από το κινητό κατά τη διάρκεια της RRC διαδικασίας.



Σχήμα 11.6 Διαδικασία επισύναψης. (2) Διαδικασίες εξακρίβωσης και ασφάλειας. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI.

Ο σταθμός βάσης μπορεί να διαβιβάσει τώρα το μήνυμα σε ένα κατάλληλο MME (στάδιο 2). Συνήθως, ο επιλεγμένος MME είναι ο ίδιος με εκείνον που το κινητό ήταν προηγουμένως εγγεγραμμένο. Αυτό μπορεί να γίνει αν πληρούνται δύο προϋποθέσεις: ο σταθμός βάσης πρέπει να βρίσκεται σε μία από τις pool areas του παλιού MME του και ο παλιός MME πρέπει να βρίσκεται στη ζητούμενη PLMN. Αν το κινητό έχει αλλάξει pool area από την τελευταία φορά που ήταν ενεργοποιημένο, ή εάν ζητά να εγγραφεί με ένα διαφορετικό δίκτυο, τότε ο σταθμός βάσης επιλέγει άλλο MME. Αυτό επιτυγχάνεται επιλέγοντας τυχαία από αυτές στην pool area του, σύμφωνα με ένα αλγόριθμο εξισορρόπησης φορτίου [22].

11.4.4 Διαδικασίες Εξακρίβωσης και Ασφάλειας

Ο MME λαμβάνει τα μηνύματα από το σταθμό βάσης, και μπορεί τώρα να εκτελέσει κάποιες διαδικασίες που σχετίζονται με την εξακρίβωση και την ασφάλεια (Σχήμα 11.6).

Αν το κινητό έχει μετακινηθεί σε ένα νέο MME, από τότε που ήταν τελευταία ενεργοποιημένο, τότε ο MME πρέπει να μάθει την ταυτότητα του κινητού. Για να γίνει αυτό, εξάγει την ταυτότητα του παλιού MME από το GUTI του κινητού και στέλνει το GUTI στον παλιό MME σε ένα *GTP-C Αίτημα Εξακρίβωσης* (3). Η απόκριση παλιού MME περιλαμβάνει την IMSI και τα πλήκτρα ασφαλείας του κινητού. Σε εξαιρετικές περιπτώσεις, ωστόσο, το κινητό μπορεί να είναι άγνωστο στον παλιό MME. Αν συμβεί αυτό, τότε το νέο MME ζητάει από το κινητό την IMSI του χρησιμοποιώντας ένα *EMM Αίτημα Ταυτότητας* (4), ένα μήνυμα που μεταφέρεται

χρησιμοποιώντας τις NAS πληροφορίες διαδικασίας μεταφοράς, από το Κεφάλαιο 2.

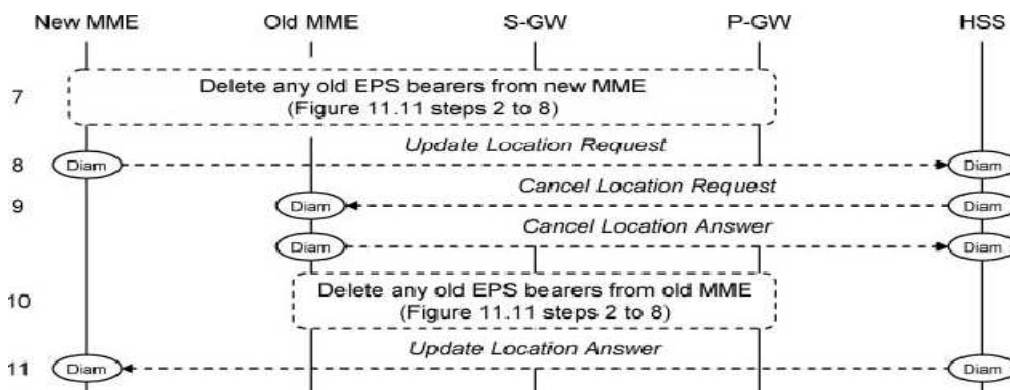
Το δίκτυο μπορεί τώρα να εκτελέσει δύο διαδικασίες ασφαλείας (5a). Στην πιστοποίηση και συμφωνία κλειδιού, το κινητό και το δίκτυο επιβεβαιώνουν τις ταυτότητες το ένα του άλλου και δημιουργείται ένα νέο σύνολο πλήκτρων ασφαλείας. Στην ενεργοποίηση ασφάλειας NAS, ο MME ενεργοποιεί αυτά τα πλήκτρα και ξεκινά την ασφαλή προστασία όλων των μετέπειτα EMM και ESM μηνυμάτων. Τα στάδια αυτά είναι υποχρεωτικά αν υπήρχε κάποιο πρόβλημα με την προστασία της ακεραιότητας του αιτήματος επισύναψης, και διαφορετικά, είναι προαιρετικά. Αν ο έλεγχος ακεραιότητας πέτυχε, τότε ο MME μπορεί σιωπηρά να ενεργοποιήσει ξανά τα παλιά πλήκτρα του κινητού στέλλοντάς του ένα μήνυμα σηματοδότησης που έχει εξασφαλίσει χρησιμοποιώντας αυτά τα πλήκτρα, παρακάμπτοντας έτσι και τις δύο αυτές διαδικασίες.

Ο MME ανακτά τότε την IMEI (5b). Μπορεί να συνδυάσει αυτό το μήνυμα με την ενεργοποίηση ασφαλείας NAS για να μειώσει το ποσό της σηματοδότησης, αλλά είναι υποχρεωτικό για το MME για να ανακτήσετε την IMEI με κάποιο τρόπο. Ως μια προστασία κατά των κλεμμένων κινητών, ο MME μπορεί προαιρετικά να στείλει την IMEI στον EIR, ο οποίος ανταποκρίνεται είτε με την αποδοχή είτε με την απόρριψη της συσκευής.

Εάν το κινητό έθετε τις ESM πληροφορίες σημαίας μεταφοράς στο PDN Αίτημα Συνδεσιμότητάς του, τότε ο MME μπορεί τώρα να του στείλει ένα ESM Αίτημα Πληροφοριών (6). Το κινητό στέλνει ως απάντηση τις επιλογές διαμόρφωσης πρωτοκόλλου του. Τώρα που το δίκτυο έχει ενεργοποιήσει ασφάλεια NAS, το κινητό μπορεί να στείλει το μήνυμα με ασφάλεια.

11.4.5 Ενημέρωση Θέσης

Ο MME μπορεί τώρα να ενημερώσει το μητρώο του δικτύου από τη θέση του κινητού (Σχήμα 11.7). Αν το κινητό επανατοποθετείται στον προηγούμενο MME του χωρίς να έχει αποσυνδεθεί σωστά (για παράδειγμα, εάν η μπαταρία του εξαντλήθηκε), τότε ο MME μπορεί να εξακολουθεί να έχει κάποιους φορείς EPS που



Σχήμα 11.7 Διαδικασία επισύναψης. (3) Ενημέρωση Θέσης. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI.

σχετίζονται με το κινητό. Αν συμβαίνει αυτό, τότε ο MME τους διαγράφει (7), ακολουθώντας τα βήματα από τη διαδικασία αποσύνδεσης που θα δούμε αργότερα.

Αν ο MME έχει αλλάξει τότε ο νέος MME στέλνει την IMSI του κινητού στον HSS, σε μια Διάμετρο Αίτησης Ενημέρωσης Θέσης (8). Ο HSS ενημερώνει το μητρώο του από τη θέση του κινητού, και λέει στον παλιό MME να ξεχάσει το κινητό (9). Αν ο παλιός MME έχει τυχόν φορείς EPS που σχετίζονται με το κινητό, τότε τους διαγράφει όπως πριν (10).

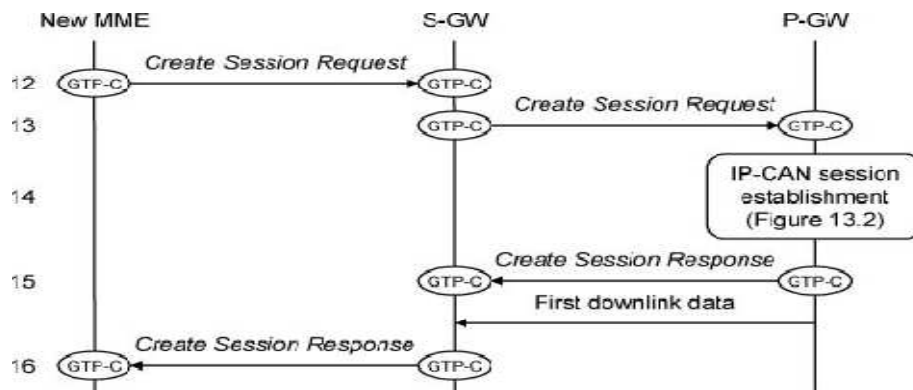
Στο στάδιο 11, ο HSS στέλνει μια Απάντηση Ενημέρωσης Θέσης στο νέο MME, η οποία περιλαμβάνει τα δεδομένα εγγραφής του χρήστη [23]. Τα δεδομένα εγγραφής απαριθμούν όλα τα APNs στα οποία ο χρήστης έχει εγγραφεί και καθορίζει το καθένα χρησιμοποιώντας μια ρύθμιση APN.

Κάθε ρύθμιση APN προσδιορίζει το APN και δηλώνει αν το αντίστοιχο δίκτυο πακέτων δεδομένων υποστηρίζει το IPv4, το IPv6 ή και τα δύο. Περιλαμβάνει επίσης το μέγιστο ρυθμό bit του χρήστη από όλους τους non-GBR φορείς σε αυτό το APN, γνωστούς ως ο μέγιστος συνολικός ρυθμός bit ανά APN (APN-AMBR), και τις παραμέτρους που περιγράφουν την QoS του προεπιλεγμένου φορέα EPS. Προαιρετικά, μπορεί επίσης να δείξει μια στατική διεύθυνση IPv4 ή ένα πρόθεμα IPv6 για το κινητό για να χρησιμοποιήσει κατά τη σύνδεση με το APN.

Επιπλέον, τα δεδομένα εγγραφής εντοπίζουν μία από τις διαμορφώσεις APN ως προεπιλογή και καθορίζουν το μέγιστο συνολικό ρυθμό bit του χρήστη από όλους τους non-GBR φορείς, γνωστό ως μέγιστος συνολικός ρυθμός bit ανά UE (UE-AMBR).

11.4.6 Δημιουργία Φορέα Προεπιλογής

Ο MME έχει πλέον όλες τις πληροφορίες που χρειάζεται για να δημιουργήσει τον προεπιλεγμένο φορέα EPS (Σχήμα 11.8). Ξεκινά με την επιλογή μιας κατάλληλης πύλης PDN, χρησιμοποιώντας την προτιμώμενη APN του κινητού, εάν παρέχεται μια και τα δεδομένα εγγραφής την υποστηρίζουν, ή διαφορετικά την προεπιλογή APN.



Σχήμα 11.8 Διαδικασία επισύναψης. (4) Δημιουργία φορέα προεπιλογής. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI.

Στη συνέχεια επιλέγει μια S-GW, και της στέλνει μια *Αίτηση Δημιουργίας Συνόδου GTP-C* (12). Σε αυτό το μήνυμα, ο MME συμπεριλαμβάνει τα σχετικά δεδομένα εγγραφής και προσδιορίζει την IMSI του κινητού και την πύλη προορισμού PDN.

Η S-GW λαμβάνει το μήνυμα και το προωθεί στην πύλη PDN (13). Στο μήνυμα, η S-GW περιλαμβάνει έναν GTP-U TEID, τον οποία τελικά θα χρησιμοποιήσει η πύλη PDN για να του στείλει πακέτα κάτω ζεύξης σε όλη τη διεπαφή S5/S8.

Αν το μήνυμα δεν περιέχει μια στατική διεύθυνση IP, τότε η πύλη PDN μπορεί να διαθέσει μια δυναμική διεύθυνση IPv4 και / ή μια IPv6 για το κινητό, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους που καλύψαμε νωρίτερα. Εναλλακτικά, μπορεί να αναβάλει την κατανομή μιας διεύθυνσης IPv4 για αργότερα, αν το κινητό το ζητούσε στις επιλογές διαμόρφωσης πρωτοκόλλου του. Η πύλη PDN εκτελεί επίσης μια διαδικασία γνωστή ως *καθιέρωση συνόδου σύνδεσης IP δικτύου πρόσβασης (IP-CAN)* (14). Η διαδικασία αυτή καθορίζει την QoS του φορέα προεπιλογής EPS και μπορεί επίσης να προκαλέσει τη δημιουργία ενός ή περισσότερων αποκλειστικών φορέων EPS. Θα το περιγράψουμε μαζί με τις άλλες διαδικασίες για τη διαχείριση QoS, ως μέρος του Κεφαλαίου 13.

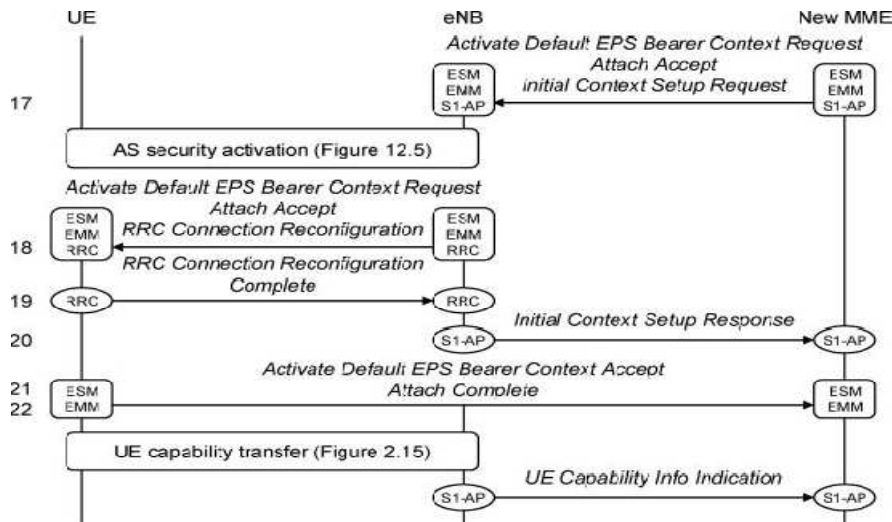
Η πύλη PDN τώρα αναγνωρίζει το αίτημα της S-GW μέσω μιας *GTP-C Απόκρισης Δημιουργίας Συνόδου* (15). Στο μήνυμα, περιλαμβάνει οποιαδήποτε διεύθυνση IP που το κινητό έχει διατεθεί, καθώς και την QoS του φορέα προεπιλογής EPS. Η πύλη PDN περιλαμβάνει επίσης ένα TEID δικό της, την οποία η S-GW τελικά θα χρησιμοποιήσει για να δρομολογήσει πακέτα άνω ζεύξης σε S5/S8. Η S-GW προωθεί το μήνυμα στον MME (16), εκτός από το ότι αντικαθιστά το TEID της πύλης PDN με ένα TEID άνω ζεύξης για να χρησιμοποιήσει ο σταθμός βάσης σε όλη την S1-U.

11.4.7 Αποδοχή Επισύναψης

Ο MME μπορεί τώρα να απαντήσει στο αίτημα επισύναψης του κινητού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.9. Πρώτα ξεκινάει μια διαδικασία ESM γνωστή ως *ενεργοποίηση πλαισίου φορέα Προεπιλογής EPS*, η οποία είναι η απάντηση στο Αίτημα Συνδεσιμότητας PDN του κινητού και η οποία ξεκινά με ένα μήνυμα γνωστό ως *Αίτημα Πλαισίου Φορέα Ένεργης Προεπιλογής EPS*. Το μήνυμα περιλαμβάνει την ταυτότητα φορέα EPS, το APN, την QoS και κάθε IP διεύθυνση που το δίκτυο έχει διαθέσει στο κινητό.

Ο MME ενσωματώνει το μήνυμα ESM σε μια EMM *Αποδοχή Επισύναψης*, η οποία είναι μια απάντηση στο αρχικό αίτημα επισύναψης του κινητού. Το μήνυμα περιλαμβάνει μια λίστα TAs στην οποία ο MME έχει καταχωρήσει στο κινητό και ένα νέο GUTI.

Με τη σειρά του, ο MME ενσωματώνει και τα δύο μηνύματα σε μια *Αρχική Αίτηση Εγκατάστασης Πλαισίου S1-AP*. Αυτή είναι η αρχή μιας διαδικασίας, γνωστής ως *Αρχική εγκατάσταση πλαισίου*, η οποία πυροδοτήθηκε από το Αρχικό UE Μήνυμα του σταθμού βάσης. Η διαδικασία λέει στο σταθμό βάσης να δημιουργήσει μια



Σχήμα 11.9 Διαδικασία επισύναψης. (5) Αποδοχή επισύναψης . Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI.

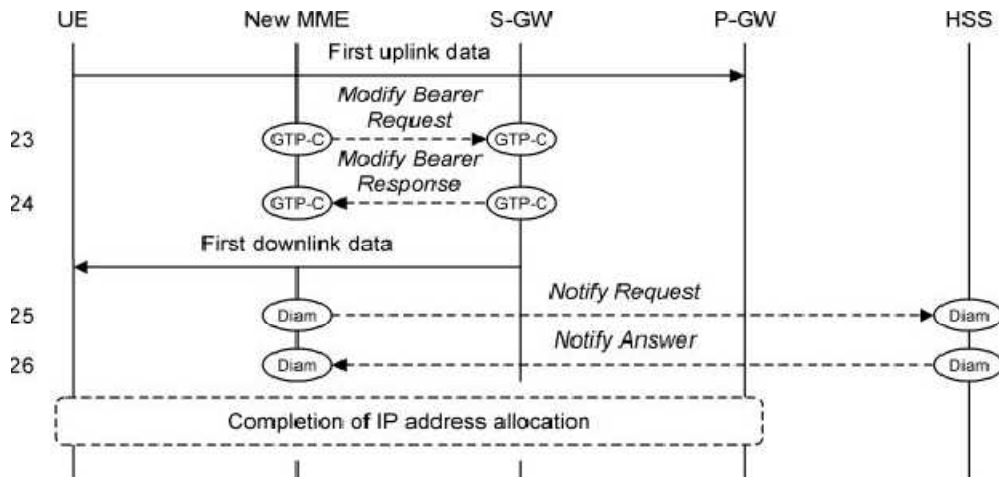
σύνδεση σηματοδότησης S1 για το κινητό, και το S1 και τους ασύρματους φορείς που αντιστοιχούν στον φορέα προεπιλογής EPS. Το μήνυμα περιλαμβάνει την QoS των φορέων, τον TEID άνω ζεύξης που ο MME έλαβε από την S-GW και ένα κλειδί για την ενεργοποίηση της ασφάλειας AS. Ο MME στέλνει και τα τρία μηνύματα προς τον σταθμό βάσης, στο στάδιο 17.

Ο σταθμός βάσης ενεργοποιεί τώρα την ασφάλεια AS, χρησιμοποιώντας το ασφαλές κλειδί που μόλις έλαβε. Από αυτό το σημείο, όλα τα δεδομένα και τα RRC μηνύματα σηματοδότησης στη διεπαφή αέρα είναι εξασφαλισμένα. Στη συνέχεια δημιουργεί ένα μήνυμα *Επαναδιαμόρφωσης Σύνδεσης RRC*, στο οποίο τροποποιεί τη σύνδεση RRC του κινητού έτσι ώστε να δημιουργήσει δύο νέους ασύρματους φορείς: έναν ασύρματο φορέα που θα φέρει το φορέα προεπιλογής EPS, και το SRB 2. Στέλνει αυτό το μήνυμα στο κινητό, μαζί με τα μηνύματα EMM και ESM που μόλις έλαβε από τον MME (18).

Το κινητό αναδιαμορφώνει την RRC σύνδεσή του σύμφωνα με τις οδηγίες και δημιουργεί το φορέα προεπιλογής EPS. Στη συνέχεια στέλνει τις επιβεβαιώσεις του στο δίκτυο, σε δύο στάδια. Χρησιμοποιώντας το SRB 1, το κινητό στέλνει πρώτα στο σταθμό βάσης μια επιβεβαίωση γνωστή ως *Πλήρης Επαναδιαμόρφωση Σύνδεσης RRC*, η οποία να ενεργοποιεί μια *Αρχική Απάντηση Ρύθμισης Πλαισίου S1-AP* στον MME (20). Το μήνυμα S1-AP περιλαμβάνει έναν TEID κάτω ζεύξης για να χρησιμοποιήσει η S-GW σε όλη την S1-U.

Το κινητό, στη συνέχεια, συνθέτει μια ESM *Αποδοχή Πλαισίου Φορέα Ενεργής Προεπιλογής EPS* και την ενσωματώνει σε μια EMM *Ολοκλήρωση Επισύναψης*, για να αναγνωρίσει τα μέρη ESM και EMM του μηνύματος 18. Στέλνει τα μηνύματα αυτά στο σταθμό βάσης για το SRB 2 (21), χρησιμοποιώντας τη διαδικασία πληροφοριών μεταφοράς NAS, και ο σταθμός βάσης προωθεί τα μηνύματα στον MME (22).

Σε αυτό το σημείο περίπου, ο σταθμός βάσης ανακτά τις ικανότητες



Σχήμα 11.10 Διαδικασία Επισύναψης. (6) Ενημέρωση Φορέα Προεπιλογής. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI.

ασύρματης πρόσβασης του κινητού, χρησιμοποιώντας τη διαδικασία που καλύψαμε στο Κεφάλαιο 2 [24]. Στέλνει τις ικανότητες πίσω στο MME χρησιμοποιώντας μια S1-AP *Ένδειξη Δυνατότητας Πληροφοριών UE*, η οποία τις αποθηκεύει μέχρι το κινητό να αποσυνδεθεί από το δίκτυο.

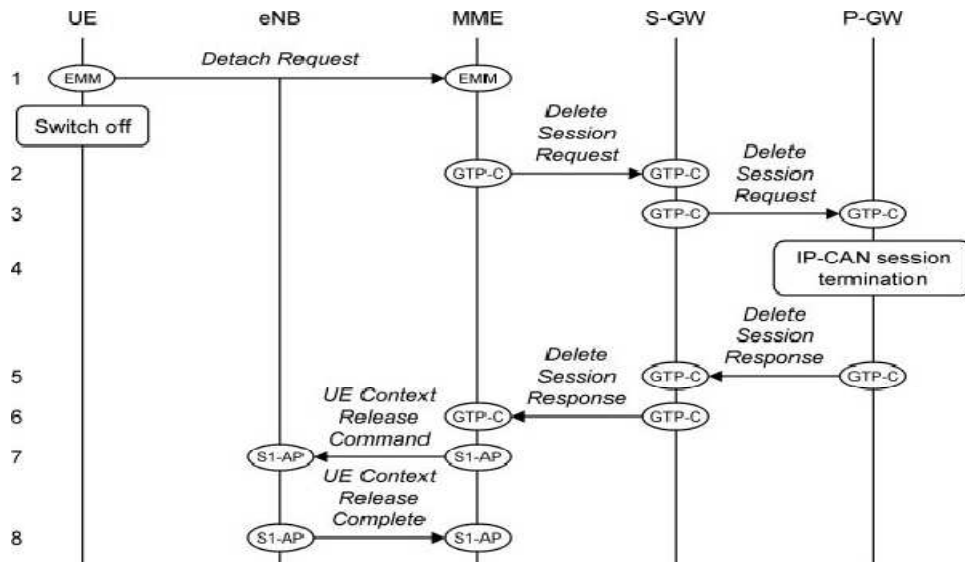
11.4.8 Ενημέρωση Φορέα Προεπιλογής

Το κινητό μπορεί τώρα να στείλει δεδομένα άνω ζεύξης όσον αφορά την πύλη PDN. Ωστόσο, χρειάζεται ακόμη να πούμε στην S-GW σχετικά με την ταυτότητα του επιλεγμένου σταθμού βάσης και να του στείλουμε τον TEID που ο σταθμός βάσης μόλις έχει δώσει. Για να το κάνει αυτό (Σχήμα 11.10), ο MME στέλνει ένα GTP-C *Αίτημα Φορέα Τροποποίησης* στην S-GW (23) και η S-GW ανταποκρίνεται (24). Από αυτό το σημείο, τα πακέτα δεδομένων κάτω ζεύξης μπορούν να ρέουν προς το κινητό.

Ο MME μπορεί επίσης να κοινοποιεί το HSS για την επιλεγμένη πύλη PDN και την APN (25). Αυτό επιτυγχάνεται εάν η επιλεγμένη πύλη PDN είναι διαφορετική από εκείνη στη διαμόρφωση προεπιλογής APN, για παράδειγμα, εάν το κινητό ζητούσε ένα APN του ίδιου για να συνδεθεί. Το HSS αποθηκεύει την επιλεγμένη πύλη PDN, για χρήση σε οποιεσδήποτε μελλοντικές μεταπομπές σε non 3GPP συστήματα, και ανταποκρίνεται (26).

Τέλος, το κινητό μπορεί να χρειαστεί να επικοινωνήσει με την πύλη PDN σε όλο το επίπεδο χρήστη, για να ολοκληρώσει η κατανομή των IP διευθύνσεών του. Αυτό επιτυγχάνεται κατά την απόκτηση ενός προθέματος IPv6 χρησιμοποιώντας απάτριδη αυτόματη διαμόρφωση, και επίσης, κατά τη λήψη μιας διεύθυνσης IPv4 χρησιμοποιώντας DHCPv4.

Το κινητό είναι τώρα στις καταστάσεις EMM-REGISTERED, ECM-CONNECTED και RRC_CONNECTED και θα παραμείνει σε αυτές τις καταστάσεις για όσο χρονικό διάστημα ο χρήστης επικοινωνεί ενεργά με τον έξω κόσμο. Εάν ο



Σχήμα 11.11 Διαδικασία αποσύνδεσης, που προκλήθηκε από την απενεργοποίηση του κινητού. Αναδημοσίευση με την άδεια του ETSI.

χρήστης δεν κάνει τίποτα, το δίκτυο μπορεί να μεταφέρει το κινητό στις ECM-IDLE και RRC_IDLE χρησιμοποιώντας μια διαδικασία γνωστή ως έκδοση S1. Θα καλύψουμε αυτή τη διαδικασία αργότερα, ως μέρος του Κεφαλαίου 14.

11.5 Διαδικασία Αποσύνδεσης

Η τελευταία διεργασία για να εξεταστεί σε αυτό το κεφάλαιο, είναι η διαδικασία Αποσύνδεσης [25]. Αυτή ακυρώνει την καταχώρηση του κινητού με τον EPC και χρησιμοποιείται συνήθως όταν το κινητό απενεργοποιηθεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.11.

Θα υποθέσουμε ότι το κινητό ξεκινά στις ECM-CONNECTED και RRC_CONNECTED, σύμφωνα με την κατάστασή του στο τέλος της προηγούμενης ενότητας. Ο χρήστης ενεργοποιεί τη διαδικασία λέγοντας στο κινητό να τερματιστεί. Σε απάντηση, το κινητό συνθέτει ένα EMM Αίτημα Αποσύνδεσης, στο οποίο καθορίζει το GUTI του, και στέλνει το μήνυμα στο MME (1). Μετά την αποστολή του μηνύματος, το κινητό μπορεί να απενεργοποιηθεί χωρίς να περιμένει απάντηση.

Ο MME τώρα πρέπει να καταστρέψει τους φορείς EPS του κινητού. Για να γίνει αυτό, αναζητά την S-GW του κινητού και της στέλνει ένα GTP-C Αίτημα Συνόδου Διαγραφής (2). Η S-GW προωθεί το μήνυμα στην πύλη PDN (3), η οποία εκτελεί μια διαδικασία γνωστή ως IP-CAN τερματισμού συνόδου (4) που αναιρεί την προηγούμενη δράση της IP-CAN καθιέρωσης συνόδου. Η πύλη PDN τότε, καταστρέφει όλους τους φορείς του κινητού και απαντάει στην S-GW (5), που καταστρέφει τους φορείς της με τον ίδιο τρόπο και απαντάει στον MME (6). Εάν είναι απαραίτητο, αυτά τα στάδια επαναλαμβάνονται για οποιοδήποτε άλλο δίκτυο που είναι συνδεδεμένο το κινητό.

Για να ολοκληρωθεί η διαδικασία, ο MME λέει στο σταθμό βάσης να καταστρέψει όλους τους πόρους που σχετίζονται με το κινητό και υποδεικνύει ότι η αιτία είναι ένα αίτημα αποσύνδεσης (7). Ο σταθμός βάσης κάνει το ίδιο και ανταποκρίνεται (8). Ο MME μπορεί να διαγράψει τώρα τις περισσότερες από τις πληροφορίες που συνδέονται με το κινητό. Ωστόσο, διατηρεί μια εγγραφή των IMSI, GUTI και πλήκτρων ασφαλείας του κινητού, καθώς θα τα χρειαστεί την επόμενη φορά που το κινητό ενεργοποιηθεί.

Αν το κινητό ξεκινά στις ECM-IDLE και RRC_IDLE, τότε δε μπορεί να στείλει το αίτημα αποσύνδεσης αμέσως. Αντ' αυτού, ξεκινά εκτελώντας τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης contention based, ακολουθούμενη από τα στάδια 1 και 2 της εγκατάστασης σύνδεσης RRC. Στη συνέχεια ενσωματώνει το αίτημα αποσύνδεσης στο μήνυμα Ολοκλήρωση Εγκατάσταση Σύνδεσης RRC, και η διαδικασία αποσύνδεσης συνεχίζεται όπως πριν.

Αναφορές

1. 3GPP TS 23.122 (September 2011) *Non-Access-Stratum (NAS) Functions Related to Mobile Station (MS) in Idle Mode*, Release 10.
2. 3GPP TS 36.304 (October 2011) *User Equipment (UE) Procedures in Idle Mode*, Release 10.
3. 3GPP TS 23.401 (September 2011) *General Packet Radio Service (GPRS) Enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Access*, Release 10.
4. 3GPP TS 36.300 (October 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall Description; Stage 2*, Release 10.
5. 3GPP TS 24.301 (September 2011) *Non-Access-Stratum (NAS) protocol for Evolved Packet System (EPS); Stage 3*, Release 10.
6. 3GPP TS 29.272 (September 2011) *Evolved Packet System (EPS); Mobility Management Entity (MME) and Serving GPRS Support Node (SGSN) Related Interfaces Based on Diameter Protocol*, Release 10.
7. 3GPP TS 29.274 (September 2011) *3GPP Evolved Packet System (EPS); Evolved General Packet Radio Service (GPRS) Tunnelling Protocol for Control Plane (GTPv2-C); Stage 3*, Release 10.
8. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10.
9. 3GPP TS 36.413 (September 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); SI Application Protocol (SIAP)*, Release 10.
10. 3GPP TS 23.122 (September 2011) *Non-Access-Stratum (NAS) Functions Related to Mobile Station (MS) in Idle Mode*, Release 10, sections 3.1, 4.3.1, 4.4.
11. 3GPP TS 36.304 (October 2011) *User Equipment (UE) Procedures in Idle Mode*, Release 10, sections 4, 5.1.
12. 3GPP TS 31.102 (October 2011) *Characteristics of the Universal Subscriber Identity Module (USIM) Application*, Release 10, sections 4.2.2, 4.2.5, 4.2.53, 4.2.54, 4.2.84, 4.2.91.
13. 3GPP TS 31.102 (October 2011) *Characteristics of the Universal Subscriber Identity Module (USIM) Application*, Release 10, section 4.4.6.
14. 3GPP TS 23.122 (September 2011) *Non-Access-Stratum (NAS) Functions Related to Mobile Station (MS) in Idle Mode*, Release 10, sections 3.1A, 4.4.3.1.3.

15. 3GPP TS 36.304 (October 2011) *User Equipment (UE) Procedures in Idle Mode*, Release 10, section 5.5.
16. 3GPP TS 36.304 (October 2011) *User Equipment (UE) Procedures in Idle Mode*, Release 10, sections 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3, 5.3.
17. 3GPP TS 36.214 (March 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Layer; Measurements*, Release 10, section 5.1.1.
18. 3GPP TS 36.331 (October 2011) *Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, Release 10, sections 5.3.3, 6.2.2 (*RRC Connection Request, RRC Connection Setup, RRC Connection Setup Complete*).
19. 3GPP TS 23.401 (September 2011) *General Packet Radio Service (GPRS) Enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Access*, Release 10, section 5.3.1.
20. IETF RFC 4862 (September 2007) *IPv6 Stateless Address*.
21. 3GPP TS 23.401 (September 2011) *General Packet Radio Service (GPRS) Enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Access*, Release 10, section 5.3.2.1.
22. 3GPP TS 23.401 (September 2011) *General Packet Radio Service (GPRS) Enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Access*, Release 10, sections 4.3.7, 4.3.8.
23. 3GPP TS 29.272 (September 2011) *Evolved Packet System (EPS); Mobility Management Entity (MME) and Serving GPRS Support Node (SGSN) Related Interfaces Based on Diameter Protocol*, Release 10, sections 7.3.2, 7.3.34, 7.3.35.
24. 3GPP TS 36.300 (October 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall Description; Stage 2*, Release 10, section 18.
25. 3GPP TS 23.401 (September 2011) *General Packet Radio Service (GPRS) Enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Access*, Release 10, section 5.3.8.2.