

ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ  
ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών  
Τμήμα Εφαρμοσμένης Πληροφορικής & Πολυμέσων



Πτυχιακή Εργασία

“Μελέτη συστημάτων cognitive radio για τη δυναμική διαχείριση του φάσματος”

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: Ελένη Βείσάκη

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: Δρ. Γεώργιος Μαστοράκης

Στην οικογένειά μου και σε όσους με στήριξαν,  
με ιδιαίτερη εκτίμηση και αγάπη

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας, η οποία υλοποιήθηκε στο Εργαστήριο Έρευνας και Ανάπτυξης Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων (ΠΑΣΙΦΑΗ) του Α.Τ.Ε.Ι Κρήτης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν.

Κατά κύριο λόγο να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα μου από το Α.Τ.Ε.Ι Κρήτης, Επιστημονικό Συνεργάτη, Δρ. Γεώργιο Μαστοράκη, την Επιστημονική Συνεργάτιδα του Α.Τ.Ε.Ι Κρήτης κ. Αθηνά Μπουρδένα όπως επίσης και τον Επίκουρο Καθηγητή και Υπεύθυνο του Εργαστηρίου Έρευνας και Ανάπτυξης Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων (ΠΑΣΙΦΑΗ), Δρ. Ευάγγελο Πάλλη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν δίνοντας μου τη δυνατότητα να εκπονήσω την πτυχιακή μου εργασία στον επιστημονικό τομέα που επιθυμούσα. Επίσης, θα ήθελα να τους ευχαριστήσω για την διάθεσή τους να με βοηθήσουν και να μου λύσουν οποιαδήποτε απορία όποια στιγμή το χρειαζόμουν.

Τέλος ευχαριστώ από καρδιάς την οικογένειά μου, και τους φίλους μου για την αγάπη και την κατανόηση την οποία έδειξαν όλο αυτόν τον καιρό. Καθώς και τον κ. Παντελάκη, Προϊστάμενος Σπουδαστικής Μέριμνας, ο οποίος με βοήθησε καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου με τις συμβουλές του.

Ηράκλειο, Αύγουστος 2010

Ελένη Βεϊσάκη

## Περίληψη

Τα ασύρματα δίκτυα μέχρι σήμερα λειτουργούν αξιοποιώντας στατική κατανομή των διαθέσιμων πόρων του φάσματος. Αν και η πολιτική εκχώρησης φάσματος με αυτόν τον τρόπο αξιοποιήθηκε αρκετά στο παρελθόν, η απαίτηση για παροχή ετερογενών υπηρεσιών χρησιμοποιώντας ασύρματα δίκτυα, αυξήθηκε δραματικά και δημιουργήθηκε η ανάγκη για νέες ερευνητικές προσπάθειες, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν στη βελτίωση της αξιοποίησης του φάσματος. Οι ερευνητικές προσπάθειες αυτές έχουν σαν στόχο την εξεύρεση λύσεων, οι οποίες βασίζονται στην εκμετάλλευση του ήδη υπάρχοντος φάσματος με τη χρήση μοντέλων της μικροοικονομίας. Στα πλαίσια αυτά και δεδομένης της συνεχούς απαίτησης για πολλαπλές υπηρεσίες, τα παραδοσιακά ασύρματα συστήματα επικοινωνίας πρέπει να βελτιστοποιηθούν, χρησιμοποιώντας μηχανισμούς δυναμικής διαχείρισης φάσματος ανάλογα με τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς των τελικών χρηστών αξιοποιώντας με αυτό τον τρόπο πιο αποτελεσματικά το διαθέσιμο ασύρματο φάσμα. Αυτό το πρόβλημα διευθετείται από τον ερευνητικό τομέα της δυναμικής διαχείρισης φάσματος και των δικτύων Cognitive Radio (CR) προτείνοντας πρωτοποριακούς μηχανισμούς, οι οποίοι βασίζονται σε οικονομικά μοντέλα. Στα πλαίσια αυτά η πτυχιακή αυτή εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη των περιορισμών των σημερινών τεχνικών διαχείρισης του φάσματος, οι οποίες έχουν αξιοποιηθεί σήμερα και αναλύει τις ερευνητικές λύσεις που βασίζονται στη θεωρία της μικροοικονομίας (state of the art), που μπορούν να αξιοποιηθούν για τη συμβολή στη λύση του προβλήματος της στατικής κατανομής του ασύρματου φάσματος. Οι προτεινόμενες μέχρι σήμερα ερευνητικές λύσεις (state of the art) εισάγουν τους όρους spectrum sharing και spectrum trading και αξιοποιούνται στα δίκτυα CR. Όλες οι ερευνητικές προσπάθειες αυτές υπόσχονται πιο αποτελεσματικές λύσεις για τη διαχείριση του διαθέσιμου φάσματος με δυναμικούς μηχανισμούς, οι οποίοι βασίζονται στις θεωρίες της οικονομίας συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο προς τη βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων των ασυρμάτων δικτύων. Επιπρόσθετα η πτυχιακή εργασία αυτή παρουσιάζει τη σχεδίαση πρωτότυπων δικτύων, τα οποία βασίζονται στις τεχνολογίες UMTS και LTE με γνωστικές ιδιότητες λειτουργώντας στις συχνότητες των UHF και πιο συγκεκριμένα στις συχνότητες των TVWS (TV White Spaces).

## Περιεχόμενα:

Περίληψη .....	iv
Λίστα Εικόνων:.....	vii
Λίστα Πινάκων: .....	vii
Ακρωνύμια:.....	viii
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο εργασίας.....	1
1.2 Διάρθρωση εργασίας.....	2
2. Παρούσα Κατάσταση.....	3
2.1 Χαρακτηριστικά του Cognitive Radio .....	3
2.1.1 Συνείδηση (aware) .....	4
2.1.2 Προσαρμοστικότητα (adaptive).....	4
2.1.3 Μάθηση (machine learning) .....	5
2.1.4 Ο Κύκλος της Γνώσης.....	5
2.1.4.1 Παρατήρηση .....	6
2.1.4.2. Προσανατολισμός.....	6
2.1.4.3. Σχεδιασμός.....	7
2.1.4.4. Απόφαση .....	7
2.1.4.5. Δράση.....	7
2.1.4.6. Μάθηση.....	7
2.2 Software Radio: Ο πρόδρομος του Cognitive Radio .....	8
2.3 Απαιτούμενες τεχνολογίες για το Cognitive Radio .....	9
2.3.1 Εντοπισμός θέσης .....	10
2.3.2 Επίγνωση φάσματος.....	10
2.3.3 Βιομετρία .....	11
2.3.4 Χρόνος .....	11
2.3.5 Επίγνωση κατάστασης .....	12
2.4 Τεχνολογίες Γνωσιακών δικτύων.....	12
2.4.1 Spectrum pooling:.....	12
2.4.2 CORVUS:.....	12
2.4.3 DIMSUMnet: .....	13
2.4.4 DRiVE/OverDRiVE project: .....	13
2.4.5 Nautilus:.....	14
2.4.6 OCRA network: .....	14
2.4.7 IEEE 802.22:.....	15
2.5. IEEE 802.22 .....	15
2.5.1. Το σύστημα IEEE 802.22 .....	16
2.5.1.1. Τοπολογία, Οντότητες και Σχέσεις.....	16
2.5.1.2. Ικανότητα υπηρεσίας (Service Capacity) .....	16
2.5.1.3. Κάλυψη υπηρεσίας ( Service Coverage ) .....	17
2.5.2 Το 802.22 Air Interface .....	17
2.5.2.1. Το φυσικό επίπεδο (The PHY) .....	17
2.5.2.2. Το MAC .....	19
2.5.2.2.1 Super frame και δομή του frame .....	19
2.5.2.2.2 Network Entry and Initialization.....	20
2.5.2.2.3 Μετρήσεις και διοίκηση εύρους ζώνης.....	20

2.5.2.2.4 Quiet Periods for Incumbent Sensing.....	21
2.5.3. Συνύπαρξη στο IEEE 802.22.....	22
2.5.4. Self-Coexistence .....	23
2.6 Προκλήσεις γύρω από το Cognitive Radio .....	23
3. Καθεστώτα Κατανομής Φάσματος.....	25
3.1 Command and Control .....	25
3.2 Spectrum Commons .....	26
3.3 Spectrum Markets .....	28
4. LTE και UMTS.....	30
4.1 LTE (Long Term Evolution).....	30
4.1.1 Επισκόπηση .....	30
4.1.2 Τρέχουσα κατάσταση .....	31
4.1.3 LTE Αρχιτεκτονική .....	32
4.1.3.1 Evolved Radio Access Network (RAN).....	32
4.1.3.2 Serving Gateway (SGW).....	32
4.1.3.3 Mobility Management Entity (MME).....	33
4.1.3.4 Packet Data Network Gateway (PDN GW).....	33
4.2. UMTS (Universal Mobile Telecommunications System).....	34
4.2.1 Αρχιτεκτονική των UMTS.....	34
4.2.2 Χαρακτηριστικά του UMTS.....	34
4.2.3 Ειδικές ανάγκες βάσης-σταθμού (BS Specific Requirements) .....	35
4.2.4 Συγκεκριμένες απαιτήσεις UE (UE Specific Requirements) .....	36
4.2.5 UMTS Carriers .....	36
4.2.6 Εκπομπές εκτός ζώνης (Out of Band Emissions).....	37
5. Επέκταση των UMTS και LTE στα TVWS.....	39
5.1. Κίνητρο .....	39
5.2 Σενάριο χαρακτηριστικών και Τεχνικής βιωσιμότητας .....	40
5.2.1 Τερματικά χρηστών .....	40
5.2.2 Περιοχή κάλυψης.....	40
5.2.3 Συχνότητες λειτουργίας.....	41
5.2.4 Τεχνική δυνατότητα πραγματοποίησης .....	42
5.3 Δυνατότητες αγοράς.....	43
5.3.1 Αστικές περιοχές.....	45
5.3.2 Αγροτικές περιοχές.....	45
5.4 Ρυθμιστική δυνατότητα πραγματοποίησης (Regulatory feasibility).....	45
5.5 επέκταση των UMTS στα TVWS .....	46
5.5.1 UMTS περιγραφή Use-case: Υπερφόρτωση Δικτύου .....	47
5.5.1.1 Σενάριο χρήσης. (Use-case).....	47
5.5.1.2 Το θέμα της υπερφόρτωσης του δικτύου.....	47
5.6 UMTS Secondary End-user/ Ανάλυση εφαρμογής.....	48
5.6.1 Εφαρμογές και κατηγορίες Qos.....	48
6. Σύνοψη.....	50
Βιβλιογραφία .....	51

## Λίστα Εικόνων:

<u>Εικόνα 2.1</u>	Η σουίτα αισθητήρων του Cognitive Radio
<u>Εικόνα 2.2</u>	Ο Κύκλος της Γνώσης
<u>Εικόνα 2.3</u>	Βασική αρχιτεκτονική λογισμικού ενός σύγχρονου SDR
<u>Εικόνα 2.4</u>	Υποδειγματική διαμόρφωση του 802.22
<u>Εικόνα 2.5</u>	Πρότυπο 802.22 ασύρματο RAN ταξινομημένο και σε σύγκριση με άλλα δημοφιλή ασύρματα πρότυπα
<u>Εικόνα 2.6</u>	Παράδειγμα της πληρότητας της ζώνης τηλεόραση (TV band) στην πάροδο του χρόνου και της συχνότητας
<u>Εικόνα 2.7</u>	Γενική δομή του superframe
<u>Εικόνα 2.8</u>	Δομή χρόνου/συχνότητας ενός πλαισίου Mac.
<u>Εικόνα 2.9</u>	Τα δύο στάδια των μηχανισμών της περιόδου ησυχίας.
<u>Εικόνα 4.1</u>	Evolved Packet Core
<u>Εικόνα 4.2</u>	UMTS και LTE αρχιτεκτονική.
<u>Εικόνα 4.3</u>	Αρχιτεκτονική υψηλού επίπεδου για LTE
<u>Εικόνα 4.4</u>	Αρχιτεκτονική UMTS
<u>Εικόνα 4.5</u>	Carrier space and carrier spacing raster
<u>Εικόνα 4.6</u>	Επεξηγηματικό διάγραμμα της μάσκας εκπομπών ραδιοφάσματος για BS στο UMTS
<u>Εικόνα 5.1</u>	Σενάριο Ανάπτυξης του LTE
<u>Εικόνα 5.2</u>	Κάλυψη της αγροτικής περιοχής
<u>Εικόνα 5.3</u>	Κάλυψη της αστικής περιοχής
<u>Εικόνα 5.4</u>	Τα χαρακτηριστικά διάδοσης του φάσματος
<u>Εικόνα 5.5</u>	Ευρυζωνική ανάπτυξη 2005–2012

## Λίστα Πινάκων:

<u>Πίνακας 4.1</u>	Χαρακτηρίστηκα των UMTS στους δύο τρόπους λειτουργίας.
<u>Πίνακας 4.2</u>	Εκτιμημένη δύναμη παραγωγής BS.
<u>Πίνακας 4.3</u>	UE power classes.
<u>Πίνακας 4.4</u>	UTRA FDD ζώνες συχνοτήτων.
<u>Πίνακας 4.5</u>	Όρια EIRP για την προστασία της ραδιοφωνικής αναμετάδοσης (DTT) της υπηρεσίας.
<u>Πίνακας 5.1</u>	Σύγκριση των δικτύων εκπομπής DVB-T με τα κυβελοειδές LTE.
<u>Πίνακας 5.2</u>	Υποχρεώσεις χειριστών LTE [πηγή: GSA Information Paper “Evolution to LTE” – Δεκέμβριος 10, 2009].
<u>Πίνακας 5.3</u>	Κατηγορίες QoS UMTS.
<u>Πίνακας 5.4</u>	Οι κατηγορίες UMTS QoS και οι βασικές παράμετροι τους.

## Ακρωνύμια:

BS	Σταθμός Βάσης (Base Stations)
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing
CR	Σύστημα Γνωστικών Επικοινωνιών (Cognitive Radio)
DSA	Dynamic Spectrum Access
FCC	Ομοσπονδιακή Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών (Federal Communications Commission)
GPS	Παγκόσμιο Σύστημα Θεσιθεσίας
GSA	Global Mobile Suppliers Association (GSA)
GSC	Global Standards Collaboration
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
ITU	Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union)
QoS	Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service)
LTE	Long-Term Evolution
OFDM	Πολυπλεξία με Ορθογώνια Διαίρεση Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
UHF	Ultra high frequency
UWB	Ultra Wideband
PDA	Personal Digital Assistant
QoI	Ποιότητα Πληροφορίας (Quality of Information)
RKRL	Γλώσσα Αναπαράστασης Ασύρματης Γνώσης, (Radio Knowledge Representation Language)
SDR	Σύστημα τηλεπικοινωνιών Ορισμένο σε Λογισμικό (Software-Defined Radio)
SLA	Service Level Agreement
TDMA	Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση (Time Division Multiple Access)
TVWS	TV white space
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WLAN	Ασύρματο Τοπικό Δίκτυο (Wireless Local Area Network)
3GPP	3rd Generation Partnership Project



# 1. Εισαγωγή

Ο όρος Cognitive Radio (γνωσιακά δίκτυα) αρχικά αναφέρθηκε από τον Mitola και ουσιαστικά θέτει σε εφαρμογή διάφορους τρόπους για την αποδοτική αξιοποίηση φάσματος. Μια από τις πρώτες και σημαντικές εφαρμογές του Cognitive radio φαίνεται να είναι η δυναμική πρόσβαση φάσματος. Μέσω των διάφορων τεχνικών που χρησιμοποιεί το Cognitive radio μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε χρησιμοποίηση είτε διανομή φάσματος με ένα δυναμικό τρόπο. Ωστόσο είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ουσιαστικά το Cognitive radio θα λειτουργεί στο καλύτερο διαθέσιμο κανάλι και με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο.

Πιο συγκεκριμένα, το cognitive radio είναι μια αυτόνομη μονάδα σε ένα περιβάλλον επικοινωνιών όπου αρκετά συχνά ανταλλάσσει πληροφορίες με τα δίκτυα. Χαρακτηρίζεται από μια γνωστική ικανότητα σύμφωνα με την οποία η ραδιο-τεχνολογία έχει την ικανότητα να «αιχμαλωτίζει» τις πληροφορίες από το περιβάλλον. Φυσικά απαιτούνται προηγμένες τεχνικές προκειμένου να καταφέρει η γνωστική ικανότητα να συλλάβει τις χρονικές και χωρικές διαφοροποιήσεις στο περιβάλλον του ραδιοφώνου και να αποφευχθούν παρεμβολές με άλλους χρήστες. Τα τμήματα του φάσματος που είναι αχρησιμοποίητα μπορούν να καθοριστούν. Κατά συνέπεια μπορούν να επιλεγεί το καλύτερο φάσμα και οι κατάλληλοι παράμετροι λειτουργίας. Επιπλέον χαρακτηρίζεται από κάποιον επανασχεδιασμό όπου το cognitive radio μπορεί να προγραμματιστεί να λαμβάνει και να στέλνει σε μια ποικιλία συχνοτήτων με διαφορετικές τεχνολογίες μετάδοσης πρόσβασης. Έτσι ο αντικειμενικός σκοπός του cognitive radio είναι να αποκτήσει το βέλτιστο φάσμα μέσω των δύο χαρακτηριστικών του.

Επιπρόσθετα, αξίζει να αναφερθεί ότι η τεχνολογία cognitive radio παράγεται από την αξιοποίηση και τη χρησιμοποίηση των “white spaces” ή “spectrum holes”. Ο όρος “white space” χρησιμοποιείται από το FCC για το προσωρινά αχρησιμοποίητο τηλεοπτικό φάσμα. Ένα πλήθος από απαιτήσεις που λειτουργούν στα TV White Spaces βασίζονται στην τεχνολογία cognitive radio.

Τα TV White Spaces είναι μεγάλες μερίδες του φάσματος στις ζώνες UHF/VHF οι οποίες καθίστανται διαθέσιμες σε γεωγραφική βάση ως αποτέλεσμα της μετάβασης από την αναλογική στην ψηφιακή τηλεόραση. Φαίνεται ότι υπάρχει επίσης σημαντική διαθέσιμη χωρητικότητα για την γνωστική πρόσβαση στις ζώνες UHF. Ωστόσο όμως εξαιτίας της δευτερεύουσας φύσης του, η διαθεσιμότητα και η αποσύνθεση συχνότητας του UHF φάσματος για cognitive radio πρόσβαση δεν είναι το ίδιο σε όλες τις θέσεις και εξαρτάται από τα επίπεδα ισχύος που χρησιμοποιούνται από cognitive (γνωσιακές) συσκευές.

## 1.1 Αντικείμενο εργασίας

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η αξιοποίηση των δικτύων επόμενης γενιάς (CR) για την καλύτερη και αποδοτικότερη κατανομή φάσματος με στόχο τη βέλτιστη αξιοποίησή του. Έτσι στα πλαίσια αυτά μελετήθηκε η τεχνολογία cognitive radio και η παραγωγή της από την ανάγκη για πιο ευρύ φάσμα καθώς και ένα από τα σημαντικότερα συστήματα από τα οποία υπάρχουν για τα γνωσιακά δίκτυα, το πρότυπο IEEE 802.22. Στη συνέχεια μελετήθηκε πώς μπορούν να συνδυαστούν τα γνωσιακά δίκτυα με διαφορετικές τεχνολογίες όπως είναι τα συστήματα UMTS και LTE.

## 1.2 Διάρθρωση εργασίας

Στην πτυχιακή εργασία αυτή, στο 2ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η παρούσα κατάσταση στα γνωσιακά δίκτυα, οι τεχνολογίες των γνωσιακών δικτύων καθώς και ένα από τα σημαντικότερα πρωτόκολλα, το IEEE 802.22. Στη συνέχεια στο 3ο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των καθεστώτων που επικρατούν στην κατανομή φάσματος. Έπειτα στο 4ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συστήματα UMTS και LTE. Τέλος στο 5ο κεφάλαιο προτείνεται η επέκταση των συστημάτων UMTS και LTE στις συχνότητες TVWS έτσι ώστε να συνδυαστούν με τα γνωσιακά δίκτυα για μία βέλτιστη απόδοση και διαχείριση του φάσματος.

## 2. Παρούσα Κατάσταση

Ο όρος "Cognitive Radio" (γνωσιακά δίκτυα) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1999 σε ένα άρθρο από τους Joseph Mitola III και Gerald Q. Maguire, Jr [1]. Αργότερα, στη διδακτορική του διατριβή [2] ο Mitola περιέγραψε το Cognitive Radio ως "το σημείο όπου τα ασύρματα PDAs (Personal Digital Assistants) και τα σχετικά δίκτυα διαθέτουν αρκετή υπολογιστική ισχύ ώστε να γνωρίζουν για τους ασύρματους πόρους και την επικοινωνία από υπολογιστή σε υπολογιστή, με σκοπό να: ανιχνεύουν τις τηλεπικοινωνιακές ανάγκες του χρήστη σε συνάρτηση με το περιβάλλον χρήσης, και να παρέχουν ασύρματους πόρους και υπηρεσίες πλέον κατάλληλες για αυτές τις ανάγκες."

Ωστόσο, επειδή πρόκειται για μια καινούργια τεχνολογία που βρίσκεται ακόμα στο στάδιο της σύλληψης, είναι δύσκολο να βρεθεί ένας κοινά αποδεκτός ορισμός. Για παράδειγμα, η ομάδα Global Standards Collaboration (GSC) της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union – ITU) παρέχει έναν εναλλακτικό ορισμό [3]: *Cognitive Radio: Ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα που "αισθάνεται" και έχει συνείδηση του περιβάλλοντος στο οποίο λειτουργεί και μπορεί να εκπαιδευθεί ώστε να προσαρμόζει αναλόγως με δυναμικό και αυτόνομο τρόπο τις παραμέτρους λειτουργίας του.*

Τέλος, ο Simon Haykin αντιλαμβάνεται το Cognitive Radio ως [4] "ένα ευφρές ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα που είναι ενήμερο του περιβάλλοντός του (του έξω κόσμου) και χρησιμοποιεί τη μεθοδολογία "κατανόηση μέσω δόμησης" (understanding-by-building), για να μάθει από το περιβάλλον και να προσαρμόσει τις εσωτερικές του καταστάσεις στις στατιστικές μεταβολές των εισερχόμενων ηλεκτρομαγνητικών ερεθισμάτων, κάνοντας κατάλληλες αλλαγές σε συγκεκριμένες παραμέτρους λειτουργίας (π.χ. ισχύ εκπομπής, φέρουσα συχνότητα, και στρατηγική διαμόρφωσης) σε πραγματικό χρόνο, έχοντας υπ' όψη δύο βασικούς στόχους:

- Επικοινωνία υψηλής αξιοπιστίας όποτε και όπου χρειάζεται
- Αποδοτική χρησιμοποίηση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος."

Από μια πιο πρακτική σκοπιά, το Cognitive Radio μπορεί να θεωρηθεί ως η σύγκλιση των διάφορων βομβητών, PDAs, GPS, κινητών τηλεφώνων και πολλών άλλων συσκευών ειδικού σκοπού που χρησιμοποιούμε σήμερα. Όλα αυτά θα ενοποιηθούν μέσα στην επόμενη δεκαετία και θα μας εκπλήξουν με υπηρεσίες που μέχρι πρότινος ήταν διαθέσιμες μόνο σε λίγους εκλεκτούς, με την ασύρματη συνδεσιμότητα και το Internet να κάνουν τα πάντα πιο εύκολα. Ίσως όμως μπορούμε να κατανοήσουμε καλύτερα τη νέα αυτή τεχνολογία εξετάζοντας τις ιδιότητες που τη διέπουν [7].

### 2.1 Χαρακτηριστικά του Cognitive Radio

Ήδη, από τους παραπάνω ορισμούς γίνεται εμφανής η σημασία τριών εννοιών: *Συνείδηση, Προσαρμοστικότητα, Εκπαίδευση*. Πράγματι, για να θεωρηθεί ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα ως *cognitive* (γνωστικό) θα πρέπει να γνωρίζει το περιβάλλον του (aware), να μπορεί να προσαρμόζεται σε αυτό με βάση τις ανάγκες του χρήστη (adaptive) και να είναι ικανό να μαθαίνει καινούργιες συμπεριφορές μέσω αυτόνομων μηχανισμών μάθησης (machine learning). Σε αυτή την ενότητα επιχειρούμε να εξηγήσουμε αναλυτικότερα τι σημαίνουν αυτές οι έννοιες σε σχέση με το Cognitive Radio.

## 2.1.1 Συνείδηση (aware)

Το Cognitive Radio διαθέτει πλήθος αισθητήρων ήχου, εικόνας, θέσης, συχνότητας κτλ., όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1:



Εικόνα 2.1: Η σουίτα αισθητήρων του Cognitive Radio [2].

Όλοι αυτοί οι αισθητήρες επιτρέπουν στο Cognitive Radio να συλλέξει πληροφορίες για το περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί. Για παράδειγμα, το ραδιοφάσμα μπορεί να ανιχνεύεται προς αναζήτηση εκτιμήσεων του καναλιού, παρεμβολών ή σημάτων ενδιαφέροντος. Ηχητικές εισοδοί μπορούν να χρησιμοποιούνται για ταυτοποίηση χρήστη ή ακόμα και κατανόηση φυσικής γλώσσας ή ακουστικές διεπαφές ανθρώπου – μηχανής. Φυσικά, παρόμοιους αισθητήρες, π.χ. κάμερες διαθέτουν και τα σημερινά κινητά τηλέφωνα.

Αυτό δε σημαίνει όμως ότι αντιλαμβάνονται τη σκηνή που "βλέπουν". Το κλειδί για να θεωρηθεί ένα σύστημα "aware" είναι να χρησιμοποιεί την πληροφορία που λαμβάνει μέσω των αισθητήρων του για να ικανοποιήσει επιπλέον ανάγκες του χρήστη (πέρα από απλή επικοινωνία) ή, με άλλα λόγια να εμπλουτίσει το *QoI* (Quality of Information – Ποιότητα Πληροφορίας) [5]. Προκειμένου να αποσαφηνιστεί η προηγούμενη πρόταση, ας θεωρήσουμε για παράδειγμα ένα κινητό που διαθέτει έναν ενσωματωμένο δέκτη GPS. Αν το κινητό εμφανίζει απλώς το γεωγραφικό μήκος και πλάτος, η κατάσταση είναι ισοδύναμη με εκείνη όπου ο χρήστης διαθέτει μία ξεχωριστή συσκευή GPS. Αν επιπλέον το κινητό βοηθά το χρήστη με πλοήγηση GPS ή εμφανίζει μια λίστα με εστιατόρια εντός μιας προκαθορισμένης γεωγραφικής ακτίνας, τότε λέμε ότι το κινητό είναι ενήμερο της θέσης του.

Επιπλέον, το Cognitive Radio έχει *αυτο-επίγνωση*, διαθέτει δηλαδή ένα υπολογιστικό μοντέλο του εαυτού του – της δικής του υλικής και λογισμικής δομής. Για την υπολογιστική περιγραφή του Cognitive Radio έχει προταθεί από τον Mitola [1] μία *Γλώσσα Αναπαράστασης Ασύρματης Γνώσης* (Radio Knowledge Representation Language – RKRL), η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης από το δίκτυο, για να κάνει ερωτήσεις προς οποιοδήποτε συσκευή που υποστηρίζει τη γλώσσα και να μάθει π.χ. πόσους συντελεστές έχει ο ισοσταθμιστής που χρησιμοποιεί (και κατά συνέπεια πόσα διακριτά μονοπάτια "βλέπει" η συσκευή στο ασύρματο κανάλι).

Η αυτο-επίγνωση επιτρέπει στο Cognitive Radio να τροποποιεί με ευελιξία λειτουργικά τμήματα του εαυτού του ανταποκρινόμενο στις ανάγκες του χρήστη, το βοηθά δηλαδή να επιδεικνύει προσαρμοστικότητα [7].

## 2.1.2 Προσαρμοστικότητα (adaptive)

Η φέρουσα συχνότητα, το στιγμιαίο εύρος ζώνης, το σχήμα διαμόρφωσης, ο κώδικας διόρθωσης σφαλμάτων, οι τεχνικές άμβλυνσης του καναλιού όπως οι ισοσταθμιστές ή τα φίλτρα RAKE, ο

χρονισμός του συστήματος (π.χ., ένα σχήμα Πολλαπλής Πρόσβασης με Διαίρεση Χρόνου – Time Division Multiple Access ή TDMA), ο ρυθμός δεδομένων, η ισχύς εκπομπής, ακόμα και τα χαρακτηριστικά ενός φίλτρου αποτελούν παραμέτρους λειτουργίας που μπορούν να είναι προσαρμοστικές. Ένα σύστημα επικοινωνίας διάχυτου φάσματος με μεταπήδηση συχνότητας (frequency-hopping spread-spectrum radio) δε θεωρείται προσαρμοστικό διότι αφού προγραμματιστεί για μία ακολουθία μεταπήδησης συχνότητας, δεν αλλάζει. Ένα frequencyhopping σύστημα που αλλάζει ακολουθίες μεταπήδησης για να μειώσει το ρυθμό συγκρούσεων μπορεί να θεωρηθεί προσαρμοστικό. Ένα σύστημα που υποστηρίζει πολλαπλά εύρη ζώνης δεν είναι προσαρμοστικό, ένα σύστημα όμως που μεταβάλλει το στιγμιαίο εύρος ζώνης και/ή το χρονισμό του σαν συνάρτηση του φορτίου του δικτύου μπορεί να θεωρηθεί προσαρμοστικό. Με άλλα λόγια, ένα σύστημα που ανταποκρίνεται στις εκάστοτε συνθήκες μεταβάλλοντας τις παραμέτρους λειτουργίας του *χωρίς να έχει προγραμματιστεί εκ των προτέρων για αυτό* έχει την ιδιότητα της προσαρμοστικότητας, όπως την εννοούμε για ένα Cognitive Radio [7].

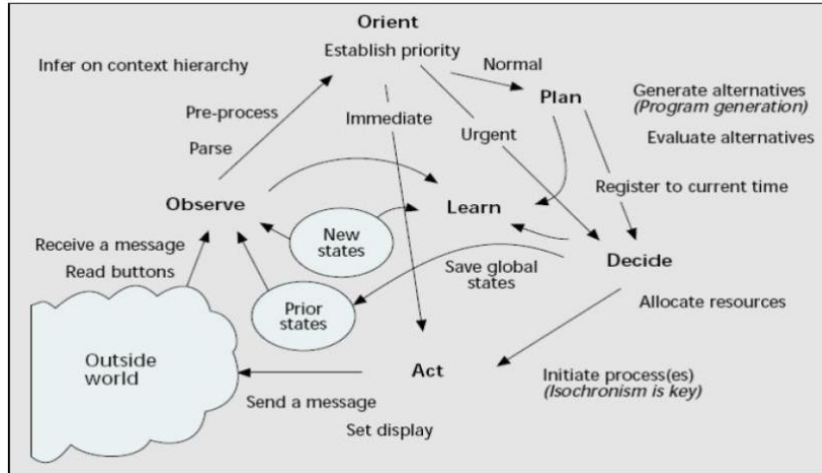
### 2.1.3 Μάθηση (machine learning)

Εφ' όσον απαιτούμε από το CR (Cognitive Radio) να μεταβάλλει τον εαυτό του με μη προκαθορισμένο τρόπο, εξυπακούεται ότι αυτό πρέπει να είναι εφοδιασμένο με ένα μηχανισμό μάθησης. Η μάθηση περιλαμβάνει την ικανότητα του συστήματος να αναλύει τα δεδομένα που εισέρχονται στους αισθητήρες, να αναγνωρίζει μοτίβα και να τροποποιεί τις εσωτερικές προδιαγραφές συμπεριφοράς με βάση την επακόλουθη ανάλυση της νέας κατάστασης.

Το CR μπορεί να μαθαίνει με ή χωρίς επίβλεψη. Στη μάθηση με επίβλεψη, η διαδικασία μπορεί να πάρει τη μορφή ενός διαλόγου μεταξύ του χρήστη και του συστήματος, όπου το σύστημα αναπτύσσει ένα νέο ισχυρισμό ή ένα νέο μοντέλο συμπεριφοράς και στη συνέχεια ζητά επιβεβαίωση από το χρήστη ότι το συμπέρασμα που εξήγαγε είναι σωστό. Από την άλλη πλευρά, το σύστημα μπορεί να επεκτείνει τη γνώση του μέσω του αλγορίθμου μάθησης και απλώς να προσθέσει τη νέα γνώση στη βάση ισχυρισμών και συμπεριφορών του. Το πρόβλημα με την *αυτόνομη μάθηση μηχανής* (autonomous machine learning – AML) είναι ότι η διαδικασία μάθησης μπορεί να οδηγήσει σε πολλές λανθασμένες επιλογές προτού αναπτυχθεί ένα εφικτό μονοπάτι απόφασης. Για αυτό το λόγο είναι πολύ πιθανό να υπάρχει κάποιος περιορισμός στο βαθμό που ένα CR θα μπορεί να μεταβάλλει τη συμπεριφορά του χωρίς εξωτερική παρέμβαση και επαλήθευση [7].

### 2.1.4 Ο Κύκλος της Γνώσης

Η λειτουργία του CR χαρακτηρίζεται από τον Κύκλο της Γνώσης που εισήγαγε ο Mitola:



Εικόνα 2.2: Ο Κύκλος της Γνώσης [2].

Στον κύκλο αυτό διακρίνονται έξι βασικά στάδια: Παρατήρηση (Observe), Προσανατολισμός (Orient), Σχεδιασμός (Plan), Απόφαση (Decide), Δράση (Act) και Μάθηση (Learn).

### 2.1.4.1 Παρατήρηση

Το CR παρατηρεί το περιβάλλον του αναλύοντας τα εισερχόμενα ερεθίσματα. Το CR συσχετίζει τους αισθητήρες θέσης, θερμοκρασίας, φωτεινότητας και ούτω καθ' εξής για να συμπεράνει το γενικό τηλεπικοινωνιακό πλαίσιο. Αυτή η φάση συνδέει αυτά τα ερεθίσματα με προηγούμενες εμπειρίες με σκοπό να ανακαλύψει μοτίβα σε βάθος χρόνου. Το CR συγκεντρώνει εμπειρίες με το να “θυμάται” τα πάντα. Ολόκληρη η πληροφορία ήχου, τα e-mail, οι τηλεπικοινωνιακές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί ο χρήστης σε διάστημα ενός χρόνου καταλαμβάνουν μερικές εκατοντάδες gigabytes, ανάλογα με το επιθυμητό επίπεδο λεπτομέρειας. Επομένως, η αρχιτεκτονική μνήμης και ταχείας συσχέτισης της τρέχουσας εμπειρίας με όλες τις προηγούμενες είναι μία κεντρική ικανότητα του CR [7].

### 2.1.4.2. Προσανατολισμός

Η φάση προσανατολισμού καθορίζει την σπουδαιότητα μιας παρατήρησης συνδέοντας την παρατήρηση με ένα σύνολο ερεθισμάτων γνωστό εκ των προτέρων, ή αλλιώς μια <Σκηνή/>. Όταν υπάρχει απόλυτο ταίριασμα ανάμεσα στην τρέχουσα παρατήρηση και την προηγούμενη εμπειρία, έχουμε *αναγνώριση ερεθίσματος*. Η επακόλουθη αντίδραση μπορεί να είναι είτε σωστή είτε λανθασμένη. Κάθε ερέθισμα ανήκει σε ένα ευρύτερο πλαίσιο, το οποίο περιλαμβάνει πρόσθετα ερεθίσματα και σχετικές εσωτερικές καταστάσεις συμπεριλαμβανομένου του χρόνου. Μερικές φορές, η φάση προσανατολισμού προκαλεί την άμεση εκκίνηση μιας ενέργειας ως ένα είδος αντανάκλαστικής συμπεριφοράς. Μια ξαφνική απώλεια ηλεκτρικής ισχύος, για παράδειγμα, θα μπορούσε να προκαλέσει την άμεση αποθήκευση των δεδομένων του χρήστη (το “Immediate” μονοπάτι προς την φάση “Act” στην εικόνα). Μία μη αντιμετωπίσιμη απώλεια σήματος σε ένα δίκτυο θα προκαλούσε επανεκχώρηση πόρων, για παράδειγμα, από την ανάλυση φωνής ως την αναζήτηση εναλλακτικών καναλιών. Αυτό αντιστοιχεί στο μονοπάτι “Urgent” στην εικόνα. Η σύνδεση συμβαίνει όταν υπάρχει ένα σχεδόν πλήρες ταίριασμα μεταξύ του παρόντος συνόλου ερεθισμάτων και μιας προηγούμενης εμπειρίας, ενώ ταυτόχρονα ισχύουν κάποια πολύ γενικά κριτήρια για την εφαρμογή της προηγούμενης εμπειρίας στην τρέχουσα κατάσταση. Ένα τέτοιο κριτήριο είναι το πλήθος των μη-αντιστοιχισμένων χαρακτηριστικών

στην παρούσα σκηνή. Αν ένα μόνο χαρακτηριστικό δεν ταιριάζει, τότε η σύνδεση μπορεί να είναι το πρώτο βήμα στο σχεδιασμό μιας συμπεριφοράς παρόμοιας με τη συμπεριφορά στην πιο πρόσφατη συγκρίσιμη σκηνή [7].

#### **2.1.4.3. Σχεδιασμός**

Τα περισσότερα ερεθίσματα αντιμετωπίζονται με προμελετημένο τρόπο παρά αντανακλαστικά. Ένα εισερχόμενο μήνυμα από το δίκτυο θα αντιμετωπιζόταν με τη δημιουργία ενός σχεδίου (το κανονικό μονοπάτι). Τυπικά, οι ανακλαστικές αντιδράσεις είναι προγραμματισμένες εκ των προτέρων ή μαθαίνονται μέσω ρητών εντολών του χρήστη, ενώ οι υπόλοιπες προμελετημένες αντιδράσεις εκτελούνται μέσω σχεδίου. Σχεδιαστικά εργαλεία όπως το OPRS (Open Procedural Reasoning System) επιτρέπουν τη σύνθεση συμπεριφορών πρόσβασης στο φάσμα και στην πληροφορία με βάση την αντίληψη του περιβάλλοντος, τους κανόνες της μηχανής μάθησης και τις προτιμήσεις του χρήστη που έχουν γίνει γνωστές από προηγούμενη χρήση [7].

#### **2.1.4.4. Απόφαση**

Η φάση απόφασης διαλέγει ανάμεσα στα υποψήφια σχέδια. Το CR θα μπορούσε να ειδοποιήσει το χρήστη για ένα εισερχόμενο μήνυμα ή να αναβάλει τη διακοπή για αργότερα (ενεργώντας όπως ένας γραμματέας που “φιλτράρει” τις κλήσεις κατά τη διάρκεια μίας σημαντικής συνάντησης). Η απόφαση θα βασιζόταν σε μετρικές του QoI για την τρέχουσα σκηνή [7].

#### **2.1.4.5. Δράση**

Αυτή η φάση ξεκινά τις επιλεγμένες διαδικασίες χρησιμοποιώντας ενεργοποιητές που προσπελαίνουν τον έξω κόσμο ή τις εσωτερικές καταστάσεις του CR. Πρόσβαση στον έξω κόσμο σημαίνει κυρίως τη σύνθεση μηνυμάτων, είτε προφορικών που απευθύνονται στο τοπικό περιβάλλον είτε γραπτών που απευθύνονται σε ένα άλλο CR ή σε ένα CN (Cognitive Network), γραμμένων σε RKRL, RXML (Radio XML) ή σε κάποιο άλλο πρότυπο ανταλλαγής γνώσης. Η δράση πάνω σε εσωτερικές καταστάσεις περιλαμβάνει τον έλεγχο πόρων όπως τα ασύρματα κανάλια [7].

#### **2.1.4.6. Μάθηση**

Αρχικά η μάθηση εξυπηρετείται από τη φάση παρατήρησης όπου η πληροφορία από τους αισθητήρες συσχετίζεται με όλη την προηγούμενη εμπειρία. Κατόπιν το CR μαθαίνει καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου, δηλαδή από το σχεδιασμό, από τις αποφάσεις και από τη δημιουργία νέων καταστάσεων που ενσωματώνονται στην ήδη αποθηκευμένη γνώση. Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι το cognitive radio επιδεικνύει την ικανότητα επαναδιάρθρωσης της δομής και της λειτουργίας του. Δεν είναι τυχαία λοιπόν η σχεδόν καθολική θεώρηση ότι το cognitive radio χτίζεται πάνω στην πλατφόρμα του *Software Radio*. Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζεται μια αναδρομή στην τεχνολογία που αποτέλεσε τον πρόγονο του Cognitive Radio [7].

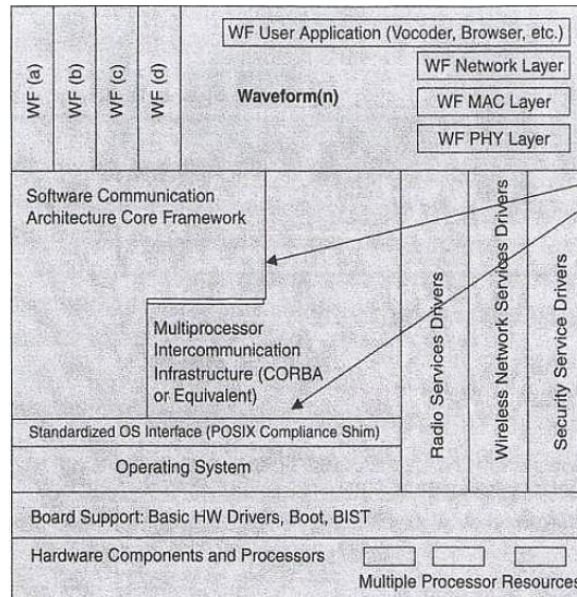
## 2.2 Software Radio: Ο πρόδρομος του Cognitive Radio

Ένα Software Radio ή, αλλιώς, Software-Defined Radio (SDR) είναι ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα του οποίου οι ιδιότητες της φέρουσας συχνότητας, του εύρους ζώνης, της διαμόρφωσης και της δικτυακής πρόσβασης ορίζονται όλες σε λογισμικό [3]. Τα σημερινά SDR υλοποιούν επίσης την απαραίτητη κρυπτογράφηση, κωδικοποίηση πρόσθιας διόρθωσης σφαλμάτων (Forward Error Correction – FEC) και κωδικοποίηση πηγής για φωνή, video ή δεδομένα σε λογισμικό. Είναι ενδιαφέρον ότι ο όρος “software radio” επινοήθηκε επίσης από τον J. Mitola III το 1992 [6]. Οι ρίζες του SDR βρίσκονται πίσω στο 1987, όταν τα εργαστήρια Air Force Rome Labs (AFRL) χρηματοδότησαν την ανάπτυξη ενός προγραμματιζόμενου modem σαν ένα επαναστατικό βήμα πέρα από την Αρχιτεκτονική Ολοκληρωμένων Επικοινωνιών, Πλοήγησης και Ταυτοποίησης (Integrated Communications, Navigation and Identification Architecture – ICNIA). Η ICNIA ήταν μια συλλογή διαφόρων ασύρματων συστημάτων ειδικού σκοπού σε ένα κουτί. Το σημερινό SDR, αντίθετα, είναι μία συσκευή γενικού σκοπού στην οποία ο ίδιος δέκτης και οι ίδιοι επεξεργαστές χρησιμοποιούνται για να υλοποιήσουν πολλές κυματομορφές σε πολλές συχνότητες. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι ο εξοπλισμός είναι πιο ευπροσάρμοστος και οικονομικός. Επιπλέον, μπορεί να αναβαθμιστεί με καινούργιο λογισμικό για νέες κυματομορφές και εφαρμογές μετά την πώληση, παράδοση και εγκατάσταση. Μετά το προγραμματιζόμενο modem, η AFRL και η DARPA (Defence Advanced Research Projects Agency) χρηματοδότησαν από κοινού τα προγράμματα SPEAKeasy I και SPEAKeasy II.

Το SPEAKeasy I (1990) ήταν μια ογκώδης συσκευή ύψους 1,80 μ., αλλά απέδειξε ότι ήταν δυνατή η κατασκευή ενός ασύρματου συστήματος προγραμματιζόμενου εξ' ολοκλήρου σε λογισμικό. Περιείχε επίσης ένα ολοκληρωμένο κρυπτογράφησης προγραμματιζόμενο σε λογισμικό. Το SPEAKeasy II (1997) ήταν ένα πλήρες σύστημα σε πρακτικό μέγεθος, και ήταν το πρώτο SDR που περιείχε προγραμματιζόμενο κωδικοποιητή φωνής (vocoder), και επαρκείς πόρους αναλογικής και ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (DSP) ώστε να χειρίζεται πολλά διαφορετικά είδη κυματομορφών. Το SPEAKeasy II εξελίχτηκε κατόπιν στο Digital Modular Radio (DMR) του αμερικανικού ναυτικού, το οποίο ήταν ένα full duplex SDR τεσσάρων καναλιών, με πολλές κυματομορφές και πολλούς τρόπους λειτουργίας, ικανό να ελέγχεται απομακρυσμένα μέσω Ethernet διεπαφής και ενός SNMP πρωτοκόλλου (Simple Network Management Protocol).

Στη βασική αρχιτεκτονική λογισμικού ενός σύγχρονου SDR (Εικόνα 2-3), οι διεπαφές προγραμματισμού εφαρμογών (Application Programming Interfaces – APIs) ορίζονται έτσι ώστε να εξασφαλίσουν τη μεταφερσιμότητα του λογισμικού σε διάφορες πλατφόρμες υλικού, και παράλληλα να εξασφαλίσουν ότι η βασική υποδομή λογισμικού υποστηρίζει μια μεγάλη ποικιλία κυματομορφών χωρίς να χρειάζεται να γραφτεί ξανά για κάθε κυματομορφή ή εφαρμογή. Επειδή το SDR αναμένεται να μπορεί να υποστηρίζει πολλές κυματομορφές και να αλληλεπιδρά με πολλά δίκτυα, είναι συνηθισμένο να έχει μία βιβλιοθήκη κυματομορφών και πρωτοκόλλων.





Εικόνα 2.3: Βασική αρχιτεκτονική λογισμικού ενός σύγχρονου SDR [3].

Το SDR Forum ιδρύθηκε το 1996 από τον Wayne Bonser της AFRL, με σκοπό να αναπτύξει βιομηχανικά πρότυπα για το υλικό και το λογισμικό του SDR που θα εξασφάλιζαν όχι μόνο ότι το λογισμικό μεταφέρεται σε διάφορες πλατφόρμες υλικού, αλλά και ότι αυτό ορίζει τυποποιημένες διεπαφές προκειμένου να διευκολύνει την ενσωμάτωση εξαρτημάτων λογισμικού από πολλαπλούς παρόχους υλικού. Το SDR Forum είναι πλέον ένας κύριος παράγοντας επιρροής στη βιομηχανία του SDR, ασχολούμενο όχι μόνο με την τυποποίηση των διεπαφών λογισμικού αλλά και πολλά άλλα θέματα τεχνολογίας από εργαλεία, ολοκληρωμένα, μέχρι τις εφαρμογές, το cognitive radio και την αποδοτικότητα φάσματος. Το SDR Forum έχει αυτή τη στιγμή μια ομάδα εργασίας για το Cognitive Radio (Cognitive Radio Working Group), που ετοιμάζει άρθρα που θα προωθήσουν την αποδοτική χρησιμοποίηση του φάσματος και τις εφαρμογές του cognitive radio. Το SDR Forum αντιμετωπίζει το cognitive radio σα μια εφαρμογή που μπορεί να προστεθεί στο SDR. Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να αρχίσουμε να θεωρούμε το SDR σαν τη βασική πλατφόρμα πάνω στην οποία θα χτίσουμε τις περισσότερες νέες εφαρμογές του Cognitive Radio [7].

## 2.3 Απαιτούμενες τεχνολογίες για το Cognitive Radio

Η θεμελίωση του CR πάνω σε μια SDR πλατφόρμα δεν είναι κάτι που απαιτείται, ωστόσο είναι σίγουρα μία πρακτική προσέγγιση αυτή τη στιγμή επειδή η ευελιξία του SDR επιτρέπει στους προγραμματιστές να τροποποιούν υπάρχοντα συστήματα με λίγη ή καθόλου ανάπτυξη νέου υλικού, καθώς επίσης και να προσθέτουν γνωστικές (cognitive) δυνατότητες. Η αυξανόμενη διαθεσιμότητα SDR συστημάτων αποτελεί καταλύτη για την ανάπτυξη του Cognitive Radio. Τα αναγκαία χαρακτηριστικά ενός SDR για την ανάπτυξη ενός πρακτικού CR συστήματος είναι οι άφθονοι υπολογιστικοί πόροι, η ελεγχσιμότητα των παραμέτρων λειτουργίας του συστήματος, η οικονομική προσιτότητα, και εύχρηστα περιβάλλοντα ανάπτυξης λογισμικού συμπεριλαμβανομένων κάποιων τυποποιημένων APIs. Αυτή η ενότητα παρουσιάζει μερικές ακόμα τεχνολογίες που είναι ήδη διαθέσιμες και ωθούν την εξέλιξη του Cognitive Radio [7].

### 2.3.1 Εντοπισμός θέσης

Ο εντοπισμός θέσης είναι μια σημαντική τεχνολογία για το CR, χάρη στην ευρεία γκάμα εφαρμογών που μπορούν να προκύψουν όταν το σύστημα είναι ενήμερο της θέσης του και πιθανόν της προσχεδιασμένης διαδρομής και του προορισμού του. Το GPS είναι ένα δορυφορικό σύστημα που χρησιμοποιεί τη διαφορά των χρόνων άφιξης (Time Difference of Arrival – TDoA) για να εντοπίσει ένα δέκτη. Η ακρίβεια του GPS είναι περίπου 100 m. Οι δέκτες GPS περιλαμβάνουν τυπικά ένα σήμα ενός-παλμού-το-δευτερόλεπτο, το οποίο φιλτράρεται από ένα φίλτρο Kalman όταν φθάνει σε κάθε κινητό από κάθε δορυφόρο, με αποτέλεσμα μία υψηλής ακρίβειας εκτίμηση της καθυστέρησης διάδοσης από κάθε δορυφόρο ανεξαρτήτως θέσης. Αντισταθμίζοντας κάθε παλμό με την προβλεπόμενη καθυστέρηση διάδοσης, οι δέκτες GPS μπορούν να εκτιμήσουν το χρόνο με απόκλιση 340 ns. Όταν η χρήση GPS σημάτων δεν είναι εφικτή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν προσεγγίσεις τριγωνοποίησης για τον εντοπισμό ενός κινητού από συνεργαζόμενους ή μη συνεργαζόμενους πομπούς. Εδώ ανήκουν οι κλασικές τεχνικές με βάση τη διαφορά των χρόνων άφιξης (TDoA), τους χρόνους άφιξης (Time of Arrival – ToA) και, αν το υλικό το επιτρέπει, τις γωνίες άφιξης (Angle of Arrival – AoA). Απαιτούνται πολλαπλές μετρήσεις από πολλές θέσεις για την παραγωγή μιας ακριβούς εκτίμησης της θέσης. Η κυκλική πιθανότητα σφάλματος (Circular Error Probability – CEP) χαρακτηρίζει την ακρίβεια της εκτίμησης [7].

### 2.3.2 Επίγνωση φάσματος

Ένα σύστημα που γνωρίζει για την κατάληψη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μπορεί να εκμεταλλευτεί αυτή την πληροφορία προς όφελός του, π.χ. χρησιμοποιώντας τις ελεύθερες συχνότητες με τη λογική της μη-παρεμβολής. Ένας απλός ανιχνευτής μοιάζει με έναν αναλυτή φάσματος. Οι διαφορές είναι στην ποιότητα και την ταχύτητα. Η CR εφαρμογή πρέπει να λάβει υπ' όψη της την ποιότητα του ανιχνευτή σε σχέση με παραμέτρους όπως ο μέγιστος χρόνος εκκένωσης της μπάντας σε περίπτωση χρήσης από κάποιο δικαιούχο χρήστη. Ο ανιχνευτής επιλέγει μια μπάντα ενδιαφέροντος και την επεξεργάζεται προκειμένου να διαπιστώσει την παρουσία σημάτων πάνω από το επίπεδο του θορύβου. Το ενεργειακό κατώφλι στο οποίο μια μπάντα ανακηρύσσεται κατειλημμένη είναι μία κρίσιμη παράμετρος. Η λαμβανόμενη ενέργεια είναι συνάρτηση της στιγμιαίας ισχύος, του στιγμιαίου εύρους ζώνης και του κύκλου εργασίας (duty cycle). Ο κύκλος εργασίας αναμένεται να είναι απρόβλεπτος. Η κατοχή του φάσματος μεταβάλλεται στο χώρο, στο χρόνο, και επηρεάζεται από εμπόδια στην παρατήρηση (π.χ. μια βαθιά εξασθένηση μπορεί να δώσει μια κακής ποιότητας παρατήρηση). Για αυτό το λόγο, είναι συχνά επιθυμητή μια *κατανεμημένη προσέγγιση* στην ανίχνευση φάσματος. Το κύριο πρόβλημα που σχετίζεται με την επίγνωση του φάσματος είναι το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού. Ένας ενεδρεύων δέκτης (το καλύτερο παράδειγμα είναι ένας τηλεοπτικός δέκτης) μπορεί να υπόκειται σε παρεμβολή από το CR και δεν είναι σε θέση να το ενημερώσει για αυτό. Οι ρυθμιστές, οι ιδιοκτήτες φάσματος και οι κατασκευαστές των CR δουλεύουν για να βρουν εύρωστες λύσεις στο πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού. Πάλι, μια συνεργατική προσέγγιση μπορεί να βοηθήσει στην καταπολέμηση του προβλήματος αν και δεν εγγυάται την πλήρη εξάλειψή του. Εκτός από τη γνώση των κατειλημμένων και των ελεύθερων περιοχών του φάσματος, πιθανόν να είναι επιθυμητό για ένα CR να μπορεί επίσης να αναγνωρίζει τα χαρακτηριστικά της κυματομορφής και να καθορίζει τον τύπο της διαμόρφωσης, αποκτώντας έτσι τη δυνατότητα να ζητήσει τη σύνδεσή του σε ένα τοπικό δίκτυο. Μόλις αναγνωριστεί η διαμόρφωση, το CR μπορεί να επιλέξει την κατάλληλη κυματομορφή και τη στοιβα πρωτοκόλλων που πρέπει να χρησιμοποιήσει για να ζητήσει άδεια σύνδεσης στο δίκτυο [7].

### 2.3.3 Βιομετρία

Ένα CR μπορεί να μάθει την ταυτότητα του χρήστη του μέσω βιομετρικών αισθητήρων. Αυτή η γνώση μπορεί να αποτρέψει τη χρήση από μη εξουσιοδοτημένους χρήστες. Τα περισσότερα συστήματα έχουν ήδη αισθητήρες (π.χ. μικρόφωνο) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια βιομετρική εφαρμογή. Η συσχέτιση του αποτυπώματος φωνής είναι δυνατόν να επιτευχθεί σήμερα ως επέκταση σε ένα SDR. Φυσικά, αυτό επιβάλλει συγκεκριμένες απαιτήσεις στο σύστημα ως προς την ποιότητα της σύλληψης φωνής και την ικανότητα επεξεργασίας σήματος. Σε ένα άλλο σενάριο, το σύστημα-πηγή μπορεί να ταυτοποιήσει το χρήστη και να προσθέσει τη (γνωστή) ταυτότητα στο ρεύμα δεδομένων. Στην πλευρά του προορισμού, η αποκωδικοποιημένη φωνή αναλύεται για να διαπιστωθεί η ταυτότητα του αποστολέα. Υπάρχουν και άλλοι αισθητήρες βιομετρίας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές ταυτοποίησης και ελέγχου πρόσβασης σε ένα CR. Οι παραδοσιακές συσκευές μπορούν να τροποποιηθούν έτσι ώστε να συλλαμβάνουν τις απαραίτητες εισόδους για πλεονάζουσα βιομετρική ταυτοποίηση. Για παράδειγμα, τα κινητά τηλέφωνα είναι πλέον εφοδιασμένα με κάμερες. Αυτός ο αισθητήρας, σε συνδυασμό με λογισμικό αναγνώρισης προσώπου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ταυτοποιήσει το χρήστη. Η σάρωση της ίριδος ή του αμφιβληστροειδούς είναι επίσης πιθανή. Άλλες τεχνολογίες περιλαμβάνουν τη σάρωση παλάμης, τη γεωμετρία του χεριού, δακτυλικά αποτυπώματα, αναγνώριση γραφικού χαρακτήρα, χαρακτηριστικά πληκτρολόγησης κ.τ.λ. [7].

### 2.3.4 Χρόνος

Ακόμα και ένας επιτραπέζιος υπολογιστής γνωρίζει την ώρα και την ημερομηνία, και ξέρει να αξιοποιεί αυτή την πληροφορία με χρήσιμο τρόπο (π.χ. αποτύπωση ημερομηνίας και ώρας σε ένα έγγραφο). Ένα σύστημα επικοινωνίας που αγνοεί την έννοια του χρόνου αντιμετωπίζει δυσκολίες στο να μάθει πώς να αλληλεπιδρά και πώς να συμπεριφέρεται. Επομένως, είναι σημαντικό για το CR να γνωρίζει πράγματα όπως η ώρα, η ημερομηνία, τα χρονοδιαγράμματα και οι προθεσμίες. Η πληροφορία του χρόνου δίνει τη δυνατότητα πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiplexing – TDM) σε μικρή κλίμακα, ή ακόμα και σε μεγάλη κλίμακα αν η ακρίβεια της χρονικής πληροφορίας το επιτρέπει. Διαφορετικές πολιτικές μπορούν να ισχύουν ανάλογα με την ώρα της ημέρας. Επιπλέον, η πολύ ακριβής γνώση του χρόνου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές εντοπισμού θέσης. Οι συσκευές GPS αναφέρουν την ώρα της ημέρας και παρέχουν ένα σήμα ενός παλμού το δευτερόλεπτο. Αυτό το ειδικό σήμα εκπέμπεται από τους δορυφόρους, αλλά δε φθάνει σε κάθε GPS δέκτη την ίδια χρονική στιγμή επειδή ακολουθεί διαφορετικού μήκους μονοπάτια. Ο σωστά σχεδιασμένος δέκτης θα εκτιμήσει την καθυστέρηση διάδοσης από κάθε δορυφόρο και θα αντισταθμίσει αυτές τις καθυστερήσεις, έτσι ώστε το σήμα να είναι συγχρονισμένο σε κάθε δέκτη με απόκλιση μόλις 340 ns. Ένα τέτοιο επίπεδο ακρίβειας είναι αρκετό για πολλές εφαρμογές, όπως φιλτράρισμα πολιτικών και αλλαγή κρυπτογραφικών κλειδιών. Ο τοπικός ταλαντωτής σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρακολουθεί τις αλλαγές της ώρας. Η σταθερότητα αυτών των ρολογιών μετριέται περίπου στο 10<sup>-6</sup>. Αυτά τα ρολόγια τείνουν να αποκλίνουν με την πάροδο του χρόνου, και μέσα σε μία μέρα είναι δυνατό να συσσωρευθεί ένα λάθος της τάξης των 90 ns. Τα ατομικά ρολόγια έχουν πολύ μεγαλύτερη σταθερότητα (10<sup>-11</sup>), αλλά είναι μεγάλα σε μέγεθος και ενεργοβόρα. Ωστόσο, ατομικά ρολόγια σε κλίμακα ολοκληρωμένου έχουν κάνει την εμφάνισή τους και πρόκειται να καταστήσουν την ακριβή μέτρηση του χρόνου πρακτική. Αυτό με τη σειρά του θα επιτρέψει την ανάπτυξη εφαρμογών εντοπισμού θέσης με χαμηλότερη κυκλική πιθανότητα σφάλματος [7].

### 2.3.5 Επίγνωση κατάστασης

Ένας πολύ σημαντικός ρόλος που καλείται να παίξει το CR είναι αυτός του προσωπικού βοηθού. Ως τέτοιος, μία από τις κρίσιμες αποστολές του είναι να διευκολύνει την επικοινωνία μέσω ασύρματων δικτύων. Η αντίθετη αποστολή είναι η παρεμπόδιση της επικοινωνίας όταν αυτό είναι αναγκαίο. Για παράδειγμα, οι περισσότεροι άνθρωποι δεν θέλουν να ενοχλούνται όταν βρίσκονται σε μια εκκλησία ή σε μία σημαντική συνάντηση, ή στην αίθουσα διδασκαλίας. Ένα CR θα μπορούσε να μάθει να ταξινομεί την κατάστασή του σε "διακοπτόμενη από χρήστη" και "μη διακοπτόμενη από χρήστη". Ένα σύστημα που δέχεται ακουστικές εισόδους μπορεί να ταξινομήσει μια συζήτηση μακράς διάρκειας κατά την οποία μόνο ένα πρόσωπο μιλά κάθε φορά ως "συνάντηση" ή "τάξη" και αυτόνομα να θέσει τον εαυτό του σε προφίλ "μόνο-δόνηση". Αν το σύστημα ανιχνεύσει ότι ο χρήστης του μιλά συνεχώς ή ακόμα και για το 50% του χρόνου, μπορεί αυτόνομα να απενεργοποιήσει το προφίλ δόνησης [7].

## 2.4 Τεχνολογίες Γνωσιακών δικτύων

Τα κύρια αντιπροσωπευτικά παραδείγματα της αρχιτεκτονικής των γνωστικών δικτύων περιγράφονται παρακάτω [8].

### 2.4.1 Spectrum pooling:

Σύμφωνα με τις δημοσιεύσεις [9,10], μια συγκεντρωτική αρχιτεκτονική spectrum pooling προτείνεται βασισμένη σε Πολυπλεξία με Ορθογώνια Διαίρεση Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)). Η αρχιτεκτονική αυτή αποτελείται από ένα βασικό σταθμό xG και έναν κινητό χρήστη xG. Η εξουσιοδοτημένη ανίχνευση χρηστών εκτελείται μέσω των πλαισίων ανίχνευσης που μεταδίδονται περιοδικά μέσω της το βάσης-σταθμού με ραδιοφωνικό τρόπο (broadcast). Κατά τη διάρκεια της ανίχνευσης των πλαισίων, οι κινητοί χρήστες παρουσιάζουν spectrum sensing. Τα κινητά τερματικά διαμορφώνουν ένα σύνθετο σύμβολο στη μέγιστη δύναμη στους υπομεταφορείς (sub-carriers) όπου ένας εξουσιοδοτημένος χρήστης εμφανίζεται. Μέσω αυτής της λειτουργίας, η βάση-σταθμός λαμβάνει ένα ενισχυμένο σήμα σε όλους τους υπομεταφορείς με τους νέους εξουσιοδοτημένους χρήστες. Υπάρχουν ζητήματα του φυσικού επιπέδου και του MAC επιπέδου, όπως είναι η ανίχνευση της φασματικής πρόσβασης (detection of spectral access), ο προγραμματισμός, και το handoff που βρίσκονται υπό έρευνα σε αυτήν την αρχιτεκτονική [8].

### 2.4.2 CORVUS:

Στις δημοσιεύσεις [11,12], παρουσιάζεται μια προσέγγιση cognitive radio για την χρήση του εικονικού, χωρίς άδεια, φασματικού συστήματος (CORVUS) η οποία έχει ως στόχο να εκμεταλλευθεί μπάντες οι οποίες έχουν άδεια και δεν χρησιμοποιούνται. Στο CORVUS, το οποίο βασίζεται σε τοπικό spectrum sensing, η ανίχνευση του κύριου χρηστή και η κατανομή φάσματος εκτελούνται με έναν συντονισμένο τρόπο. Αυτή η συνεταιριστική προσπάθεια αυξάνει πολύ τη δυνατότητα του συστήματος στον προσδιορισμό και την αποφυγή των αρχικών χρηστών. Στο CORVUS, δημιουργείται μια ομάδα χρηστών από ένα δευτεροβάθμιο γκρουπ χρηστών (SUG) για να συντονίσει την επικοινωνία τους. Κάθε μέλος από αυτό το γκρουπ έχει τη δυνατότητα να αισθανθεί – καταλάβει το spectrum pool, το οποίο είναι διαιρεμένο σε υπο-

κανάλια. Ένας καθολικός έλεγχος καναλιών χρησιμοποιείται από όλα τα γκρουπ για συντονισμό και ένας αυτόνομος έλεγχος καναλιών χρησιμοποιείται από τα μέλη κάθε γκρουπ για να ανταλλάξουν πληροφορίες αντίληψης και να εγκαθιδρύσουν συνδέσεις για δευτεροβάθμιους χρήστες. Η απόδοση των φυσικών επιπέδων και των στρωμάτων ζεύξης (link layer) αξιολογείται μέσω της δοκιμής CORVUS [13]. Επιπλέον, πρόσφατα, προτάθηκε ένα αξιόπιστο πρωτόκολλο συντήρησης συνδέσεων μέσα σε CORVUS για να διατηρήσει την ποιότητα της δευτεροβάθμιας επικοινωνίας χρηστών. [14,8]

### 2.4.3 DIMSUMnet:

Η δυναμική και ευφυής διαχείριση του φάσματος για τα ευρέως διαδεδομένα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (DIMSUMnet) [15] εφαρμόζει σταδιακά τη multi-plexed πρόσβαση (SMA) στο φάσμα σε συντονισμένες μπάντες πρόσβασης (CAB). Ενώ το CAB βελτιώνει την απόδοση της πρόσβασης σε ραδιοφάσμα και την δικαιοσύνη, το SMA εστιάζει στη βελτίωση της χρήσης του ραδιοφάσματος. Το CAB είναι ένα συνεχόμενο κομμάτι του φάσματος που προορίζεται από τις ρυθμιστικές αρχές. Ένας spectrum broker κατέχει το CAB και το εκμισθώνει σύμφωνα με τα αιτήματα. Το DIMSUMnet χρησιμοποιεί έναν μηχανισμό που στοχεύει στη σημαντική βελτίωση της φασματικής χρήσης ενώ μειώνει την πολυπλοκότητα και τις απαιτήσεις ευκινησίας του επεκταμένου συστήματος. Τα μητρώα βάση-σταθμός, υποδεικνύουν την πρόσβαση του διαχειριστή του δικτύου ραδιοφώνου του (RANMAN), η οποία διαπραγματεύεται μίσθωση με πληροφορίες του ραδιοφάσματος και τη διαχείριση (SPIM) ενός μεσίτη (broker) για ένα κατάλληλο τμήμα του φάσματος. Εάν η μίσθωση είναι επιτυχής, το RANMAN διαμορφώνει το μισθωμένο φάσμα στο βάση-σταθμό. Η βάση-σταθμός στέλνει τις πληροφορίες φάσματος που παραλαμβάνονται από το RANMAN στους χρήστες του για τη διαμόρφωση του πελάτη. Η χρησιμοποίηση φάσματος DIMSUMnet μετριέται αυτήν την περίοδο στην υπάρχουσα πολλαπλάσια πρόσβαση κατανομής κωδικών (CDMA) και το σφαιρικό σύστημα για τα κινητά κυψελοειδή δίκτυα επικοινωνίας (GSM), που στοχεύουν στο χαρακτηρισμό του εφικτού του CAB και SMA [16]. Οι πρόσφατες έρευνες επικεντρώνονται στο spectrum pricing και allocation functions για spectrum brokers [17, 8].

### 2.4.4 DRiVE/OverDRiVE project:

Το ευρωπαϊκό δυναμικό ραδιόφωνο για τις IP υπηρεσίες στο πρόγραμμα Vehicular Environments (DRiVE) συγκεντρώνεται στην δυναμική κατανομή φάσματος στα ετερογενή δίκτυα με την παραδοχή ενός κοινού συντονισμένου καναλιού [18]. Το ακόλουθο πρόγραμμα, Spectrum Efficient Uni- and Multicast Over Dynamic Radio Networks in Vehicular Environments (OverDRiVE), στοχεύει στην αύξηση των UMTS και στο συντονισμό των υπαρχων ραδιοφωνικών δικτύων σε ένα υβριδικό δίκτυο για να εξασφαλίσει αποδοτική παροχή φάσματος κινητών πολυμεσικών υπηρεσιών [19]. Δύο πτυχές της δυναμικής κατανομής φάσματος ερευνήθηκαν μέσα στα DRiVE/OverDRiVE προγράμματα. Η προσωρινή δυναμική κατανομή φάσματος (DSA) και spatial DSA [20]. Στην περίπτωση του προσωρινού DSA ένα ραδιοφωνικό δίκτυο πρόσβασης (RAN) μπορεί να χρησιμοποιήσει το φάσμα που δεν χρησιμοποιείται εκείνη την περίοδο από άλλα RANs, εκείνη τη στιγμή. Από την άλλη μεριά, το spatial DSA επιτρέπει την κατανομή του ραδιοφάσματος για την προσαρμογή στις περιφερειακές διακυμάνσεις στις απαιτήσεις της κυκλοφορίας. Η αποδοτικότητα αυτού του DSA σχήματος εξαρτάται από την δυνατότητα να προβλέψει το κυκλοφοριακό φορτίο. Παρ' όλο που αυτά τα προγράμματα έχουν παρουσιάσει σημαντική δυνατότητα για την αύξηση της φασματικής αποδοτικότητας, η

υλοποίηση του αναδιαμορφωμένου συστήματος για προσωρινά και χωρικά DSA είναι ακόμα μια κύρια πρόκληση. [8]

### 2.4.5 Nautilus:

Το πρόγραμμα Nautilus είναι σχεδιασμένο ώστε να δίνει έμφαση στο κατανεμημένο συντονισμό ενεργοποιώντας το spectrum sharing, χωρίς να στηρίζεται στον συγκεντρωτικό έλεγχο [21]. Στο έργο Nautilus, προτείνεται ένα κατανεμημένο, εξελικτικό και αποδοτικό πλαίσιο συντονισμού για δίκτυα open spectrum ad hoc networks, στα οποία αντιπροσωπεύεται η ετερογένεια, ενώ δεν επικαλείται την ύπαρξη προκαθορισμένων δημοσίων (common) καναλιών για τον έλεγχο της κυκλοφορίας [22,23]. Βασισμένες σε αυτό το πλαίσιο παρουσιάζονται τρία διαφορετικά σχήματα συνεργατικής πρόσβασης στο φάσμα (collaborative spectrum access). Στο [22] προτείνεται ένα διάγραμμα χρωματικής διάταξης βασισμένο σε σχήμα συνεργατικής πρόσβασης στο φάσμα, όπου ένας σχηματισμός (topology), ένας βελτιστοποιημένος αλγόριθμος κατανομής χρησιμοποιείται για τους σταθερούς σχηματισμούς. Στα κινητά δίκτυα, εντούτοις, η τοπολογία δικτύων αλλάζει λόγω της κινητικότητας κόμβων. Χρησιμοποιώντας αυτήν την σφαιρικά βελτιστοποιημένη προσέγγιση, το δίκτυο χρειάζεται να γίνει ξανά ανάθεση του φάσματος για όλους τους χρήστες μετά από κάθε αλλαγή, με αποτέλεσμα να απαιτείται υψηλή υπολογιστική ισχύ και επικοινωνία. Κατά συνέπεια, η κατανεμημένη κατανομή φάσματος που είναι βασισμένη στην τοπική διαπραγμάτευση να προτείνεται στη δημοσίευση [24], όπου οι κινητοί χρήστες διαπραγματεύονται την ανάθεση φάσματος σε τοπικό επίπεδο οι ομάδες. Για τα δεσμευμένα δίκτυα πόρων όπως είναι ο αισθητήρας και τα ad hoc δίκτυα, προτείνεται μια κεντρική μηχανή διαχείρισης φάσματος στους κανόνες διαχείριση φάσματος συσκευών κεντρική, όπου οι χωρίς άδεια χρήστες έχουν πρόσβαση στο φάσμα ανεξάρτητα και σύμφωνα με την τοπική παρατήρηση και τους προκαθορισμένους κανόνες. Επί του παρόντος, το έργο επικεντρώνεται στην επιλογή του καλύτερου διαύλου-καναλιού για τη διαβίβαση των στοιχείων που χρησιμοποιούν προτείνοντας το κατανεμημένο πλαίσιο συντονισμού [8].

### 2.4.6 OCRA network:

Στο [25] προτείνεται μια Πολυπλεξία με Ορθογώνια Διαίρεση Συχνότητας (OFDM) βασισμένη σε cognitive radio (OCRA). Το δίκτυο OCRA εξετάζει όλα τα πιθανά σενάρια επέκτασης πέρα από το ετερογενές περιβάλλον δικτύων xG και αναπτύσσει τις διαδικασίες cross-layer για τη βασισμένη στο OFDM δυναμική πρόσβαση φάσματος. Η αρχιτεκτονική OCRA και τα συστατικά της απεικονίζονται στη φιγούρα 6. Για το spectrum decision και το spectrum handoff, τα δίκτυα OCRA παρέχουν μια νέα έννοια για διαχείριση φάσματος πάνω από ετερογενές φασματικό περιβάλλον, βασισμένη σε OFDM. Με βάση τη δομή του φυσικού επιπέδου (PHY), προτείνεται ένα dual-mode spectrum sharing πλαίσιο, το οποίο επιτρέπει την πρόσβαση στα ήδη υπάρχον δίκτυα καθώς και τον συντονισμό μεταξύ των xG χρηστών. Επιπλέον προτείνεται ένα νέο παράδειγμα δρομολόγησης που εξετάζει την joint re-routing και το spectrum handoff. Επίσης, το δίκτυο OCRA εισάγει τις τεχνικές μεταφορών πολυ-φάσματος για να χρησιμοποιηθεί το διαθέσιμο αλλά μη-συνεχόμενο (non-contiguous) ασύρματο φάσμα για την υψηλής ποιότητας επικοινωνία. Στο [25] προτείνεται το σχέδιο δοκιμών για την αξιολόγηση και την ολοκλήρωση του δικτύου OCRA. Η δοκιμή OCRA είναι βασισμένη στην τεχνολογία IEEE 802.11a/g, η οποία εκμεταλλεύεται την τεχνολογία OFDM. Επιπλέον, μια αυτόνομη μονάδα cognitive sensing αναπτύσσεται για να μιμηθεί τις ικανότητες spectrum sensing του cognitive radio [8].

## 2.4.7 IEEE 802.22:

Το IEEE 802.22 είναι το πρώτο παγκόσμιο πρότυπο με βάση τη τεχνολογία cognitive radio [26,27] και βρίσκεται στο στάδιο της τυποποίησης. Το έργο αυτό, επίσημα είναι το πρότυπο για ασύρματα περιφερειακά δίκτυα (WRAN), εστιάζει στην οικοδόμηση σταθερών WRAN point-to-multipoint ότι θα χρησιμοποιήσουν UHF / VHF ζώνες τηλεόρασης μεταξύ 54 και 862 MHz. Συγκεκριμένα κανάλια τηλεόρασης καθώς επίσης και οι ζώνες φρουράς (guard bands) θα χρησιμοποιηθούν για την επικοινωνία στο IEEE 802.22. Το σύστημα IEEE 802.22 καθορίζει ένα σταθερό point-to-multipoint ασύρματο air interface όπου ο κύριος σταθμός διαχειρίζεται τα δικά του κελιά και όλους τους σχετικούς χρήστες, οι οποίοι δηλώνονται ως consumer premise equipments (CPEs). Η βάση-σταθμός του IEEE 802.22 διαχειρίζεται ένα μοναδικό χαρακτηριστικό γνώρισμα της καταναμεμένης αντίληψης. (distributed sensing). Αυτό χρειάζεται για να διασφαλιστεί η ορθή κατεστημένων προστασίας Andis που διαχειρίζεται η βάση-σταθμός, η οποία καθοδηγεί τις διάφορες CPEs για την εκτέλεση των καταναμεμένων δραστηριοτήτων μέτρησης. Το σύστημα IEEE 802.22 καθορίζει τη φασματική απόδοση στην περιοχή των 0.5–5 bit/s/Hz. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του IEEE 802,22 WRAN σε σύγκριση με τα υφιστάμενα πρότυπα IEEE 802 είναι η περιοχή κάλυψης της βάση-σταθμού, που φτάνει μέχρι τα 100 χιλιόμετρα, αν η δύναμη δεν είναι ένα θέμα. Η τρέχουσα καθορισμένη περιοχή κάλυψης είναι στα 33 km με ταχύτητα 4 W CPE ιστροπικής ακτινοβολούσας δύναμης (EIRP) [28]. Η ομάδα εργασίας του IEEE 802.22 συστάθηκε το 2004 και έχει ολοκληρώσει την προδιαγραφή των τεχνικών απαιτήσεων. Το πρώτο σχέδιο του προτύπου IEEE 802.22 θα είναι έτοιμο στα μέσα του 2006 [11, 8].

## 2.5. IEEE 802.22

Έχει παρατηρηθεί ότι το ραδιοφάσμα που διατίθενται για τις υπηρεσίες τηλεόρασης παραμένει σε μεγάλο βαθμό ελεύθερο σε πολλές περιοχές . Για να βελτιωθεί η χρήση αυτού του ραδιοφάσματος, η FCC ξεκίνησε μια αλλαγή στην πολιτική της χρήσης του φάσματος για να επιτρέψει να λειτουργήσουν κάτω από το 900 MHz υπηρεσίες. Δεδομένου ότι οι ζώνες αυτές της τηλεόραση έχουν χαμηλή συχνότητα, το χαρακτηριστικό του πολλαπλασιασμού του σήματος είναι κατάλληλο για μεταφορά σε μεγάλη απόσταση [29]. Το Μάιο του 2004 το FCC ανακοινώσε τους κανόνες [30] και τη χρήση των συχνοτήτων χωρίς άδεια για ασύρματες εφαρμογές ,όσον αφορά την αναλογική τηλεόραση [31]. Το πρότυπο IEEE 802.22 είναι εμπλουτισμένο με την ανάπτυξη ενός CR που βασίζεται σε WRAN, PHY και MAC στρώματα . Έτσι το 802.22 χρησιμοποιείται για την επαναχρησιμοποίηση του φάσματος της τηλεόρασης χωρίς να δημιουργεί παρεμβολές σε όργανα (πχ τηλεοπτικούς πομποδέκτες), οι τεχνικές των cognitive radio είναι πρωταρχικής σημασίας για να ανιχνεύσουμε και να μετρήσουμε το φάσμα, όπως και για να εντοπίσουμε εάν υπάρχουν ή όχι σήματα Εκτός αυτού, άλλες προηγμένες τεχνικές που διευκολύνουν τη συνύπαρξη, όπως η δυναμική διαχείριση του ραδιοφάσματος και το περιβάλλον του ραδιοσυστήματος θα μπορούσε να σχεδιαστούν[4]. Επιπλέον, η βάση του IEEE 802.22 WRAN αναμένεται να στηρίξει μια πολύ μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης που ξεπερνάει τις άλλες τεχνολογίες που παρέχουν ασύρματη πρόσβαση(π.χ., IEEE 802.16 με βάση το WiMAX και βάση IEEE 802.20 MobileFi) [29].

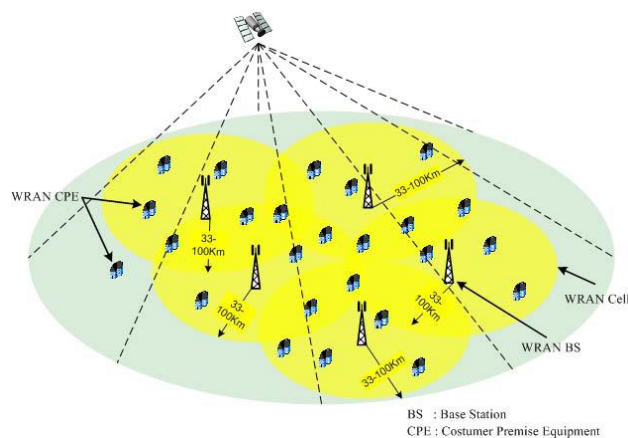
Το πρότυπο IEEE 802.22 WRAN καθορίζει τις προδιαγραφές που πρέπει να έχουν για την λειτουργία του στις ζώνες συχνοτήτων μεταξύ 54 MHz και 862 MHz. ενώ αποφεύγουμε και τις παρεμβολές στις ήδη υπάρχουσες συσκευές . Το πρότυπο είναι υπό ανάπτυξη [32] και περιλαμβάνει νέες cognitive radio λειτουργίες οι οποίες θα συζητηθούν σε αυτό το κεφάλαιο [33].

## 2.5.1. Το σύστημα IEEE 802.22

Η πιο σαφής και η πιο κρίσιμη προϋπόθεση για τη διασύνδεση 802.22 είναι η ευελιξία και η προσαρμοστικότητα, η οποία απορρέει από το γεγονός ότι το 802.22 λειτουργεί σε ένα φάσμα όπου οι κατεστημένοι φορείς πρέπει να προστατεύονται με κάθε τρόπο. Περαιτέρω, δεδομένου ότι οι λειτουργίες του 802.22 χωρίς άδεια και BS εξυπηρετεί μια μεγάλη περιοχή, η συνύπαρξη μεταξύ 802.22 κυττάρων (στο εξής αναφέρονται ως ανεξάρτητοι συνύπαρξη) είναι υψίστης σημασίας. Ως εκ τούτου, σε αυτό το σημείο θα συζητήσουμε το σχεδιασμό του PHY και MAC που υποστηρίζει αυτή την ευελιξία και την προσαρμοστικότητα, η οποία προβλέπει την ιδανική βάση για την προσέγγιση θεμάτων που αφορούν την συνύπαρξη [14].

### 2.5.1.1. Τοπολογία, Οντότητες και Σχέσεις

Το σύστημα 802.22 καθορίζει ένα σταθερό σημείο-προς-πολλά (point-to-multipoint) ασύρματο air interface όπου μια βάση-σταθμός διαχειρίζεται τα δικά του κελιά και όλων των συναφών Consumer Premise Equipments (CPEs), όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2.4. Η βάση-σταθμός (επαγγελματικά εγκατεστημένη οντότητα) ελέγχει το μέσον πρόσβασης στα κελιά του και μεταδίδει σε μια ροή προς τα κάτω (downstream) στους διάφορους CPEs, οι οποίοι ανταποκρίνονται πίσω σε μια ροή με κατεύθυνση προς τα πάνω (δηλαδή προς την βάση σταθμό). Επίσης διαχειρίζεται ένα μοναδικό χαρακτηριστικό το *distributed sensing*. Αυτό είναι απαραίτητο για να διασφαλιστεί η ορθότητα της προστασίας των κατεστημένων συσκευών και η διαχείριση από το BS οποία αναθέτει τις διάφορες CPEs να εκτελεί τις μετρήσεις των διαφορετικών τηλεοπτικών καναλιών. Με βάση τις πληροφορίες που θα πάρει θα το BS θα αποφασίσει τα βήματα που θα κάνει [34].



Εικόνα 2.4. Υποδειγματική διαμόρφωση του 802.22

### 2.5.1.2. Ικανότητα υπηρεσίας (Service Capacity)

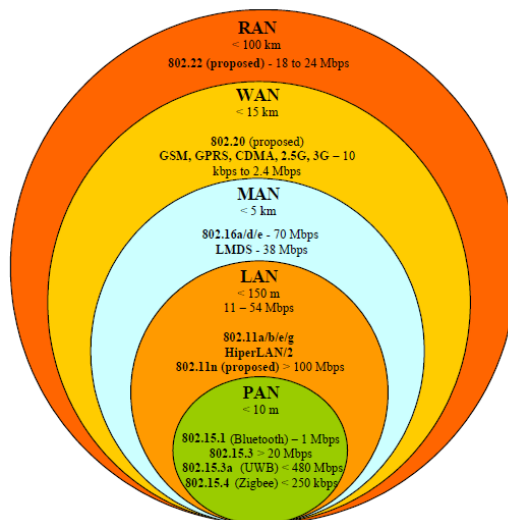
Το σύστημα 802.22 καθορίζει μια φασματική απόδοση της περιοχής των 0,5 bit/(sec/Hz) μέχρι τα 5 bit/(sec/Hz). Αν λάβουμε υπόψη ένα μέσο όρο 3 bits/sec/Hz, αυτό θα αντιστοιχούσε σε ένα συνολικό ποσοστό στοιχείων PHY των 18 Mbps σε ένα τηλεοπτικό κανάλι των 6 MHz. Προκειμένου να επιτύχει το ελάχιστο ποσοστό των δεδομένων για κάθε CPE, έχει ληφθεί υπόψη ένα σύνολο 12 ταυτόχρονων χρηστών το οποίο οδηγεί σε ένα ελάχιστο ρυθμό διεκπεραίωσης της



κορυφής στο άκρο της κάλυψης των 1,5 Mbps ανά CPE στην προς τα κάτω (downstream ) κατεύθυνση. Στην κατεύθυνση προς τα πάνω (από τον BS στον CPE) , μία κορυφή των 384 Kbps έχει καθορισθεί , η οποία είναι συγκρίσιμη με υπηρεσίες DSL [34].

### 2.5.1.3. Κάλυψη υπηρεσίας ( Service Coverage )

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των 802.22 WRAN σε σύγκριση με τα ισχύοντα πρότυπα IEEE 802 είναι η περιοχή κάλυψης BS, το οποίο μπορεί να ανέλθει σε 100 χιλιόμετρα, εάν η ισχύς δεν είναι ένα θέμα (τα τωρινά καθορισμένα όρια κάλυψης είναι 33 χιλιόμετρα σε 4 Watts CPE EIRP). Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2.5, τα WRANs έχουν πολύ μεγαλύτερο εύρος κάλυψης από τα υπόλοιπα δίκτυα σήμερα, αυτό οφείλεται κυρίως στην αύξηση της ισχύς και στα ευνοϊκά χαρακτηριστικά διάδοσης των ζωνών συχνοτήτων τηλεόρασης. Αυτό το ενισχυμένο εύρος κάλυψης προσφέρει μοναδικές τεχνικές προκλήσεις καθώς και ευκαιρίες [34].



Εικόνα 2.5: Πρότυπο 802.22 ασύρματο RAN ταξινομημένο και σε σύγκριση με άλλα δημοφιλή ασύρματα πρότυπα.

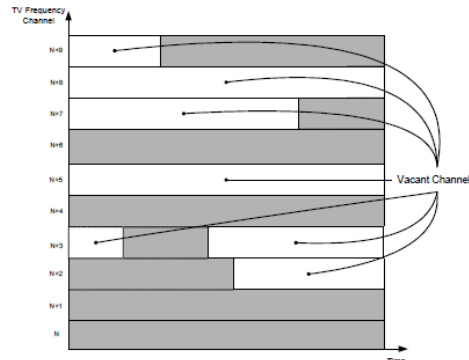
## 2.5.2 Το 802.22 Air Interface

Η πιο σαφής και η πιο κρίσιμη προϋπόθεση για τη διασύνδεση 802.22 είναι η ευελιξία και η προσαρμοστικότητα, η οποία απορρέει από το γεγονός ότι το 802.22 λειτουργεί σε ένα φάσμα όπου οι κατεστημένοι φορείς πρέπει να προστατεύονται με κάθε τρόπο. Περαιτέρω, δεδομένου ότι οι λειτουργίες του 802.22 είναι χωρίς άδεια και μια βάση-σταθμός (BS) εξυπηρετεί μια μεγάλη περιοχή, η συνύπαρξη μεταξύ κυττάρων στο 802.22 (στο εξής αναφέρονται ως self-coexistence) είναι υψίστης σημασίας. Ως εκ τούτου, σε αυτό το σημείο θα συζητήσουμε το σχεδιασμό του PHY και του MAC που υποστηρίζουν αυτή την ευελιξία και την προσαρμοστικότητα, η οποία προβλέπει την ιδανική βάση για την προσέγγιση θεμάτων που αφορούν την συνύπαρξη [34].

### 2.5.2.1. Το φυσικό επίπεδο (The PHY)

Η Εικόνα 2.6 απεικονίζει ποιά θα μπορούσε να είναι το πρότυπο της πληρότητας των τηλεοπτικού καναλιών από τους κατεστημένους φορείς στην πάροδο του χρόνου και της

συχνότητας. Όπως μπορούμε να δούμε οι ευκαιρίες μετάδοσης (δηλαδή ο χρόνος κατά τον οποίο ένα κανάλι είναι κενό ) από τη βάση-σταθμό και τους CPEs δοκιμάζουν συνήθως μια τυχαία συμπεριφορά που συγκρούεται με το σχεδιασμό των MAC και PHY.



Εικόνα 2.6: Παράδειγμα της πληρότητας της ζώνης τηλεόραση (TV band ) στην πάροδο του χρόνου και της συχνότητας

Συγκεκριμένα στην περίπτωση των PHY απαιτείται να προσφερθεί υψηλή απόδοση, διατηρώντας παράλληλα την πολυπλοκότητα χαμηλά. Επιπλέον, θα πρέπει να αξιοποιήσει τις διαθέσιμες συχνότητες με αποτελεσματικό τρόπο έτσι ώστε να παρέχουν επαρκή απόδοση, κάλυψη και τις απαιτήσεις του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων της υπηρεσίας. Οι WRAN εφαρμογές απαιτούν ευελιξία στην ροή προς τα κάτω (από την βάση-σταθμό στους CPEs) έτσι ώστε να επιτύχουμε υποστήριξη σε μεταβλητό αριθμό χρηστών όπου πιθανόν να έχουν διαφορετική ίσως απόδοση. Το WRANs πρέπει επίσης να υποστηρίζει πολλαπλή πρόσβαση στην κατεύθυνση από τον CPEs στη βάση σταθμό. Η Multi-carrier διαμόρφωση είναι πολύ ευέλικτη στο πλαίσιο αυτό, καθώς καθιστά δυνατό τον έλεγχο του καναλιού στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας. Αυτό παρέχει την ευκαιρία να καθορίσουν διαστάσιμα slots (το χρόνο και τη συχνότητα) και να ανακαλύπτουν τις υπηρεσίες που πρέπει να διαβιβάζονται προς τις δύο κατευθύνσεις πάνω σε ένα υποσύνολο αυτών των slot.

Επίσης το 802.22 PHY πρέπει να παρέχει υψηλή ευελιξία στους τομείς της διαμόρφωσης και της κωδικοποίησης. Για παράδειγμα στην εικόνα 1 όπου οι CPEs μπορεί να βρίσκονται σε διάφορες αποστάσεις από την βάση-σταθμό και ως εκ τούτου έχουν διαφορετική Signal-to-Noise Ratio (SNR) ποιότητα. Για να ξεπεραστεί αυτό το ζήτημα και να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα του συστήματος, η βάση-σταθμός πρέπει να είναι σε θέση να κάνει δυναμικά την προσαρμογή του εύρους ζώνης της διαφοροποίησης και της κωδικοποίησης σε τουλάχιστον μια βάση ανά CPE. Πράγματι, το OFDMA αποτελεί έναν ιδανικό συνεργάτη για την επίτευξη αυτών των στόχων, διότι επιτρέπει την αποτελεσματική κατανομή των sub carrier έτσι ώστε να ταιριάζουν με τις απαιτήσεις της CPEs. Μία πρόταση, είναι να χωριστούν οι συνδρομητές σε 48 υπό-κανάλια. Η διαμόρφωση προγραμμάτων είναι QPSK, 16-QAM, 64QAM με συνέλιξη συστημάτων κωδικοποίησης του ποσοστού  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{4}$ ,  $2 / 3$ . Αυτό το αποτέλεσμα σε ένα ποσοστό των δεδομένων αρχίζει από λίγα Kbps ανά επιμέρους κανάλι έως και 19 Mbps ανά κανάλι TV, παρέχοντας επαρκή ευελιξία. Είναι γενικά γνωστό πως ευρύτερο εύρος ζώνης συχνοτήτων μειώνεται. Επιπλέον, το ευρύτερο εύρος ζώνης παρέχει μεγαλύτερη χωρητικότητα. Έτσι, κάθε φορά που το φάσμα είναι διαθέσιμο, είναι επωφελής για την ευρύτερη χρήση εύρος ζώνης του συστήματος. Η εν λόγω διάθεση του ευρύτερου φάσματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συναλλαγές δεδομένων σε συνάρτηση με την απόσταση. Για παράδειγμα, οι συσκευές που είναι πιο κοντά στην βάση-σταθμό μπορούν να απολαύσουν υψηλή χωρητικότητα, ενώ εκείνες που είναι μακριά μπορούν να επωφεληθούν από την multi-path diversity και την λαμβανόμενη ισχύ. Η προκαταρκτική ανάλυση του προϋπολογισμού συνδέσμου έχει δείξει ότι θα ήταν δύσκολο να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις το 802.22 (περίπου 19 Mbps σε 30 χιλιόμετρα) με τη χρήση μόνο ενός (1) τηλεοπτικού καναλιού για τη μετάδοση. Η χρήση των συνδετικών καναλιών με την άθροιση

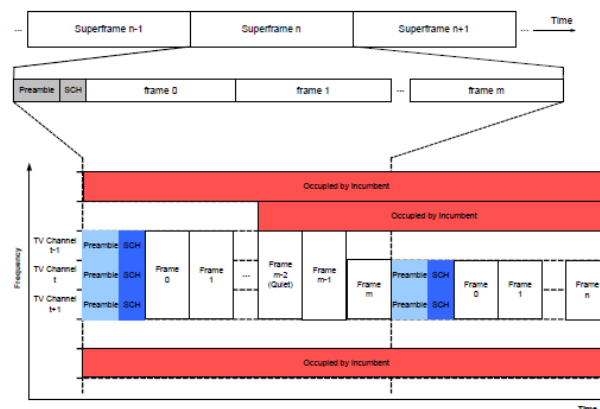
συνεχόμενων καναλιών επιτρέπει να πληρείται η απόφαση που απαιτείται. Υπάρχουν δύο συστήματα συγκόλλησης καναλιού: το bonding of contiguous και το non-contiguous [34].

### 2.5.2.2. Το MAC

Το επίπεδο του CR που βασίζεται στο MAC χρειάζεται να είναι δυναμικό έτσι ώστε να ανταποκρίνεται γρήγορα στις αλλαγές του περιβάλλοντος. Εκτός από την παροχή των παραδοσιακών MAC υπηρεσιών το 802.22 απαιτεί να έχει ένα νέο σύνολο από λειτουργίες για αποτελεσματική λειτουργία στα πλαίσια μοιρασμού των συχνοτήτων. Εκτός από την παροχή των παραδοσιακών MAC υπηρεσιών, το 802.22 MAC απαιτεί να εκτελεστεί εξ αρχής ένα νέο σύνολο λειτουργιών για την αποτελεσματική λειτουργία στην κοινή TV ζώνη (TV bands).

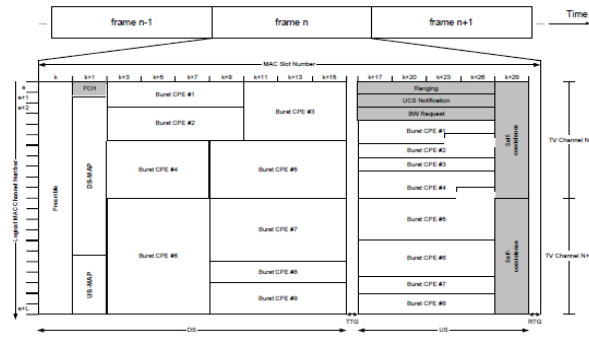
#### 2.5.2.2.1 Super frame και δομή του frame

Το τρέχον προσχέδιο του 802.22 MAC απασχολεί η δομή superframe που απεικονίζεται στην Εικόνα 2.7. Κατά την έναρξη του κάθε super frame, η βάση-σταθμός στέλνει ειδικό προοίμιο και SCH (κεφαλίδα ελέγχου superframe) μέσα από κάθε τηλεοπτικό κανάλι (μέχρι 3 συνεχόμενα) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία, κι αυτό αποτελεί μια εγγύηση για την υποχρεωτική απαίτηση προστασίας. Οι CPEs μπορεί να είναι συντονισμένοι σε οποιοδήποτε από αυτά τα κανάλια και τα οποία συγχρονίζει και λαμβάνει το SCH, είναι σε θέση να συγκεντρώσει όλες τις πληροφορίες που χρειάζεται για να συνδεθεί με τη βάση σταθμό.



Εικόνα 2.7: Γενική δομή του superframe.

Κατά τη διάρκεια της ζωής ενός superframe, πολλαπλά πλαίσια MAC μπορούν να εκπέμπονται σε πολλούς σταθμούς και ως εκ τούτου μπορεί να παρέχει καλύτερη χωρητικότητα του συστήματος, φάσμα, διαφορετικά multipath, και ρυθμό δεδομένων. Σημειώστε ωστόσο, ότι για λόγους ευελιξίας το MAC υποστηρίζει CPEs τα οποία είναι ικανά να λειτουργούν σε ένα ή περισσότερα κανάλια (multiple channels). Κατά τη διάρκεια του MAC πλαισίου η βάση-σταθμός έχει την ευθύνη για τη διαχείριση των ροών από τη βάση-σταθμό στο cpe και το αντίστροφο, οι ροές μπορεί να περιλαμβάνουν τακτική επικοινωνία δεδομένων, μέτρηση δραστηριοτήτων, διαδικασία συνύπαρξης, και ούτω καθεξής. Η δομή του πλαισίου MAC φαίνεται στην εικόνα 5. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε ένα πλαίσιο αποτελείται από δύο μέρη: μία προς τα κάτω subframe ροή (downstream) και μία προς τα πάνω (upstream) subframe ροή.



Εικόνα 2.8: Δομή χρόνου/συχνότητας ενός πλαισίου Mac.

Το σύνορο μεταξύ αυτών των δύο μερών είναι προσαρμόσιμο και έτσι ο έλεγχος της χωρητικότητας των downstream και upstream μπορεί εύκολα να γίνει. Το downstream subframe περιλαμβάνει ένα downstream PHY PDU με πιθανά διαστήματα διεκδίκησης για τους σκοπούς της συνύπαρξης. Ένα upstream subframe αποτελείται από διαστήματα διεκδίκησης για τον προγραμματισμό (λ.χ. initial ranging), αιτήσεις εύρους, UCS (Urgent Coexistence Situation) γνωστοποίηση και πιθανούς σκοπούς συνύπαρξης, μπορεί να υπάρχουν ένα ή πολλαπλά upstream PHY PDUs το καθένα να μεταδίδεται από διαφορετικούς CPEs [34].

### 2.5.2.2.2 Network Entry and Initialization

Γενικά, όταν υπάρχει εξάρτηση από μια κεντρική βάση σταθμό για την πρόσβαση, η είσοδος στο δίκτυο μια απλή διαδικασία σε οποιοδήποτε πρωτόκολλο MAC. Ωστόσο, αυτό δεν συμβαίνει όταν λειτουργούν σε μια κοινόχρηστη ζώνη και σε ευκαιριακή βάση, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 3. Σε αντίθεση με υπάρχουσες ασύρματες τεχνολογίες, δεν υπάρχει προκαθορισμένο κανάλι (εδώ, λέγοντας κανάλι μπορεί να εννοεί την συχνότητα, την ώρα, το κώδικα, ή οποιοδήποτε συνδυασμό αυτών) όπου ένα CPE μπορεί να χρησιμοποιήσει για να αναζητήσει μια βάση-σταθμό. Έτσι, η MAC πρέπει να είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να αντιμετωπίσει την είσοδο στο δίκτυο, το οποίο είναι συνήθως μια απλή διαδικασία στα υπάρχοντα ασύρματα πρωτόκολλα MAC. Στο προσχέδιο MAC 802.22, όταν ένα CPE ξεκινά πρώτα σαρώνει (πιθανόν όλα) τα τηλεοπτικά κανάλια και φτιάχνει ένα χάρτη πληρότητας του φάσματος που προσδιορίζει για κάθε κανάλι εάν οι εγκατεστημένοι φορείς έχουν εντοπιστεί ή όχι [35] [36]. Οι πληροφορίες αυτές μπορεί μεταγενέστερα να προσκομιστούν στους BS και χρησιμοποιηθούν και από το CPE για να καθορίσει ποια κανάλια είναι κενά και ως εκ τούτου να αναζητήσουν βάσεις-σταθμούς. Σε αυτά τα κενά κανάλια, το CPE πρέπει στη συνέχεια να σάρωση για SCH μεταδόσεις από μια βάση σταθμό. Η διάρκεια διαμονής ενός CPE σε ένα κανάλι είναι τουλάχιστον ίση με την διάρκεια ενός superframe. Μόλις το CPE λάβει το SCH, αποκτά πληροφορίες σχετικές με το κανάλι και το δίκτυο που χρησιμοποιούνται για να προχωρήσει με την είσοδο του δικτύου και την αρχικοποίηση [34].

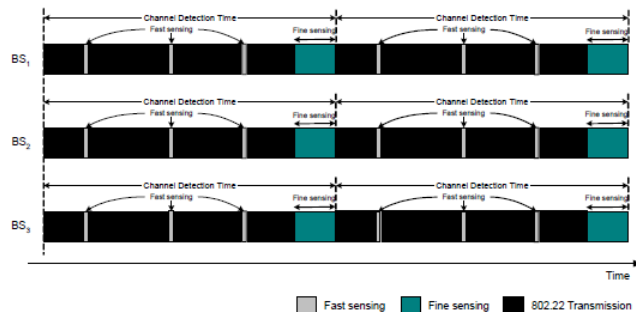
### 2.5.2.2.3 Μετρήσεις και διοίκηση εύρους ζώνης

Ένα από τα συστατικά του 802.22 συνθέτει το MAC που αποτελεί σημαντικό τμήμα των cognitive χαρακτηριστικών του προτύπου αυτού, αφορά τις μετρήσεις και την διαχείριση των καναλιών. Ένα κύτταρο 802.22 λειτουργεί χωρίς να προξενεί επίσημες παρεμβολές σε κατεστημένες συσκευές, η βάση-σταθμός αναθέτει στις CPEs σε να ασκούν περιοδικές μετρήσεις, οι οποίες μπορεί να είναι είτε in-of-band ή out-of-band. Η in-band μέτρηση σχετίζεται

με το κανάλι(α) που χρησιμοποιείται από την BS για να επικοινωνεί με τις CPEs, ενώ η out-of-band αντιστοιχεί σε όλα τα άλλα κανάλια. Για τις μετρήσεις σε in-band η βάση σταθμός σταματάει περιοδικά στο κανάλι, ώστε η ανίχνευση των κατεστημένων να μπορούν να πραγματοποιηθούν κάτι που δεν ισχύει για τις out-of-band μετρήσεις. Προκειμένου να διαπιστωθεί η παρουσία των κατεστημένων φορέων, η συσκευή 802.22 πρέπει να ανιχνεύει τα σήματα σε πολύ χαμηλά επίπεδα SNR και με ορισμένη ακρίβεια, η οποία θα πρέπει να ελέγχεται δυναμικά από την βάση σταθμό. Δεδομένου ότι οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται σε χαμηλά επίπεδα SNR, γίνεται δεκτό ότι η ανίχνευση των τηλεοπτικών σημάτων γίνεται με μη συνεκτικό τρόπο, που υποτίθεται ότι δεν είναι συγχρονισμένος [37][38]. Ανάλογα με τον κατεστημένο φορέα αλγόριθμος ανίχνευσης που είναι διαθέσιμος στα διάφορα CPEs, οι μετρήσεις μπορούν να λάβουν διαφορετικό χρονικό διάστημα. Η βάση-σταθμός πρέπει επίσης να αναφέρει ποιες CPEs θα μετρήσουν ποιο κανάλι, για πόσο διάστημα, με πια πιθανότητα ανίχνευσης καθώς και με λάθος συναγευρό. Επιπλέον, για καλύτερη διαδικασία η βάση-σταθμός έχει τη δυνατότητα να μην απαιτεί από κάθε CPEs που επικοινωνεί να κάνει τις ίδιες μετρήσεις δραστηριοτήτων. Αντίθετα, μπορεί να ενσωματώνει αλγόριθμους που κατανομούν το φορτίο των μετρήσεων σε όλους τους CPEs και χρησιμοποιούν τις μετρούμενες τιμές για να αποκτήσουν ένα χάρτη φάσματος πληρότητας για το σύνολο των κυττάρων. Οι μετρούμενες τιμές από την CPEs πρέπει επίσης να επιστραφούν στην βάση-σταθμό, που τις αναλύει και στη συνέχεια λαμβάνει μέτρα, εάν κρίνεται απαραίτητο. Το τρέχον προσχέδιο 802,22 MAC προβλέπει την υποστήριξη όλων αυτών των πτυχών. Ενσωματώνει επίσης ένα ευρύ σύνολο των λειτουργιών που του επιτρέπουν να διαχειρίζονται αποτελεσματικά το φάσμα. Εργασίες, όπως είναι η αλλαγή καναλιού (switch channels) , η αναστολή / συνέχιση της λειτουργίας του καναλιού, και η πρόσθεση / αφαίρεση καναλιών είναι από τις πολλές δράσεις του MAC όπου μπορεί να πρέπει να λάβει για να εγγυηθεί την προστασία των κατεστημένων και την αποτελεσματική συνύπαρξη [34].

#### 2.5.2.2.4 Quiet Periods for Incumbent Sensing

Για τα in-band κανάλια , το σημερινό προσχέδιο 802.22 MAC απασχολείται από τον μηχανισμό των περιόδων ησυχίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.9. Αποτελείται από δύο στάδια, τα οποία έχουν διαφορετικές χρονικές κλίμακες: την ταχεία ανίχνευση και την τελική ανίχνευση.



Εικόνα 2.9: Τα δύο στάδια των μηχανισμών της περιόδου ησυχίας.

*Ταχεία ανίχνευση* : Το στάδιο της γρήγορης ανίχνευσης αποτελείται από μία ή περισσότερες περιόδους γρήγορης ανίχνευσης όπως απεικονίζεται στην εικόνα 6. Κατά το στάδιο αυτό, ένας αλγόριθμος γρήγορης ανίχνευσης έχει προσληφθεί (π.χ., ενέργεια απλής ανίχνευσης). Συνήθως, αυτό γίνεται πολύ γρήγορα (στο πλαίσιο του 1ms/channel) συνεπώς είναι πιο αποτελεσματική διαδικασία. Όλοι οι CPEs πήραν μέρος για την έκβαση των αποτελεσμάτων όσον αφορά τις μετρήσεις και ενσωματώνονται στο στάδιο αυτό στην βάση-σταθμό όπου αποφασίζει στην συνέχεια σχετικά με την διαδικασία του τελικού σταδίου ανίχνευσης. Για παράδειγμα, αν κατά τη διάρκεια της ταχείας ανίχνευσης συνάγεται το συμπέρασμα ότι η ισχύς στο κανάλι είναι πάντα

κάτω από το όριο, η βάση σταθμός μπορεί να αποφασίσει να ακυρώσει την επόμενη προγραμματισμένη φάση που είναι η τελική ανίχνευση [34].

*Τελική ανίχνευση:* Η ύπαρξη αυτού του σταδίου καθορίζεται δυναμικά από τη βάση-σταθμό βασιζόμενη στα αποτελέσματα της προηγούμενης διαδικασίας. Κατά την διάρκεια αυτής της διαδικασίας, εκτελείται μία πιο λεπτομερής ανίχνευση στα κανάλια που μας ενδιαφέρουν. Συνήθως, οι αλγόριθμοι που εκτελούνται κατά το στάδιο αυτό μπορεί να είναι της τάξης των χιλιοστών του δευτερολέπτου (π.χ., 25ms στην περίπτωση του επιτόπιου εντοπισμού συγχρονισμού για ATSC3) για κάθε μεμονωμένο κανάλι συχνότητας, ψάχνουν κυρίως για μεταδιδόμενα σήματα των πρωτογενών χρηστών. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι οι τηλεοπτικοί σταθμοί δεν εμπίπτουν στην συχνότητα του αέρα, ο μηχανισμός αυτός γίνεται ιδιαίτερα αποδοτικός [34].

Σαφώς, η δυνατότητα να έχουμε πολλαπλές επικαλύψεις των σταθμών-βάσεων που λειτουργούν στην ίδια γεωγραφική περιοχή μπορεί να υπομονεύσει αυτά τα δύο στάδια που αφορούν τις περιόδους ησυχίας. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, το σύστημα 802.22 ενσωματώνει ένα πολύ αποτελεσματικό αλγόριθμο που είναι σε θέση να συγχρονίσει δυναμικά πολλαπλές επικαλύψεις κυττάρων. Με βάση αυτό, οι ήσυχοι περίοδοι επικάλυψης των σταθμών-βάσεων συγχρονίζονται με αποτέλεσμα τη ρύθμιση που απεικονίζεται στο σχήμα 13. Έτσι, ανίχνευση μπορεί να γίνει με υψηλή αξιοπιστία [34].

### 2.5.3. Συνύπαρξη στο IEEE 802.22

Η διαδικασία συνύπαρξης είναι ζωτικής σημασίας για το air interface του 802.22, το οποίο, σε αντίθεση με άλλα ασύρματα πρότυπα IEEE, είναι υποχρεωμένα να συμπεριλαμβάνουν μηχανισμούς συνύπαρξης στα αρχικά στάδια του προτύπου. Για το σκοπό αυτό, οι τεχνικές CR έχουν ενσωματωθεί στο 802.22 μέσω της ανίχνευσης, της μέτρησης, τους αλγόριθμους εντοπισμού, καθώς και της διαχείριση του ραδιοφάσματος. Ο συνδυασμός αυτών των μηχανισμών παρέχει ένα ραδιοσύστημα που είναι εξαιρετικά ευέλικτο και προσαρμοζόμενο στο περιβάλλον και μπορούν να αντιδράσουν σε αιφνίδιες αλλαγές αυτού.

Ο πρωταρχικός στόχος του 802.22 είναι να καθορίσει μια τεχνολογία που δεν παρέχει μόνο την υπηρεσία που προορίζεται, αλλά και για να εγγυηθεί ότι οι υπηρεσίες που παρέχουν οι ήδη υπάρχουσες συσκευές θα συνεχίσουν να παρέχονται. Έχοντας υπόψη αυτούς τους δύο στόχους και την σαφή πρόκληση για την συνύπαρξη, πιστεύεται ότι το κάθε CPE θα χρειασθεί να κατέχει 2 ξεχωριστές κεραίες (Υπό τον έλεγχο ενός μοναδικού MAC και PHY). Οι δύο αυτές κεραίες, είναι η κατευθυντική και η Παγκατευθυντική (με κέρδος 0 dBi ή και μεγαλύτερο).

*Η κατευθυντική κεραία* θα είναι η κεραία που χρησιμοποιείται συνήθως από την CPE για να επικοινωνεί με το BS. Οι κατευθυντικές κεραίες έχουν το επιθυμητό χαρακτηριστικό ότι η ισχύς δεν ακτινοβολείται προς όλες τις κατευθύνσεις έτσι ελαχιστοποιούνται οι παρεμβάσεις [39]. Επιπλέον, αυτές οι κεραίες προσφέρουν την ικανότητα να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα των TPC που διευκολύνει περαιτέρω τη συνύπαρξη.

Η Παγκατευθυντική κεραία, από την άλλη πλευρά, θα χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανίχνευση και την εκτέλεση των μετρήσεων. Ως εκ τούτου, για να εκτελέσει μια αξιόπιστη ανίχνευση αυτή η κεραία είναι πολύ πιθανόν να πρέπει να τοποθετηθεί σε εξωτερικούς χώρους. Χρησιμοποιώντας μία παγκατευθυντική κεραία, οι CPEs είναι σε θέση να ψάχνουν για

εγκατεστημένους φορείς σε όλη τη γειτονιά του, και δεν ψάχνουν μόνο σε μία κατεύθυνση, όπως θα συνέβαινε με την κατευθυντική κεραία [34].

#### 2.5.4. Self-Coexistence

Σε αντίθεση με άλλα πρότυπα του IEEE 802 όπου τα θέματα self coexistence συζητούνται μετά από την οριστικοποίηση του προτύπου, το 802.22 WG υιοθετεί μία προληπτική προσέγγιση και υποχρεώνει το air interface να περιλαμβάνει πρωτόκολλα self coexistence και αλγόριθμους στον ορισμό του IEEE 802.22. Όπως απεικονίζεται και στην εικόνα 1 multiple βάσεις-σταθμοί 802.22 και CPE μπορεί να λειτουργούν στο ίδια περιοχή έτσι λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως self interference όπου μπορούν να καταστρέψουν το σύστημα. Αυτό επιδεινώνεται περαιτέρω από το γεγονός ότι το 802.22 παρέχει κάλυψη φάσματος έως και 100 χιλιόμετρα, και κατά συνέπεια το φάσμα των παρεμβολών είναι μεγαλύτερο από ότι σε οποιαδήποτε υπάρχουσα, χωρίς άδεια, τεχνολογία. Προσέξτε ότι σε αντίθεση με άλλες μπάντες, όπως κινητά, όπου οι φορείς έχουν πάρει άδεια για ένα ειδικό τμήμα του φάσματος για συγκεκριμένη χρήση τους, οι βάσεις σταθμοί του 802.22 και οι CPEs λειτουργούν με έναν ευκαιριακό τρόπο σε μπάντες χωρίς να έχουμε άδεια και, συνεπώς, ο συντονισμός μεταξύ των δικτύων των διαφόρων φορέων παροχής υπηρεσιών δεν υπάρχει και κατά πάσα πιθανότητα δεν θα υπάρξει. Με την self-coexistence συνεπάγετε ότι τα δίκτυα 802.22 τα οποία είναι εντός εμβέλειας ραδιοσυστήματος πρέπει το ένα με το άλλο είναι σε θέση να συγχρονίζουν τα superframes μεταξύ τους [34].

### 2.6 Προκλήσεις γύρω από το Cognitive Radio

Πολλά από τα προβλήματα που καθυστερούν το όραμα του Cognitive Radio από το να γίνει πραγματικότητα είναι είτε τεχνικής, είτε επιχειρηματικής φύσης. Ωστόσο, αυτά που θα είναι πραγματικά δύσκολο να επιλυθούν είναι τα προβλήματα νομικής φύσης [3]. Αυτά τα μη-τεχνικά θέματα συχνά κρίνονται με βάση κριτήρια τα οποία οι άνθρωποι της τεχνολογίας δεν μπορούν να προβλέψουν. Κάθε χώρα έχει ένα σώμα νομοθετών που καθορίζουν με ποιους τρόπους επιτρέπεται στους πολίτες η πρόσβαση στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών (Federal Communications Commission – FCC) καθορίζει αυτή την πολιτική, και αυτή τη στιγμή, οι συσκευές WPAN (Wireless Personal Area Networks), WLAN (Wireless Local Area Networks) και WMAN (Wireless Metropolitan Area Networks) υποχρεούνται να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των κατασκευαστών για λειτουργία σε μια συγκεκριμένη μπάντα (π.χ. 2.4 GHz), σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο ισχύος, με ένα συγκεκριμένο φασματικό σχήμα για τις εκτός-μπάντας εκπομπές. Οι περισσότερες χώρες έχουν παρόμοιους οργανισμούς, κάθε ένας με τους δικούς του κανονισμούς. Αυτοί οι κανονισμοί μπορούν να παρέχονται στο CR, το οποίο είναι ικανό να επιβάλει τη συμμόρφωση σε αυτούς αν μεταγραφούν αποτελεσματικά. Οι κανονισμοί θα περιλαμβάνουν τις απαραίτητες επεκτάσεις για να διευκολύνουν το διαμοιρασμό του φάσματος (π.χ. πρωτόκολλα για αίτηση πρόσβασης σε αδειοδοτημένο φάσμα) και την εκτέλεση των σχετικών συναλλαγών. Οι νομοθέτες θα χρειαστούν διαβεβαίωση ότι τα πρωτόκολλα είναι εύρωστα υπό συνθήκες υψηλού φόρτου στο δίκτυο, ότι δε μπορούν να παραβιαστούν και ότι τα δίκτυα των πρωτευόντων χρηστών θα διατηρήσουν τη σταθερότητά τους υπό το νέο καθεστώς. Οι λεπτομερείς όροι και η ανάλυση των πρωτοκόλλων είναι αυτή τη στιγμή ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα στο σύνορο μεταξύ της τεχνολογικής και της ρυθμιστικής κοινότητας. Για το ρυθμιστικό οργανισμό, είναι σημαντικό να μπορεί να καθορίσει τους τοπικούς κανονισμούς. Οι νομοθέτες χρειάζονται διαβεβαίωση ότι οι κανονισμοί τους θα μεταφραστούν αλάνθαστα. Χρειάζονται διαβεβαίωση ότι οι ιδιοκτήτες του φάσματος θα διατηρήσουν την αποδοτικότητα

και την σταθερότητα των δικτύων τους κάτω από οποιεσδήποτε λογικές (ή αδιανόητες) συνθήκες. Εν τούτοις, η αψεγάδιαστη μετάφραση σε μορφή αναγνώσιμη από μηχανή και η ανάλυση πρωτοκόλλων για μία πληθώρα περιπτώσεων χρήσης αποτελούν προκλήσεις για το Cognitive Radio. Αυτή τη στιγμή, δεν είναι ξεκάθαρο ότι κάποια μηχανική βλάβη μπορεί να αποτραπεί από το να επιφέρει σοβαρό αντίκτυπο στα παραδοσιακά δίκτυα επικοινωνιών [7].



### 3. Καθεστώς Κατανομής Φάσματος

Από το 1927, το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα έχει διατεθεί σε χρήσεις και χρήστες από την Ομοσπονδιακή κυβέρνηση, καλύπτοντας ραδιοφωνικές εκπομπές, συστήματα επικοινωνιών μικροκυμάτων, τηλεοπτικές εκπομπές, δορυφόρους, αποστολές, αστυνομικές και εθνικές αμυντικές ανάγκες, μεταξύ πολλών άλλων. Οι δικαιούχοι λαμβάνουν μια άδεια για τη μετάδοση ορισμένων υλικών (π.χ., αποστολές ταξί) σε καθορισμένες συχνότητες και σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο ισχύος (και ίσως κατεύθυνσης). Για διάφορους λόγους, αυτή η άδεια είναι περιορισμένης χρονικής διάρκειας, αλλά με την πιθανότητα της ανανέωσης. Στην πραγματικότητα, οι άδειες ραδιοφώνου σχεδόν πάντα ανανεώνονται. Οι δικαιούχοι μπορούν να χρησιμοποιήσουν το φάσμα μόνο για την συγκεκριμένο σκοπό και δεν μπορούν να το πωλούν ή να το ενοικιάζουν σε τρίτους

Οι οικονομολόγοι, από την εποχή του Ronald Coase (1905) έχουν υποστηρίξει έντονα και με πειστικό τρόπο ότι η κατανομή των εν ανεπαρκείας πόρων από το διοικητικό διάταγμα δεν έχει μεγάλη διαφορά. Η δημιουργία μιας αγοράς για το φάσμα, στην οποία οι ιδιοκτήτες θα έχουν τη δυνατότητα να αγοράσουν, να πουλήσουν, να υποδιαιρέσουν και να αθροίσουν τα φασματικά πακέτα, θα οδηγήσει σε μια πολύ πιο αποτελεσματική κατανομή του σπάνιου αυτού πόρου. Η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) έχει βαθμιαία χορηγήσει περισσότερο φάσμα για ευέλικτη χρήση. Από το 1993 έχει χρησιμοποιήσει πλειστηριασμούς για να αναθέσει περισσότερες νέες άδειες ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Ωστόσο, αυτό το πείραμα που χρησιμοποιείται για να φέρει τις δυνάμεις της αγοράς να κατανέμουν το ραδιοφάσμα έχει εφαρμοστεί σε ποσοστό 10 τοις εκατό περίπου από το πιο πολύτιμο φάσμα. Οι οικονομολόγοι συνεχίζουν να ασκούν πιέσεις για «εμπορευματοποίηση» του φάσματος ως το πιο σίγουρο μέσο για να χρησιμοποιηθεί αυτός ο σημαντικός εθνικός πόρος (White (2001).

Εν τω μεταξύ, έχουν γίνει σημαντική βήματα στην τεχνολογία ραδιοκυμάτων, συμπεριλαμβανομένων του ευρυζωνικού ραδιοφώνου (όπως «spread spectrum» και ultra wideband (UWB)), «agile» ραδιοφώνου (μια από τις πολλές εφαρμογές λογισμικού του software defined radio (SDR)) και των «mesh» δικτύων (περιλαμβανομένων των «ad hoc» δικτύων και άλλων μορφών peer-to-peer αρχιτεκτονικών υποδομών). Οι προγραμματιστές των τεχνολογιών αυτών πρόσεξαν ότι τα προϊόντα αυτά βασίζονται σε αυτές τις τεχνολογίες που υπονομεύουν το ισχύον σύστημα της διοικητικής κατανομής των αποκλειστικών αδειών χρήσης και προσκαλεί για μία «ανοιχτή περιοχή» ή «commons». Η προσέγγιση στο ραδιοφάσμα θα απομακρύνει την αποκλειστική χρήση. Η «άρση των ορίων» σε αυτό το σημείο θα οδηγήσει σε πιο αποδοτική χρήση του φάσματος.

Ενώ οι οικονομολόγοι και οι μηχανικοί ραδιοφώνου πιστεύουν ότι το σημερινό σύστημα κατανομής του φάσματος είναι αναποτελεσματικό και σπάταλο, εμφανίζονται να έχουν εκ διαμέτρου αντίθετες απόψεις για το νέο σύστημα που θα το αντικαταστήσει. Οι οικονομολόγοι επιθυμούν να ελευθερώσουν την δύναμη της αγοράς για την επίτευξη αποδοτικότερων αποτελεσμάτων. Οι μηχανικοί από την δική τους πλευρά επιθυμούν να ελευθερώσουν τη δύναμη των commons για την επίτευξη αποδοτικότερων αποτελεσμάτων [40].

#### 3.1 Command and Control

Δυστυχώς, αυτά τα πρότυπα δεν μπορούν να λειτουργήσουν στο υπάρχον σύστημα διοίκησης που ονομάζεται command and control, δεδομένου ότι δεν υποστηρίζει τη δυναμική πρόσβαση στο φάσμα. Έτσι, προκειμένου αυτά τα πρότυπα να εκτελεστούν, πρέπει να αλλάξει το υφιστάμενο καθεστώς. Με τον ορισμό του command and control εννοούμε ένα ρυθμιστή που διαθέτει αυστηρά μη επικαλυπτόμενες ζώνες συχνότητων για συγκεκριμένες χρήσεις και εκχωρεί

δικαιώματα χρήσης στους δικαιοδόχους. Πιθανοί χρήστες υποβάλλουν αίτηση στον ρυθμιστή για την παροχή άδειας για ένα συγκεκριμένο σκοπό, χωρίς όμως να υπάρχει εγγύηση της επιτυχίας. Με λίγα λόγια το μοντέλο αυτό μπορεί να χαρακτηρίζεται από :

- Κατανομή των μη επικαλυπτόμενων συχνοτήτων σε συγκεκριμένες χρήσεις και χρήστες
- Ελάχιστη ή και ανύπαρκτη εμπορία φάσματος
- Ισχυρό έλεγχο όσον αφορά τις παρεμβολές μεταξύ χρηστών
- Αργή πρόοδο όσον αφορά τις καινοτομίες
- Αργή ανακατανομή του φάσματος ώστε να πάρουν φάσμα και τα νέα συστήματα
- Παράλογες αντιθέσεις μεταξύ των ελλείψεων του φάσματος και την αποθησαύριση του φάσματος [41].

Έτσι, υπάρχουν δύο σημαντικά εναλλακτικά καθεστάτα να αντικαταστήσουν το υπάρχον μοντέλο. Αυτά τα δύο μοντέλα ονομάζονται "Spectrum Commons" και "Spectrum markets".

### 3.2 Spectrum Commons

Τα "Commons Spectrum" και τα "Spectrum markets" είναι τα κύρια εναλλακτικά καθεστάτα του συστήματος εκχώρησης φάσματος "εντολής και ελέγχου". Τα "Commons Spectrum" αντιμετωπίζουν προβλήματα ζήτησης, αλλά βασίζονται σε μεγάλο βαθμό, από την πλευρά της προσφοράς, στην υλοποίησή τους. Τα "spectrum markets" λαμβάνουν υπ' όψιν τα δικαιώματα ιδιωτικής ιδιοκτησίας (δηλαδή, η λύση η οποία θα αντιμετωπίζει το φάσμα της ζήτησης και τις εκτιμήσεις αποτίμησης) [42].

Σύμφωνα με το καθεστώς "spectrum commons» οι νέες τεχνολογίες κατανομής του φάσματος χρησιμοποιούνται επιτρέποντας σε ένα σχεδόν απεριόριστο αριθμό προσώπων να χρησιμοποιούν το ίδιο φάσμα χωρίς να προκαλούν μεταξύ τους παρεμβολές, εξαλείφοντας την ανάγκη για δικαιώματα ιδιοκτησίας ή κυβερνητικό έλεγχο του φάσματος. Σε ένα «spectrum commons» καθεστώς, δεν υπάρχει διαχειριστής του φάσματος να προεδρεύσει στην κατανομή των πόρων. Προκειμένου το καθεστώς «spectrum commons» να είναι βιώσιμο, ένας διαχειριστής του φάσματος πρέπει να ελέγχει την πηγή και να υποβάλλει εύρυθμους κανόνες κατανομής που θα διέπουν τη χρήση του. Αν η κυβέρνηση είναι ο ελεγκτής, που είναι υπεύθυνη για την κατανομή και την διαχείριση των «spectrum common», τότε, παρόμοια με το καθεστώς "εντολής και ελέγχου" οι διεργασίες απασχολούνται ως αποτέλεσμα ενός αναποτελεσματικού τρόπου διαχείρισης του φάσματος [42].

Το μοντέλο «Spectrum commons" προσφέρει πολλά οφέλη, συμπεριλαμβανομένης της μεγαλύτερης ελευθερίας να πειραματιστούμε με τις τοπικές διαφοροποιήσεις σχετικά με τη χρήση του φάσματος και ενός μεγαλύτερου κινήτρου για την ανάπτυξη τεχνολογιών για την κοινή χρήση αυτού (όπως ραδιόφωνα «spread spectrum» ή τεχνολογία «ultra-wide-band»). Επιπλέον, η ρύθμιση του φάσματος ως «commons» θα μπορούσε να διευκολύνει την πραγματοποίηση αποτελεσματικών συναλλαγών μεταξύ ανταγωνιστικών χρηστών, και να επιτύχει οικονομίες κλίμακας εφικτές για διασυννοριακές χρήσεις. Τα πιθανά οφέλη είναι αρκετά μεγάλα για να δικαιολογήσουν τη σοβαρή εξέταση των «commons» ως ρυθμιστική δυνατότητα [4]. Η ανάγκη ενός ελεγκτή φάσματος είναι ουσιώδης όταν το καθεστώς «spectrum commons» υιοθετείται προκειμένου να διαχειριστεί τους διαθέσιμους πόρους και να εμποδίσει την υποβάθμιση. Από την άποψη αυτή ο ιδιοκτήτης του φάσματος εσωτερικεύει το κόστος των ενεργειών του και, επομένως, κάνει προσπάθειες για να αποφευχθεί το είδος της «τραγωδίας», που επηρεάζει ένα ανοικτό καθεστώς πρόσβασης. Οι ιδιοκτήτες του «spectrum commons» θα πρέπει να έχουν την εξουσία να διαχειρίζονται τον πόρο με τον καθορισμό και την εφαρμογή κανόνων και αποκλείοντας τους άλλους από τη χρήση του. Η κυριότητα ή τουλάχιστον ο νομικός έλεγχος, είναι επομένως απαραίτητος, προκειμένου το καθεστώς «spectrum commons» να είναι

χρήσιμο και όχι να είναι ένα ανοικτό καθεστώς πρόσβασης που αυξάνει τον αναποτελεσματικότητα στη χρήση του φάσματος. Σε αυτή την κατεύθυνση ένας ιδιοκτήτης, μια ομάδα συνιδιοκτητών ή η κυβέρνηση πρέπει να ελέγχουν το φάσμα και να βάζουν κανόνες που περιορίζουν τον τρόπο που χρησιμοποιούνται οι πόροι. Αυτοί οι κανόνες που θεσπίζει ο ιδιοκτήτης επιτρέπουν την κοινοχρησία των εν ανεπαρκεία πόρων για να είναι το φάσμα πιο αποτελεσματικό.

Το μοντέλο «Spectrum commons» δεν χρησιμοποιεί τους μηχανισμούς της αγοράς ως μέσο για την κατανομή των εν ανεπαρκεία πόρων μεταξύ ανταγωνιστικών χρηστών. Από την άποψη αυτή, υπάρχει πάντα ο κίνδυνος ότι η ελεύθερη πρόσβαση θα οδηγήσει τελικά σε παρεμβολές και άνωκορεσμό (δηλ. «tragedy of the commons»). Αυτά τα προβλήματα μπορούν να ξεπεραστούν σε κάποιο βαθμό, μέσω ρυθμιστικών οδηγιών και απαιτήσεων όπως η ισχύς και τα όρια των εκπομπών και μέσω της ανταλλαγής ετικετών. Αλλά αν πραγματικά η σπανιότητα του φάσματος εξακολουθεί να εμφανίζεται, τα δικαιώματα μπορεί να χρειαστεί να επαναπροσδιοριστούν και να εισαχθούν οι μηχανισμοί της αγοράς, ώστε να αποφευχθεί η αναποτελεσματική χρήση του φάσματος [42].

Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις για το καθεστώς του «spectrum commons». Μία προσέγγιση, που περιγράφηκε παραπάνω, επιτρέπει την πρόσβαση και τη χρήση του φάσματος χωρίς περιορισμό σε όλους τους δυνητικούς χρήστες και συνήθως αναφέρεται ως το καθεστώς «ελεύθερης πρόσβασης». Το καθεστώς αυτό θεωρείται γενικά ως το καθεστώς των «spectrum commons». Το πρότυπο μοντέλο είναι ένα καθεστώς συν-διαχείρισης που αντλείται από επιτυχείς συν-διαχειριστικές εμπειρίες με άλλα είδη σπάνιων κοινοτικών πόρων και είναι γνωστό ως καθεστώς «common property». Στην προσέγγιση αυτή, η κυβέρνηση νομιμοποιεί και προστατεύει τα όρια της χρήσης του φάσματος από μια ομάδα χρηστών (συμπεριλαμβανομένων των κριτηρίων για συμμετοχή στην ομάδα), αλλά δεν λαμβάνει μέρος στην εσωτερική του διακυβέρνηση. Η κοινότητα διαχείρισης φάσματος που καθορίστηκε και αποτελείται μόνο από τους τελικούς χρήστες, έχει την αποκλειστική εξουσία για την χρήση του φάσματος, με τη θέσπιση προτύπων και την αντιμετώπιση των παρεμβολών. Στην ουσία, το μοντέλο αυτό εξαιρεί τα ατομικά δικαιώματα ιδιοκτησίας σε υπερεκμετάλλευση των πόρων πυρήνα, αλλά ανέχεται τους περιορισμούς πρόσβασης, γεγονός που παρέχει σε κάποιο βαθμό από κοινού-ιδιοκτησία από την ένταξη στους χρήστες του κοινόχρηστου φάσματος. Οι προσεγγίσεις που περιορίζουν την πρόσβαση και τη χρήση της ζώνης συχνοτήτων από μια ομάδα χρηστών στο πλαίσιο δικαιωμάτων ιδιωτικής ιδιοκτησίας, αναφέρονται ως «privately run commons» ή «commons parks». Τα οφέλη των προσεγγίσεων των «spectrum commons» περιλαμβάνουν χαμηλούς φραγμούς εισόδου στην αγορά (η οποία αποτελεί πηγή ανταγωνισμού), καθόλου ή μικρή αβεβαιότητα σχετικά με την πρόσβαση στη ζώνη συχνοτήτων, χαμηλούς χρόνους παράδοσης από την καινοτομία στην αγορά, λιγότερη πίεση στα αδειοδοτημένα τμήματα του φάσματος, δημιουργικότητα μέσω ανταλλαγής πληροφοριών και ποικιλομορφίας. Το μοντέλο αυτό μπορεί να είναι περισσότερο συμβατό με τις διεθνείς προσπάθειες εναρμόνισης και τυποποίησης καθώς παρέχει ένα συλλογικό αντί για ανταγωνιστικό περιβάλλον για τα πρότυπα εξοπλισμού (δηλαδή οι κατασκευαστές αρχικά συνεργάζονται για τις προδιαγραφές και, στη συνέχεια ανταγωνίζονται στις αγορές) [41].

Είναι επομένως ένα εύλογο ερώτημα κατά πόσο μία τροποποίηση των δικαιωμάτων ιδιοκτησίας εντός του κοινού πλαισίου ιδιοκτησίας, θα βελτιώσει την αποτελεσματικότητα της διαχείρισης συχνοτήτων. Μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα πρόταση είναι η εξάρτηση από περισσότερες ρυθμίσεις που βασίζονται σε κοινότητα για τη διαχείριση του φάσματος. Δύο λογικές μπορεί να συσχετιστούν με τις προτάσεις αυτές. Είναι η πρώτη που επεσήμανε ότι οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία «spread spectrum» εξαλείφει την αναγκαιότητα της ανάθεσης ενός συγκεκριμένου καναλιού σε ένα χρήστη. Αντίθετα, η τεχνολογία της εξαιρετικά χαμηλής ισχύος τμήματος κώδικα πολυπλεξίας επιτρέπει την ομαλή χρήση της ευρείας ζώνης φάσματος από ανταγωνιστικές χρήσεις και χρήστες. Δεδομένου ότι η αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας «spread spectrum» αυξάνεται, όλο και περισσότερες εφαρμογές μπορεί να είναι σε θέση να

χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη φάσματος. Αυτό θα επιτρέψει τη ριζική αναδιοργάνωση της διαχείρισης του φάσματος. Δε θα παρέχεται αποκλειστική χρήση προνομίων για την ομαλή χρήση του φάσματος, αυτά θα γίνουν ακόμη και αντισυνταγματικά (Benkler 1998). Το φάσμα θα μπορούσε να το κατανέμει και να το διαχειρίζεται η κοινότητα των χρηστών βασισμένο σε κανόνες που έχουν θεσπιστεί με αποκεντρωμένο τρόπο [43].

Δεύτερον, οι υποστηρικτές αυτής της θέσης στοχεύουν στην ειδική φύση της καινοτομίας και της νέας οργάνωσης της παραγωγικής διαδικασίας στις προηγμένες βιομηχανίες πληροφοριών και επικοινωνίας. Η καινοτομία στις βιομηχανίες πληροφοριών είναι συχνά σωρευτική, με την ανάπτυξη των προϊόντων και υπηρεσιών πληροφοριών να εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την πρόσβαση στη γνώση που δημιουργήθηκε προηγουμένως. Ομοίως, υπάρχουν ανεπίσημα στοιχεία, και μια διογκωμένη εννοιολογική συζήτηση που συνδέει την ταχύτητα της καινοτομίας στο Διαδίκτυο με τη διαθεσιμότητα μιας πλατφόρμας ανοικτής πρόσβασης (Bar et al. 2000, Lemley και Lessig 2001). Οι επόμενες γενιές επικοινωνίας κινητών τηλεφώνων θα μοιάζουν με την αλυσίδα αξίας στο σταθερό Internet καθώς και μια μεγάλη ώθηση της καινοτομίας, αναμένεται από την ανοικτή πρόσβαση στην πλατφόρμα ασύρματου δικτύου. Δυστυχώς, η χρήση των πλειστηριασμών θα αυξήσει πιθανόν το κίνητρο των φορέων παροχής υπηρεσιών δικτύου για να κλείσουν την πρόσβαση στις δικές τους θυγατρικές υπηρεσίες, ενδεχομένως μειώνοντας τη συνολική δυναμική στο σύνολο του τομέα. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη του φάσματος ως «commons» θεωρείται ζωτικής σημασίας για την υποστήριξη καινοτόμων διαδικασιών και για τη μεγιστοποίηση των οφελών από την προηγμένη επικοινωνία κινητών τηλεφώνων [43].

Η αμερικανική Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών έχει ορίσει περισσότερο από 300 MHz του φάσματος στις ζώνες των 2 GHz και 5 GHz ως μη αδειοδοτημένες. Οι επικριτές επισημαίνουν ότι τα πειράματα με το μη αδειοδοτημένο φάσμα έχουν οδηγήσει σε χαμηλές επενδύσεις και σε τοπικές καταχρήσεις. Οι παρατηρήσεις αυτές φαίνεται να δείχνουν τις αδυναμίες του μοντέλου «commons» της διαχείρισης του φάσματος. Ωστόσο, φαίνεται ότι το μεγαλύτερο ελάττωμα του μη αδειοδοτημένου φάσματος είναι η έλλειψη κανόνων που θα επιτρέψει τη συστηματική χρήση του. Η Buck (2002 υπό έκδοση) συζητά για οκτώ μετα-κανόνες για «spectrum commons», περιλαμβάνοντας ένα σαφή καθορισμό των ορίων, αντιστοιχία μεταξύ των όρων πίστωσης και των τοπικών συνθηκών, τις συλλογικές ρυθμίσεις επιλογής και τις κατάλληλες διαδικασίες παρακολούθησης. Βασισμένοι σε γενικές ιδέες από τη βιβλιογραφία των «commons», οι κανόνες αυτοί θα μπορούσαν να δημιουργήσουν ένα διαρθρωμένο περιβάλλον για τη χρήση του φάσματος χωρίς τη δημιουργία αποκλειστικών δικαιωμάτων που βασίζονται στην οικονομική δύναμη [43].

### 3.3 Spectrum Markets

Το καθεστώς «Spectrum commons» προωθεί τον επιμερισμό, αλλά δεν παρέχει επαρκή ποιότητα υπηρεσίας (QoS) για ορισμένες εφαρμογές. Για εφαρμογές που απαιτούν σποραδική πρόσβαση στο φάσμα και για τις οποίες οι εγγυήσεις QoS είναι σημαντικές, η καλύτερη λύση μπορεί να είναι το αδειοδοτημένο φάσμα με δευτερογενείς αγορές πραγματικού χρόνου (δηλαδή, το μοντέλο των αγορών φάσματος). Η εμπορευματοποίηση επιτρέπει στους παίκτες να συναλλάσσονται απ' ευθείας τα δικαιώματα χρήσης του φάσματος, καθιερώνοντας έτσι μια δευτερογενή αγορά για τη μίσθωση και τον πλειστηριασμό φάσματος. Το μοντέλο αυτό έχει τη δυνατότητα να επιτρέψει στις μικρές επιχειρήσεις να εισέλθουν στην αγορά του φάσματος, ενισχύοντας τον ανταγωνισμό και την καινοτομία στον τομέα των ασύρματων τηλεπικοινωνιών. Σε αντίθεση με τις μη αδειοδοτημένες ζώνες του σήμερα, οι πρωτογενείς και οι δευτερογενείς χρήστες θα συντονιστούν άμεσα, καθιστώντας δυνατή την προστασία της ποιότητας υπηρεσίας τόσο για την πρωτογενείς όσο και για τους δευτερογενείς χρήστες. Σε αυτό το ρητό συντονισμού, ο κάτοχος της άδειας τρέχει μηχανισμούς ελέγχου εισόδου, οι οποίοι επιτρέπουν σε

δευτερογενείς χρήστες την πρόσβαση στο φάσμα, όταν η QoS θα είναι επαρκής τόσο στους πρωτογενείς όσο και στους δευτερογενείς χρήστες. Ο κάτοχος της άδειας χρησιμοποιεί επίσης έναν ευφυή αλγόριθμο εκχώρησης συχνοτήτων για τον καθορισμό της συχνότητας στην οποία ένας δευτερεύον χρήστης θα πρέπει να αφεθεί να χειριστεί και τα οικονομικά των εν λόγω συναλλαγών που παρέχουν κίνητρα για να μεγιστοποιήσουν τη χρησιμοποίηση του φάσματος. Οι δευτερογενείς χρήστες ζητούν δυναμικά την πρόσβαση στο φάσμα, όταν το φάσμα χρειάζεται. Η εμπορευματοποίηση της δευτερογενούς χρήσης μπορεί να συμβεί μέσω μεσαζόντων, όπως έναν μεσίτη φάσματος (spectrum broker). Σε γενικές γραμμές, οι μηχανισμοί που ψάχνουν για έναν αγώνα μεταξύ των πρωτογενών και δευτερογενών χρηστών βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στους τύπους υπηρεσιών, τα χαρακτηριστικά της πρόσβασης και τα επίπεδα υπηρεσίας που επιζητούνται από τους δευτερογενείς χρήστες. Οι τύποι πρόσβασης θα μπορούσαν να αποτελούνται από μια μακροχρόνια μίσθωση, μία προγραμματισμένη μίσθωση και μία βραχυπρόθεσμη μίσθωση. Κάθε τύπος απαιτεί διαφορετικούς μηχανισμούς και εφαρμόζεται με διαφορετικά επίπεδα συμφωνιών παροχής υπηρεσιών [44].

Ωστόσο, η πρόοδος σε διεθνές επίπεδο για τη μετάβαση από την διοίκηση και τον έλεγχο (command and control) στις αγορές ραδιοφάσματος υπήρξε αργή και μερική, με περιορισμένη εφαρμογή στη χρήση δημόσιου τομέα, συμπεριλαμβανομένων, για παράδειγμα, και των στρατιωτικών. Το κόστος για την καλή διαβίωση σε όρους απολεσθέντων υπηρεσιών και αύξησης της παραγωγικότητας είναι πιθανό να είναι πολύ μεγάλο, με τη συμβολή των ΤΠΕ (ICT) περίπου το μισό της συνολικής αύξησης της παραγωγικότητας βρίσκεται στις ΗΠΑ και την Ευρώπη, καθώς και αυξημένα περιθώρια για το wireless ώστε να συμβάλει στη δικτυωμένη οικονομία.

Η έκταση της εφαρμογής των μηχανισμών της αγοράς για το ραδιοφάσμα, στην πράξη, είναι γενικά περιορισμένη, παρά τα πιθανά οφέλη. Παρ' όλο που πολλές χώρες έχουν χρησιμοποιήσει δημοπρασίες για εκχώρηση άδειων για πρόσβαση σε κινητές και ασύρματες υπηρεσίες σχετικά λίγες χώρες έχουν προχωρήσει πέρα από αυτό για την εφαρμογή της μεταρρύθμισης για τη δημιουργία δικαιωμάτων πρόσβασης στο φάσμα που μπορούν να διακινούνται ελεύθερα στο εμπόριο και να επιτρέπεται η αλλαγή της χρήσης ή της τεχνολογίας (δηλαδή ότι έχουν ελευθερωθεί).

Ένα άλλο σκέλος της επιχειρηματολογίας για την παρέμβαση στην κατανομή του ραδιοφάσματος είναι ότι η μια προσέγγιση βασισμένη στην αγορά που θα οδηγούσε σε υπερβολική ισχύ στην αγορά είτε η αγορά ραδιοφάσματος ή την τελική αγορά των υπηρεσιών μέσω της μονοπώλησης της περιορισμένων εισροών φάσματος. Μια σπάνια είσοδος μπορεί να οδηγήσει σε ισχύ στην αγορά, αλλά αυτό το πρόβλημα δεν είναι μοναδικό στο ραδιοφάσμα, για παράδειγμα, οι εκμεταλλεύσεις γης από υπεραγορές στο Ηνωμένο Βασίλειο έχουν διερευνηθεί με γενικό διαγωνισμό εξουσίας. Περαιτέρω, ενδεχόμενες ανησυχίες για τον ανταγωνισμό δεν πρέπει να αποτελούν εμπόδιο για την εισαγωγή του στην προσεγγιστική αγορά που βασίζεται στην κατανομή του ραδιοφάσματος, υπό την προϋπόθεση ότι αναφέρεται ρητά στο σχεδιασμό των πολιτικών.

Εν τω μεταξύ γενικές διατάξεις του δικαίου του ανταγωνισμού θα μπορούσαν να κριθούν ως επαρκής αντιμετώπιση αυτών των ανησυχιών. Αν όχι, θα υπάρχουν παρεμβάσεις όπως περιορισμός στο εύρος του ραδιοφάσματος που θα μπορεί να αποκτήσει μια εταιρεία, το επιπλέον φάσμα θα βγαίνει σε πλειστηριασμό. Η διαθεσιμότητα του επιπλέον φάσματος στο μέλλον και η απόκτηση του θα γίνεται μέσω συναλλαγών ή δημοπρασιών, ή νέες τεχνολογίες όπως η WiMAX και WiFi, μπορούν επίσης να αποδιοργανώσουν όσα ισχύουν στην αγορά, για παράδειγμα, η αγορά των κινητών. Παρά τις ανησυχίες σχετικά με την αγοραστική δύναμη που εμποδίζει την εισαγωγή, οι αγορές φάσματος (spectrum markets) πρέπει να το δουν σαν να μειώνουν τη δυνατότητα για την κατάχρηση αγοράς. Για παράδειγμα, ο HAZLETT, (IBARGUEN & LEIGHTON (2007) ) διαπίστωσε ότι στη Γουατεμάλα οι αγορές φάσματος συνέβαλαν στον αυξανόμενο ανταγωνισμό και συνεπώς σε χαμηλότερες τιμές [45].

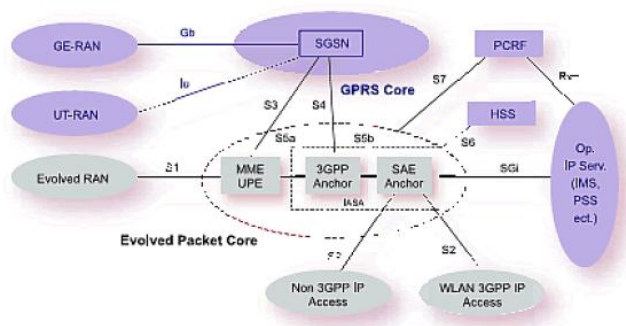
## 4. LTE και UMTS

### 4.1 LTE (Long Term Evolution)

#### 4.1.1 Επισκόπηση

Ο όρος **LTE (Long Term Evolution)** εκφράζει ένα σημαντικό βήμα στις κινητές ραδιοεπικοινωνίες, και εισήχθη στην έκδοση 8 (Release 8) της 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Ο στόχος της 3GPP είναι η καθολική βελτίωση των κινητών τηλεπικοινωνιών UMTS και να παρασχεθεί μια ενισχυμένη εμπειρία χρηστών και μια απλουστευμένη τεχνολογία για την ευρυζωνική κινητή τηλεφωνία επόμενης γενεάς. Η 3GPP είναι μια παγκόσμια κοινή προσπάθεια και αποτελείται από ομάδες μηχανικών και ερευνητών που εκπροσωπούν πάνω από 60 operators, προμηθευτές και κέντρα έρευνας με στόχο την τυποποίηση αυτής της καινούργιας αρχιτεκτονικής. Μεγάλο μέρος των προτύπων 3GPP Release 8 προσανατολίζονται γύρω από την αναβάθμιση του UMTS στο 4G και την μεταμόρφωση της αρχιτεκτονικής δικτύου από ιεραρχική σε επίπεδη, βασισμένη στο πρωτόκολλο IP [46].

Το **LTE** είναι το τελευταίο πρότυπο στο δέντρο της κινητό τεχνολογίας του δικτύου που μέχρι πρόσφατα ήταν οι GSM / EDGE και UMTS / HSxPA τεχνολογίες δικτύων [47]. Πρόκειται για ένα έργο του 3rd Generation Partnership Project (3GPP), που λειτουργεί κάτω από ένα εμπορικό σήμα με μια από τις ενώσεις μέσα στη συνεργασία, το Ευρωπαϊκό Ίδρυμα Προτύπων Τηλεπικοινωνιών (European Telecommunications Standards Institute).



Εικόνα 4.1: Evolved Packet Core

Οι προδιαγραφές του LTE παρέχουν τα μέγιστα ποσοστά downlink peak rates συνδέσεων τουλάχιστον 100 Mbps, uplink τουλάχιστον 50 Mbps και λιγότερο από 10 ms στο RAN round-trip times. Το LTE υποστηρίζει κλιμακούμενα carrier bandwidths, από 1.4 MHz έως 20 MHz και υποστηρίζει τόσο το FDD όσο και το TDD.

Μέρος των προτύπων LTE είναι η εξέλιξη αρχιτεκτονικής συστημάτων, μια οριζόντια IP-based δικτυακή αρχιτεκτονική σχεδιασμένη με σκοπό να αντικαταστήσει το GPRS Core Network και να εξασφαλίσει την υποστήριξη για, και την κινητικότητα μεταξύ, κάποιου legacy η non-3GPP συστημάτων, παραδείγματος χάριν τα GPRS και WiMax αντίστοιχα [48].

Τα κύρια πλεονεκτήματα με τα LTE είναι υψηλό throughput, χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση, plug and play, FDD και TDD στην ίδια πλατφόρμα, μια βελτιωμένη εμπειρία τελικών χρηστών

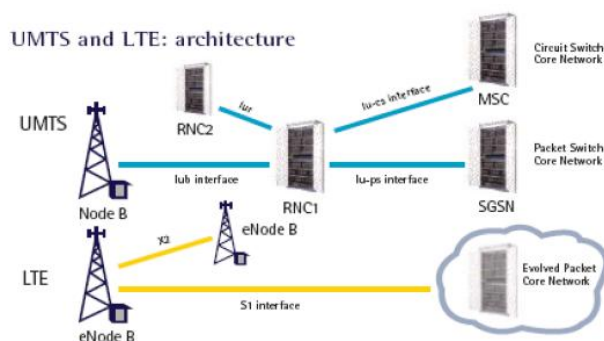
και μια απλή αρχιτεκτονική με συνέπεια τις χαμηλές λειτουργικές δαπάνες. Το LTE θα υποστηρίξει επίσης το άνευ ραφής (seamless) πέρασμα στους πύργους κυττάρων με παλαιότερη τεχνολογία δικτύων όπως είναι το GSM, cdmaOne, το UMTS, και CDMA2000. Το επόμενο βήμα για την εξέλιξη του LTE είναι το LTE Advanced και τυποποιείται αυτήν την περίοδο στην 3GPP έκδοση 10 [52].

#### 4.1.2 Τρέχουσα κατάσταση

Το LTE στοχεύει στην εκπλήρωση των απαιτήσεων των δικτύων επόμενης γενιάς συμπεριλαμβανομένων των μέγιστων downlink ταχυτήτων (peak rates) 100Mbps, 50 Mbps στο uplink και roundtrip χρόνος λιγότερο από 10ms στο δίκτυο πρόσβασης (RAN). Το LTE υποστηρίζει τα εύκαμπτα ραδιοευρυζωνικά σχήματα (flexible carrier bandwidths) από 1.4MHz μέχρι 20MHz καθώς επίσης και τα γνωστά ντούμπλεξ σχήματα FDD και TDD .

Οι στόχοι LTE περιλαμβάνουν τη βελτίωση της φασματικής αποδοτικότητας, που χαμηλώνει τις δαπάνες, βελτιώνοντας τις υπηρεσίες, που χρησιμοποιούν το νέο φάσμα και τις ευκαιρίες του *refarmed* φάσματος, και η καλύτερη ενσωμάτωση με άλλα ανοικτά πρότυπα.

Τα κύρια πλεονεκτήματα του LTE είναι υψηλό throughput, low latency, εξ αρχής plug and play (αυτορυθμιζόμενος πυρήνας και άκρες δικτύου), FDD/TDD στην ίδια πλατφόρμα, εξαιρετική εμπειρία για τον χρήστη και απλή αρχιτεκτονική με συνέπεια τις χαμηλές λειτουργούσες δαπάνες (OPEX). Το LTE θα υποστηρίξει επίσης τη συνεχή σύνδεση (backward compatibility) στα υπάρχοντα δίκτυα, όπως το GSM, CDMA και WCDMA. Εντούτοις η δομή του LTE αποτελείται από καινούργιες αρχιτεκτονικές/τεχνολογίες RAN και core δικτύου και δεν είναι συμβατές με τις προηγούμενες παρούσες τεχνολογίες και εκδόσεις των συστημάτων UMTS.



Εικόνα 4.2: UMTS και LTE αρχιτεκτονική.

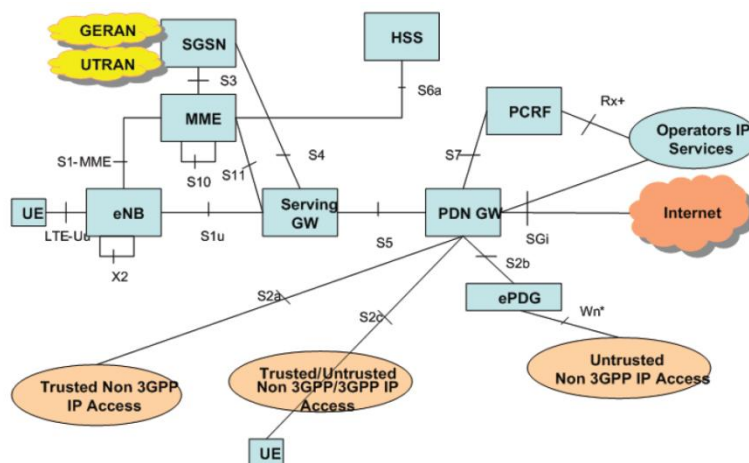
Ένα χαρακτηριστικό των δικτύων επόμενης γενιάς είναι ότι είναι βασισμένα στο πρωτόκολλο TCP/IP. Αυτό παρέχει στους χρήστες πλουσιότερη εμπειρία επικοινωνιών συμπεριλαμβανομένης της ενισχυμένης φωνής, του βίντεο, και των υπηρεσιών μηνύματος και των προηγμένων λύσεων πολυμέσων. Το 2004, η 3GPP πρότεινε το TCP/IP ως το βασικό πρωτόκολλο διασύνδεσης για τα δίκτυα επόμενης γενιάς και άρχισε τις μελέτες σκοπιμότητας (feasibility studies) σε αρχιτεκτονικές IP (AIPN). Οι προτάσεις που αναπτύχθηκαν περιέλαβαν τις συστάσεις για 3GPP Release 7 (2005), οι οποίες θα λειτουργήσουν ως βάσεις πρωτοκόλλων πιο υψηλού επιπέδου όπως το LTE. Αυτές οι συστάσεις είναι μέρος της 3GPP αρχιτεκτονικής συστημάτων System Architecture Evolution (SAE). Μερικές πτυχές των all IP δικτύων, εντούτοις, έχουν καθοριστεί ήδη από την 3GPP Release 4. Η 3GPP καθορίζει την επίπεδη δικτυακή αρχιτεκτονική ως τμήμα της SAE. Η αρχιτεκτονική και οι έννοιες LTE SAE έχουν σχεδιαστεί για την αποδοτική υποστήριξη *mass-market* της χρήσης οποιασδήποτε βασισμένη σε IP υπηρεσία. Η αρχιτεκτονική είναι βασισμένη σε μία από τις προτεινόμενες εξελίξεις (υπήρχανε αρκετές τέτοιες προτάσεις) των υπαρχόντων δικτύων GSM/WCDMA με απλουστευμένες διαδικασίες και την ομαλή,



οικονομικά αποδοτική επέκταση. Το κύριο συστατικό της αρχιτεκτονικής SAE είναι ο εξελιγμένος πυρήνας πακέτων (Enhanced Packet Core or EPC), επίσης γνωστός ως πυρήνας SAE. Το EPC θα εξυπηρετήσει όπως ισοδύναμο των δικτύων GPRS (μέσω των υποσυστημάτων (subcomponents) Mobility Management Entity, Serving Gateway και PDN Gateway) [29].

### 4.1.3 LTE Αρχιτεκτονική

Για να ελαχιστοποιηθεί η πολυπλοκότητα του δικτύου, αυτή την περίοδο η συμφωνηθείσα αρχιτεκτονική του LTE είναι όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3 [50,51].



Εικόνα 4.3: Αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου για LTE.

Η αρχιτεκτονική αποτελείται από τέσσερα λειτουργικά στοιχεία τα οποία είναι το Evolved Radio Access Network (RAN), το Serving Gateway (SGW), το Mobility Management Entity (MME) και το Packet Data Network Gateway (PDN GW).

#### 4.1.3.1 Evolved Radio Access Network (RAN)

Το εξελιγμένο RAN για LTE αποτελείται από ένα μόνο κόμβο, δηλαδή, ο eNodeB (ENB) που διασυνδέεται με το UE. Η ENB φιλοξενεί το Φυσικό επίπεδο (PHY), το Medium Access Control (MAC), το Radio Control Link (RLC), και το Packet Data Control Protocol (PDCP) που περιλαμβάνουν τη λειτουργικότητα της user-plane header-compression και κρυπτογράφησης. Προσφέρει επίσης τη λειτουργία του Radio Resource Control (RRC) που αντιστοιχεί στον έλεγχο αεροπλάνου (control plane). Επιτελεί πολλές λειτουργίες, συμπεριλαμβανομένης της διαχείριση των πόρων ραδιοφωνίας, τον έλεγχο εισόδου, τον προγραμματισμό, την επιβολή των διαπραγματεύσεων UL QoS, cell information broadcast, κρυπτογράφησης / αποκρυπτογράφηση του χρήστη και τα δεδομένα αεροπλάνο ελέγχου, καθώς και συμπίεση / αποσυμπίεση των DL / UL user plane packet headers [47].

#### 4.1.3.2 Serving Gateway (SGW)

Οι SGW δρομολογητές και τα προς τα εμπρός πακέτα στοιχείων χρηστών, ενεργούν ως άγκυρα κινητικότητας για το αεροπλάνο χρηστών (user plane) κατά τη διάρκεια των inter-eNB



παραδόσεων και ως άγκυρα για την κινητικότητα μεταξύ LTE και άλλων 3GPP τεχνολογιών (που ολοκληρώνουν τη διεπαφή S4 και που αναμεταδίδουν την κυκλοφορία μεταξύ των συστημάτων 2G/3G και PDN GW). Για κατάσταση αδράνειας UEs, το SGW ολοκληρώνει την πορεία στοιχείων DL και πυροδοτεί τηλεειδοποιήσεις όταν δεδομένα DL καταφθάνουν για UE. Διαχειρίζεται και αποθηκεύει τα πλαίσια UE, π.χ. παράμετροι της υπηρεσίας φορέων IP, πληροφορίες δρομολόγησης εσωτερικού δικτύου. Εκτελεί επίσης την αντένσταση της κυκλοφορίας χρηστών σε περίπτωση νόμιμης παρεμπόδισης [47].

#### **4.1.3.3 Mobility Management Entity (MME)**

Το MME είναι το κλειδί για τον έλεγχο-κόμβος για την LTE πρόσβαση δικτύου. Είναι υπεύθυνη για την κατάσταση αδράνειας εντοπισμού UE και την διαδικασία τηλεειδοποίησης, συμπεριλαμβανομένων των αναμεταδόσεων. Περιλαμβάνεται στη διαδικασία ενεργοποίησης/απενεργοποίησης φορέων και είναι επίσης αρμόδιο για την επιλογή του SGW για ένα UE στην αρχική σύνδεση και στο χρόνο της intra-LTE handover που περιλαμβάνει τον επανεντοπισμό του κόμβου Core Network (CN) node. Είναι αρμόδιο για την επικύρωση του χρήστη (με την αλληλεπίδραση με το HSS). Η Non-Access Stratum (NAS) επισημαίνει τη λήξη στα MME και είναι επίσης υπεύθυνη για την παραγωγή και την κατανομή των προσωρινών ταυτοτήτων στα UEs. Ελέγχει την έγκριση του UE για να στρατοπεδεύσει στο Public Land Mobile Network (PLMN) και επιβάλλει τους περιορισμούς περιαγωγής (roaming) UE.

Το MME είναι το σημείο τερματισμού στο δίκτυο για την κρυπτογράφηση/προστασία της ακεραιότητας της σηματοδότησης NAS και διαχειρίζεται την ασφάλεια διαχείρισης των κλειδιών. Νόμιμη παρακολούθηση την σηματοδότησης υποστηρίζεται επίσης από τις MME. Το MME παρέχει επίσης τη λειτουργία επίπεδο ελέγχου για την κινητικότητα μεταξύ LTE και 2G/3G δίκτυα πρόσβασης με την S3 διεπαφή που λήγει στο MME από το SGSN. Το MME τερματίζει επίσης τη διεπαφή S6a προς την αρχική HSS για την περιαγωγή (roaming) των UEs [47].

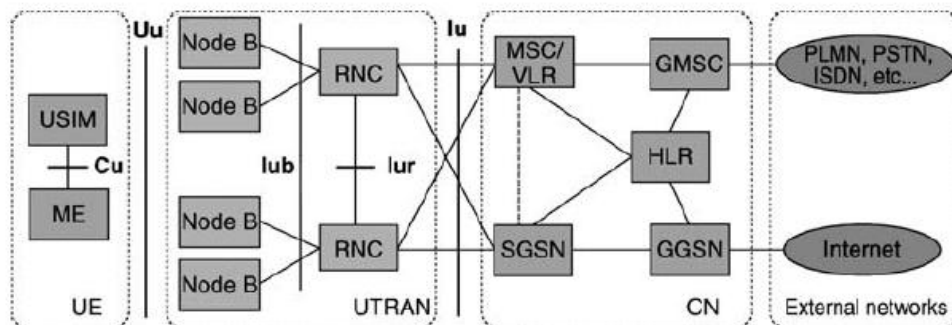
#### **4.1.3.4 Packet Data Network Gateway (PDN GW)**

Το PDN GW παρέχει συνδετικότητα στο UE στα εξωτερικά πακέτα δικτύων δεδομένων με το να γίνεται το σημείο της εξόδου και εισόδου της κυκλοφορίας για τα UE. Ένα UE μπορεί να έχει την ταυτόχρονη συνδετικότητα με περισσότερα από ένα PDN GW για την πρόσβαση πολλαπλάσιων PDNs. Το PDN GW εκτελεί την πολιτική επιβολή, το φιλτράρισμα πακέτων για κάθε χρήστη, την υποστήριξη χρέωσης, τη νόμιμες παρεμπόδιση και τη διαλογή πακέτων. Ένας άλλος βασικός ρόλος του PDN GW είναι να ενεργήσει ως άγκυρα για την κινητικότητα μεταξύ 3GPP και μη-3GPP τεχνολογιών όπως WiMAX και 3GPP2 (CDMA 1X και EvDO) [47].

## 4.2. UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*)

### 4.2.1 Αρχιτεκτονική των UMTS

Η αρχιτεκτονική του δικτύου UMTS απεικονίζεται στην Εικόνα 4.4 η οποία αποτελείται από τρεις τομείς οι οποίοι αλληλεπιδρούν: το δίκτυο πυρήνα (Core Network (CN)), το UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN) και τα μηχανήματα των Χρηστών (User Equipment (UE)). Το core network χειρίζεται τον έλεγχο κλήσης (call control) και τις λειτουργίες της διαχείρισης κινητικότητας (mobility management functionalities) ενώ το UTRAN διαχειρίζεται τη μετάδοση πακέτων ραδιοφώνου (radio packet transmission) και τη διαχείριση των πόρων. Η δρομολόγηση και η μεταφορά πακέτων μέσα στο κεντρικό δίκτυο (core network) υποστηρίζονται εξ' ορισμού από τους νέους λογικούς κόμβους δικτύου (logical network nodes) οι οποίοι ονομάζονται Gateway GPRS Support Node (GGSN) και Serving GPRS Support Node (SGSN). Το GGSN είναι βασικά ένας δρομολογητής πακέτων με πρόσθετα χαρακτηριστικά διαχείρισης κινητικότητας (mobility management features) και συνδέεται με διάφορα στοιχεία δικτύων μέσω των τυποποιημένων διεπαφών. Το GGSN ενεργεί ως μια φυσική διεπαφή στα εξωτερικά πακέτα δεδομένων του δικτύου. Το SGSN χειρίζεται την παράδοση των πακέτων από και προς τα κινητά τερματικά. Κάθε SGSN είναι υπεύθυνο για την παράδοση των πακέτων στα τερματικά μέσα στην περιοχή υπηρεσιών του. Η UMTS core network αρχιτεκτονική κληρονομεί το μεγαλύτερο μέρος της δομής της από το GSM \ GPRS. Το UTRAN αποτελείται από ένα ή περισσότερα υποσυστήματα ραδιοφωνικών δικτύων (Radio Network Subsystems, RNSs), τα οποία αποτελούνται από τους σταθμούς βάσης (κόμβος BS) και τους ελεγκτές ραδιοφωνικών δικτύων (Radio Network Controllers, RNCs). Το RNS εκτελεί όλες τις λειτουργίες που σχετίζονται με τους πόρους ραδιοφώνου και της λειτουργίες διαχείρισης του air interface. Τα μηχανήματα του χρήστη (user equipment, UE) είναι το κινητό τερματικό. Το UE αποτελείται από δύο μέρη, τον κινητό εξοπλισμό (ME) και το USIM (καθολική ενότητα ταυτότητας συνδρομητών, Universal Subscriber Identity Module).



Εικόνα 4.4: Αρχιτεκτονική UMTS [52]

### 4.2.2 Χαρακτηριστικά του UMTS

Τα UMTS μπορούν να λειτουργούν σε δύο βασικούς τρόπους: Frequency Division Duplex (FDD) και Time Division Duplex (TDD) (βλέπε Πίνακα 4.1). Στον FDD χρησιμοποιούνται δύο χωριστές ζώνες συχνοτήτων ( $2 * 5$  MHz) μια για την uplink σύνδεση και μια για την downlink σύνδεση. Αυτός ο τρόπος χρειάζεται δυο φορές το διάστημα που επικοινωνεί (μετάδοση και λήψη) και σε ορισμένες υπηρεσίες (π.χ., εφαρμογές Ιστού) ο αριθμός πακέτων που στέλνονται είναι διαφορετικός από τον αριθμό πακέτων που λαμβάνει, είναι μια ασυμμετρική σύνδεση, που

σπαταλά το εύρος ζώνης στο uplink. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας χρησιμοποιείται στην Ευρώπη και είναι εύκολο να εφαρμοστεί. Ο TDD χρησιμοποιεί την ίδια ζώνη συχνότητας για τη διαβίβαση και τη λήψη των στοιχείων σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα, κατά συνέπεια χρησιμοποιεί μόνο 5 MHz του εύρους ζώνης. Ωστόσο, είναι πιο δύσκολο να εφαρμοστεί κι αυτό είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο αυτός ο τρόπος λειτουργίας δεν χρησιμοποιείται ευρέως.

	UMTS FDD	UMTS TDD
Πολλαπλή πρόσβαση	CDMA	CDMA
Διαμόρφωση	QPSK	QPSK
Carrier Spacing	5 MHz (200 KHz raster)	5 MHz (200 KHz raster)
Μήκος πλαισίου	10 ms	10 ms
Slots per Frame	15	15
Chip Rate	3.84 Mcps	3.84 Mcps

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά των UMTS στους δύο τρόπους λειτουργίας.

Επιπλέον, στον FDD τρόπο η κατανομή της χωρητικότητας κυκλοφορίας στα uplink και downlink δεν μπορεί να αλλάξει λόγω των σταθερών συχνοτήτων στα κανάλια εύρους ζώνης. Στον TDD τρόπο το τμήμα του χρονικού πλαισίου που είναι διαθέσιμο για uplink και downlink μπορεί να ποικίλλει. Αυτό εμφανίζεται μέσω της επιλογής ενός σημείου μετατροπής μέσα σε ένα χρονικό πλαίσιο. Ο τρόπος FDD είναι ο πιο συνηθισμένος duplexing τρόπος στα δίκτυα UMTS.

### 4.2.3 Ειδικές ανάγκες βάσης-σταθμού (BS Specific Requirements)

Οι απαιτήσεις των BS συσχετίζονται κυρίως με τη δύναμη παραγωγής (output power),  $P_{out}$ . Η οποία ονομάζεται ως μέση δύναμη ενός carrier που παραδίδεται σε ένα φορτίο με αντίσταση ίση με την ονομαστική αντίσταση φορτίου του πομπού. Η μέγιστη δύναμη παραγωγής,  $P_{max}$ , των BS είναι το μέσο επίπεδο δύναμης ανά μεταφορέα (carrier) που μετρείται στο συνδεδημένο κεραιών στο διευκρινισμένο όρο αναφοράς. Η εκτιμημένη δύναμη παραγωγής, PRAT, ενός BS είναι το μέσο επίπεδο δύναμης ανά μεταφορέα που ο κατασκευαστής έχει δηλώσει για να είναι διαθέσιμο στο συνδεδημένο κεραιών.

Οι σταθμοί βάσης ευρείας περιοχής χαρακτηρίζονται από τις απαιτήσεις που προέρχονται από τα macro σενάρια κυττάρων με ένα BS σε ένα UE με ελάχιστη απώλεια συζεύξεων ίση με 70 DB. Η κατηγορία των BS ευρείας περιοχής έχει τις ίδιες απαιτήσεις με τις BS για την εφαρμογή γενικού σκοπού στις εκδόσεις 99, 4 και 5 [53].

Οι μεσαίας ακτίνας σταθμοί βάσης χαρακτηρίζονται από τις απαιτήσεις που προέρχονται από τα micro σενάρια κυττάρων με ένα BS σε ένα UE με ελάχιστη απώλεια συζεύξεων ίση με 53 DB.

Οι τοπικοί σταθμοί βάσης περιοχής χαρακτηρίζονται από τις απαιτήσεις που προέρχονται από τα pico σενάρια κυττάρων με τους BS σε ένα UE με ελάχιστη απώλεια συζεύξεων που είναι ίση με 45 DB.

Η εκτιμημένη δύναμη παραγωγής, PRAT, των BS θα είναι τόσο διευκρινισμένη όσο στον Πίνακα 4.2.

Κατηγορίες BS	PRAT
BS ευρείας περιοχής	- (Δείτε την παρακάτω σημείωση)
BS μεσαίας περιοχής	$\leq +38$ dBm
BS τοπικής περιοχής	$\leq +24$ dBm
Home BS	$\leq +20$ dBm (χωρίς ποικιλομορφία μετάδοσης, ή MIMO)

	$\leq + 17$ dBm (με ποικιλομορφία μετάδοσης ή MIMO)
Σημείωση: Δεν υπάρχει κανένα ανώτερο όριο που απαιτείται για την εκτιμημένη δύναμη παραγωγής του σταθμού βάσης ευρείας περιοχής όπως για το σταθμό βάσης για την εφαρμογή γενικού σκοπού στην απελευθέρωση 99, 4, και 5.	

Πίνακας 4.2: Εκτιμημένη δύναμη παραγωγής BS [53].

Η συνολική δύναμη δυναμικής περιοχής είναι η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης δύναμης παραγωγής για έναν διευκρινισμένο όρο αναφοράς. Το ανώτερο όριο της δυναμικής περιοχής είναι η μέγιστη δύναμη παραγωγής των BS. Το χαμηλότερο όριο της δυναμικής περιοχής είναι η χαμηλότερη ελάχιστη δύναμη από τις BS όταν δεν ενεργοποιείται κανένα κανάλι κυκλοφορίας. Η downlink (DL) συνολική δύναμη δυναμικής περιοχής θα είναι 18 DB ή μεγαλύτερη.

#### 4.2.4 Συγκεκριμένες απαιτήσεις UE (UE Specific Requirements)

Οι κατηγορίες δυνάμεων UE καθορίζουν την ονομαστική μέγιστη δύναμη παραγωγής εξοπλισμού, στον παρακάτω πίνακα απεικονίζονται μόνο οι κατηγορίες δύναμης UE στις ζώνες TVWS.

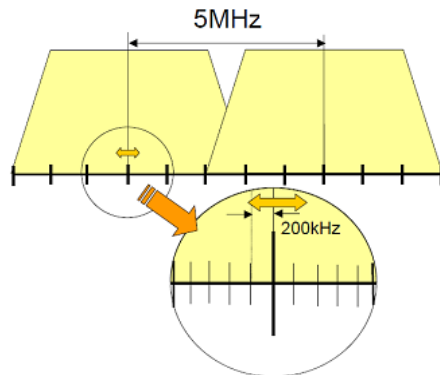
Operating Band	Power Class 3		Power Class 3bis		Power Class 4	
	Power (dBm)	Tol (dB)	Power (dBm)	Tol (dB)	Power (dBm)	Tol (dB)
Band XII	+24	+1/-3	23	+2/-2	+21	+2/-2
Band XIII	+24	+1/-3	23	+2/-2	+21	+2/-2
Band XIV	+24	+1/-3	23	+2/-2	+21	+2/-2

Πίνακας 4.3: UE power classes [53].

Η ελάχιστη δύναμη παραγωγής ορίζεται ως η μέση δύναμη σε ένα slot χρόνου. Η ελάχιστη δύναμη παραγωγής (output power) θα είναι μικρότερη από -50 dBm. Σημείωση: δείτε τον Πίνακα 4.4 για να δείτε το φάσμα των συχνοτήτων UL και DL των λειτουργουσών ζωνών (operating bands).

#### 4.2.5 UMTS Carriers

Η ονομαστική απόσταση των καναλιών είναι 5 MHz, αλλά αυτό μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να βελτιστοποιηθεί η απόδοση σε ένα συγκεκριμένο σενάριο ανάπτυξης. Το raster των καναλιών είναι 200 kHz για όλες τις ζώνες, αυτό σημαίνει ότι η κεντρική συχνότητα θα πρέπει να είναι ένας ακέραιος αριθμός πολλαπλάσιος των 200kHz. Έτσι είναι δυνατό να κινηθεί η κεντρική συχνότητα του μεταφορέα (carrier) σε ένα raster των 200 KHz. Η επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ των συχνοτήτων καναλιών μπορεί να είναι μεταξύ 4,4 MHz έως 5,6 MHz στα 200 KHz βήματα (βλ. Εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.5: Carrier space and carrier spacing raster

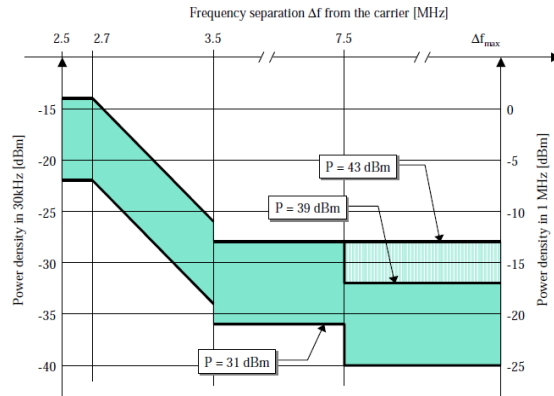
Αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα υπάρχει ουσιαστικά για ρυθμιστικούς λόγους έτσι ώστε τα συστήματα των διαφορετικών χειριστών, που εργάζονται ο ένας παράλληλα με τον άλλον σε ένα φάσμα, να προστατεύονται αμοιβαία από την παρέμβαση που προκαλείται από τη γειτονική μετάδοση καναλιών του άλλου συστήματος. Το UMTS σε FDD λειτουργία θα απαιτούσε δύο κανάλια των 5 MHz εύρος ζώνης το κάθε ένα, ένα για uplink και ένα για downlink. Με αυτή την έννοια, αν ο UMTS FDD τρόπος λειτουργίας χρησιμοποιείται σε συγκρότημα TVWS, θα απαιτούνται δύο κανάλια DVB-T δεδομένου ότι τα κανάλια DVB-T είναι 8 MHz εύρος ζώνης. Κατά συνέπεια, αρκετό μέρος του εύρους ζώνης σπαταλιέται. Στον TDD τρόπο, αφού το ίδιο κανάλι των 5 MHz χρησιμοποιείται για uplink και downlink, θα απαιτηθεί μόνο ένα κανάλι DVB-T. Δεδομένου ότι ο τρόπος FDD χρησιμοποιείται περισσότερο από τον τρόπο TDD, η χρήση UMTS μέσα στη ζώνη TVWS μπορεί να περιοριστεί. Ο Πίνακας 4.4 [54] απαριθμεί τις συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων UMTS που λειτουργούν στον τρόπο FDD.

Ζώνη λειτουργίας	UL συχνότητες UE transmit, Node B receive	DL συχνότητες UE receive, Node B transmit
XII	698 – 716 MHz	728 – 746 MHz
XIII	777 - 787 MHz	746 - 756 MHz
XIV	788 – 798 MHz	758 – 768 MHz

Πίνακας 4.4: UTRA FDD ζώνες συχνοτήτων.

#### 4.2.6 Εκπομπές εκτός ζώνης (Out of Band Emissions)

Οι εκπομπές εκτός ζώνης είναι ανεπιθύμητες εκπομπές αμέσως έξω από το εύρος ζώνης καναλιού που προκύπτουν από τη διαδικασία διαμόρφωσης και μη γραμμικότητας στη συσκευή αποστολής σημάτων, αλλά εξαιρούνται οι πλαστές εκπομπές (spurious emissions). Αυτή η απαίτηση εκπομπής εκτός ζώνης προσδιορίζεται τόσο από την άποψη της φασματικής εκπομπής (spectrum emission mask) όσο και από το συντελεστή ισχύος του γειτονικού καναλιού για τον πομπό.



Εικόνα 4.6: Επεξηγηματικό διάγραμμα της μάσκας εκπομπών ραδιοφάσματος για BS στο UMTS [53]

Η Εικόνα 4.6 δείχνει τη μάσκα του ραδιοφάσματος στην δεξιά πλευρά της φέρουσας συχνότητας (το αριστερό άξονα  $y$  είναι σαν ένας καθρέφτης, γεγονός που στην αριστερή πλευρά έχει την ίδια συμπεριφορά).

Η Ηλεκτρονική Επιτροπή επικοινωνιών (Electronic Communications Committee ECC) έχει υιοθετήσει [55] την απόφαση που καθορίζει μια απαίτηση: "Απαιτήσεις που βασίζονται σε Out-of-block BEM για 'κινητές/σταθερές επικοινωνίες δικτύων' (MFCN) σταθμούς βάσης μέσα στην κατανομή του φάσματος που διατίθεται στις broadcasting (DTT) υπηρεσίες", όπου καθορίζονται τρεις διαφορετικές καταστάσεις A, B, και Γ για την προστασία της ραδιοφωνικής αναμετάδοσης DTT. Αυτές οι περιπτώσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα ανά-κανάλι ή/και μια βάση ανά-περιοχή, δηλ. για το ίδιο κανάλι διαφορετικές περιπτώσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές (π.χ. περιοχή σχετική με την κάλυψη DTT) και οι διαφορετικές περιπτώσεις μπορούν να εφαρμοστούν στα διαφορετικά κανάλια στην ίδια γεωγραφική περιοχή.

Ο Πίνακας 4.5 παρουσιάζει απαιτήσεις που βασίζονται σε out-of-block BEM (block Edge Mask) BEM (block Edge Mask) για τους σταθμούς βάσης MFCN μέσα στην κατανομή του φάσματος που διατίθεται στις broadcasting (DTT) υπηρεσίες. Η ρυθμιστική απαίτηση περιορίζει το EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power) επίπεδο στο ανώτατο όριο για την περίπτωση προστασίας που καθορίζεται στον κανονισμό.

Περίπτωση	Περιοχή συχνοτήτων εκπομπών out-of-block	Συνθήκες στο BS in-block EIRP, P dBm/{ 10 MHz }	Μέγιστη μέση out-of-block EIRP	Μέτρηση bandwidth
A	Για τις συχνότητες DTT όπου το broadcasting προστατεύεται	$P \geq 59$	0 dBm	8 MHz
		$36 \leq P < 59$	(P-59) dBm	8 MHz
		$P < 36$	-23 dBm	8 MHz
B	Για τις συχνότητες DTT όπου το broadcasting υπόκειται σε ένα ενδιάμεσο επίπεδο προστασίας	$P \geq 59$	10 dBm	8 MHz
		$36 \leq P < 59$	(P-49) dBm	8 MHz
		$P < 36$	-13 dBm	8 MHz
Γ	Για τις συχνότητες DTT όπου το broadcasting δεν προστατεύεται	Χωρίς συνθήκες	22 dBm	8 MHz

Πίνακας 4.5: Όρια EIRP για την προστασία της ραδιοφωνικής αναμετάδοσης (DTT) της υπηρεσίας.

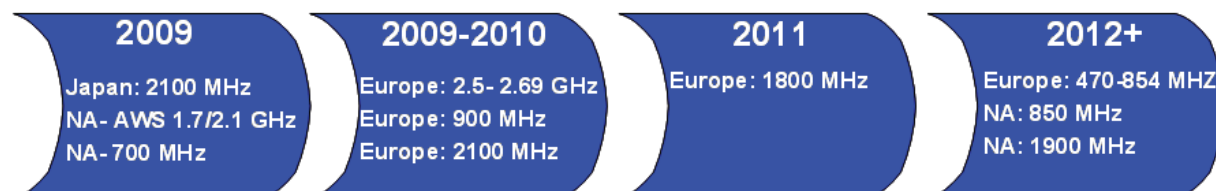
## 5. Επέκταση των UMTS και LTE στα TVWS

### 5.1. Κίνητρο

Η ικανότητα να αξιοποιήσουν τις νέες κατανομές του φάσματος και η ευκαιρία ενδεχόμενης μεταρρύθμισης του υπάρχων GSM φάσματος είναι δύο βασικοί τομείς που θα επιτρέψουν την ανάπτυξη των LTE. Η ενίσχυση των δυνατοτήτων του δικτύου παρουσιάζει νέες ευκαιρίες ανάπτυξης, οικονομίες κλίμακας (economies of scale) και ανοίγει αγορές που ήταν προηγουμένως απρόσιτες.

Η μετάβαση από την αναλογική στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση δυνητικά θα απελευθερώσει μεγάλες ποσότητες του φάσματος για κινητές ευρυζωνικές αναπτύξεις -το λεγόμενο ψηφιακό μέρισμα (Digital Dividend , DD). Ορισμένες χώρες έχουν επιβεβαιώσει την διαθεσιμότητα της ζώνης των 790-862 MHz (με την επιφύλαξη των διαδικασιών κατανομής, δηλαδή πλειστηριασμού), περιλαμβανομένης της Δανίας, της Φινλανδίας, της Γαλλίας, της Γερμανίας, της Σουηδίας και της Ελβετίας. Η Γερμανία σχεδιάζει να δημοπρατήσει ένα πακέτο φάσματος το οποίο περιλαμβάνει 3 x 20 MHz DD φάσματος στο Q2 το 2010. Άλλες κυβερνήσεις στην Ευρώπη αναμένεται να ακολουθήσουν από το 2010 και μετά. Επίσης, πολλοί επιχειρηματίες θα αναπτύξουν τα συστήματα LTE στην εν λόγω ζώνη.

Στα επόμενα χρόνια το τοπίο του ραδιοφάσματος θα αλλάξει σημαντικά (Εικόνα 5.1). Οι μελλοντικές δημοπρασίες φάσματος στη ζώνη των 700 MHz και 2.5 έως 2.6 GHz θα έχουν άμεση επίδραση στα LTE οικοσύστημα και στην ζώνη συχνοτήτων στην οποία θα αναπτυχθούν τα συστήματα LTE. Επιπλέον, ο εντοπισμός των νέων κινητών IMT ζωνών συχνοτήτων στην WRC-07 (450-470 MHz, 2300-2400 MHz, 698-862 MHz και 3400-3600 MHz) θα συμβάλει στην εκπλήρωση της προβλεπόμενης ανάγκης για μελλοντικό εύρος ζώνης καθώς και στη διευκόλυνση της παγκόσμιας περιαγωγής (roaming).



Εικόνα 5.1: Σενάριο Ανάπτυξης του LTE

Ένα βασικό χαρακτηριστικό της τεχνολογίας LTE είναι η καταλληλότητά του για την ανάπτυξη στο επεκτάσιμο εύρος ζώνης που κυμαίνεται από 1,4 MHz έως 20 MHz. Επιπλέον, μπορεί να λειτουργεί σε όλες τις 3GPP ζώνες συχνοτήτων σε στοιχισμένες και ασύζευκτες κατανομές φάσματος. Σε πρακτικό επίπεδο, η πραγματική απόδοση που επιτυγχάνεται με συστήματα LTE εξαρτάται από το εύρος ζώνης που διατίθεται για τις υπηρεσίες, και όχι από την ίδια την επιλογή της ζώνης φάσματος. Αυτό δίνει στους πάροχους σημαντική ευελιξία όσον αφορά τις εμπορικές και τεχνικές στρατηγικές τους. Αναπτύσσονται σε υψηλότερες συχνότητες, τα LTE είναι ελκυστικά για τις στρατηγικές που επικεντρώνονται στη δυναμικότητα των δικτύων, ενώ σε χαμηλότερες συχνότητες μπορεί να προσφέρει ευρεία και οικονομικά αποδοτική κάλυψη (ubiquitous cost-effective coverage).

Η ευελιξία των LTE να λειτουργούν σε ένα επεκτάσιμο εύρος ζώνης επιτρέπει στους φορείς εκμετάλλευσης την ανάπτυξη των LTE στην υπάρχουσα κατανομή φάσματος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω του re-farming , που μελετάται από πολλά πρόσωπα στην αλυσίδα αξίας των

τηλεπικοινωνιών της κινητής τηλεφωνίας , ως μια οικονομικά αποδοτική λύση για την αντιμετώπιση των αυξανόμενων απαιτήσεων τη κυκλοφορίας.

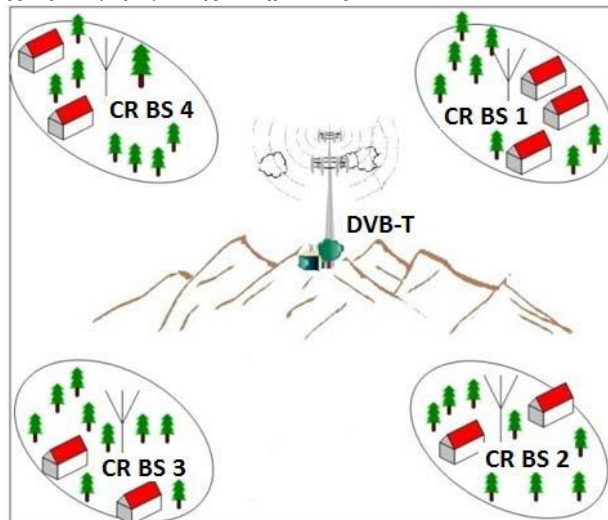
## 5.2 Σενάριο χαρακτηριστικών και Τεχνικής βιωσιμότητας

### 5.2.1 Τερματικά χρηστών

Ο εξοπλισμός των συστημάτων LTE, 2G/3G και TVWS μπορεί να είναι ο ίδιος, αλλά η συμμόρφωση του εξοπλισμού με τα TVWS και με cognitive δυνατότητες που επιτρέπει την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών με DVB-T θα πρέπει να διασφαλιστεί με μια διαδικασία πιστοποίησης. Υπάρχουν σημαντικές τεχνολογικές προκλήσεις για να αντιμετωπιστούν από το επίπεδο συσκευής μέχρι την αρχιτεκτονική του δικτύου. Η διακοπόμενη φύση του κοινού (shared spectrum) ραδιοφάσματος εγείρει νέες τεχνικές προκλήσεις για την παροχή QoS και την κινητικότητα σε απαιτητικές εφαρμογές χρήστη

### 5.2.2 Περιοχή κάλυψης

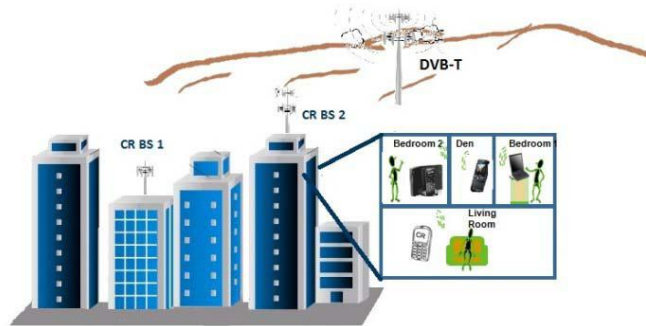
Τα σενάρια σε χαμηλές συχνότητες (<1 GHz), είναι ιδανικά για την κάλυψη της υπαίθρου (Εικόνα 5.2) και των εσωτερικών χώρων διείσδυσης (Εικόνα 5.3). Ιδιαίτερη σημασία έχει δοθεί στις αγροτικές περιοχές όπου η ανάπτυξη των κινητών συστημάτων γίνεται για να παρέχουν καλή κάλυψη. Ως εκ τούτου, η μείωση του αριθμού των τοποθεσιών αντιστοιχεί άμεσα σε μείωση του κόστους της προσφερόμενης υπηρεσίας.



Εικόνα 5.2: Κάλυψη της αγροτικής περιοχής

Ομοίως, στις αστικές περιοχές, η χαμηλότερη ζώνη συχνοτήτων έχει την τάση να διαθλάται καλύτερα γύρω από γωνίες και μπορεί να περάσει πιο εύκολα μέσα από τοίχους για την απόκτηση μίας βελτιωμένης εσωτερικής κάλυψης με τη δυνατότητα να εξυπηρετεί συσκευές στο σπίτι χωρίς εξωτερική κεραία. Τα TV Whitespaces θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη της κορύφωσης της κίνησης.

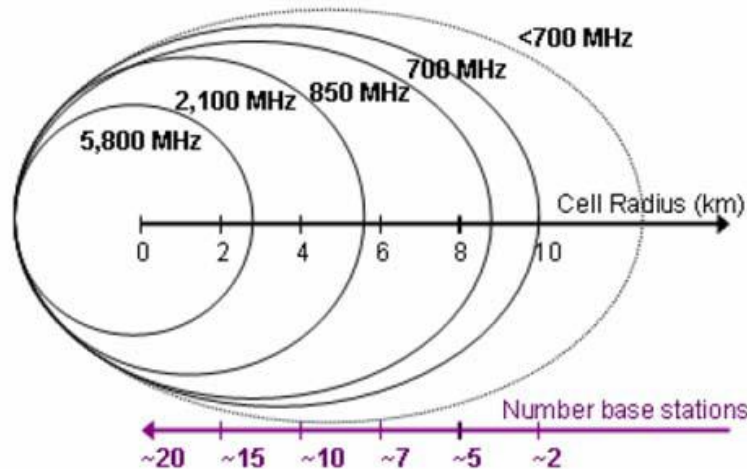




Εικόνα 5.3: Κάλυψη της αστικής περιοχής

### 5.2.3 Συχνότητες λειτουργίας

Στην Εικόνα 5.4 βλέπουμε ότι για τις ίδια απαίτηση κάλυψης, επίγεια, ισχύς εκπομπής και εύρους ζώνης, αν η συχνότητα που χρησιμοποιείται είναι διπλάσια, οι συνδεδεμένες απώλειες ραδιοφώνου αυξάνονται και ο αριθμός των τοποθεσιών που πρέπει να εγκατασταθούν σχεδόν διπλασιάζεται. Με άλλα λόγια, ο αριθμός των BS που απαιτούνται στα 700 MHz ή στα 900 MHz σε σύγκριση με των 2 GHz είναι μειωμένος κατά 65% σχεδόν για τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και την ίδια κάλυψη.



Εικόνα 5.4: Τα χαρακτηριστικά διάδοσης του φάσματος

Το ψηφιακό μέρισμα πρέπει να εξεταστεί στο ευρύτερο πεδίο του φάσματος για νέες εφαρμογές κινητής τηλεφωνίας. Οι καταναλωτές εκπομπής κινητής τηλεφωνίας θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν είτε UMTS / HSPA είτε LTE τεχνολογίες (ανάλογα με διαδοχικές κυκλοφορίες και το χρόνο) σύμφωνα με τις ανάγκες φορέων, με τη χρήση της ευελιξίας των πολλαπλών προτύπων σταθμών βάσης (SDR BS).

Οι διαδικασίες αδειοδότησης θα μπορούσαν να «τυλίξουν» τις UHF ζώνες με κατανομές υψηλότερης ζώνης (πιθανότητα τα 2,5 GHz/3,5 GHz) παρέχοντας ικανότητα σε περιοχές υψηλής κυκλοφορίας (αστικές / προαστιακές ζώνες).

Το LTE προσφέρει τη δυνατότητα επιλογής του μεταφορέα εύρους ζώνης: 1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz. Το ευρύτερο εύρος ζώνης θα χρειαστεί για τις υψηλότερες ταχύτητες. Ο χειριστής μπορεί να εισάγει τα LTE σε «νέες» ζώνες συχνοτήτων (An operator may introduce LTE), όπου είναι πιο εύκολο να αναπτυχθεί, π.χ. τα 5 MHz μεταφέρονται σε ένα αδρανές κανάλι DVB-T (8MHz). Αυτήν την περίοδο κανένα κυψελοειδές δίκτυο δεν έχει ευελιξία στην συχνότητα, στην κυματομόρφη και στο πρωτόκολλο για να προσαρμόσει την ποικίλη φασματική ανάθεση. Στην πραγματικότητα, υπάρχουν διάφορες προκλήσεις στην αποτελεσματική χρήση του TVWS για την κυψελοειδή επέκταση. Παραδείγματος χάριν, το διαθέσιμο TVWS θα τεμαχιστεί, ειδικά στις μητροπολιτικές περιοχές. Η διαθεσιμότητα των white spaces είναι προσωρινή και εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση του ραδιοφώνου (ζητήματα κινητικότητας). Κατά συνέπεια, μια βασική πρόκληση στο σχεδιασμό των κινητών γνωστικών ραδιοφώνων (mobile cognitive radios) είναι η δυναμική κατανομή των white spaces στα διαφορετικά ραδιόφωνα στο δίκτυο. Η αποδοτικότητα της κατανομής φάσματος καθορίζει τα κυψελοειδή δίκτυα QoS καθώς επίσης και τη γενική χρησιμοποίηση φάσματος. Το Secondary spectrum market είναι ένα κατάλληλο καθεστώς για να εγγραφεί QoS. Ένα ενδιαφέρον ερευνητικό θέμα, ανεξερεύνητο σε προηγούμενες εργασίες είναι να αξιολογηθεί ο αντίκτυπος της κυψελοειδούς επέκτασης στα TVWS, ένας γενικός προγραμματισμός κυττάρων για 3G και τα LTE συστήματα.

## 5.2.4 Τεχνική δυνατότητα πραγματοποίησης

Το DVB-T σύστημα χρησιμοποιεί Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing (COFDM) και το LTE χρησιμοποιεί την Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) και οι δύο με την διάδοση των πληροφοριών δύο σε έναν μεγάλο αριθμό ορθογώνιων μεταφορέων. Στον Πίνακα 5.1 μπορούμε να δούμε μια σύγκριση ανάμεσα στις τεχνολογίες DVB-T και LTE.

Σύστημα	DVB-T	LTE
Συχνότητα	Μεταξύ 470 και 790 MHz	Μεταξύ 450 MHz και 2.6 GHz
Εμβέλεια	67 Km	5 – 100km με μικρή υποβάθμιση μετά 30km
Διάστημα καναλιών	8 MHz	1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz
Μέγιστο gross ταχύτητας δεδομένων	Από 5 έως 31.7 mbps	Από 10 έως 300 mbps
Διαμόρφωση	QPSK 16 QAM 64 QAM	QPSK 16 QAM 64 QAM

Πίνακας 5.1: Σύγκριση των δικτύων εκπομπής DVB-T με τα κυψελοειδές LTE.

Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του DVB-T και του LTE που είδαμε στον προηγούμενο πίνακα μπορούμε να αντλήσουμε ορισμένα πλεονεκτήματα από τη χρήση των LTE σε TVWS, για παράδειγμα: για την πρόσβαση σε μέσο (to medium) το LTE χρησιμοποιεί παρόμοια τεχνολογία και υποστηρίζει την ίδια συχνότητα με το DVB-T.

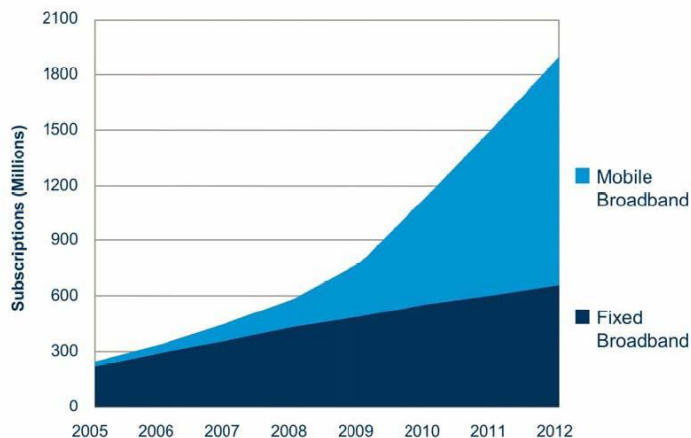
Μερικά από τα χαρακτηριστικά των LTE όπως περιγράφονται κατωτέρω δείχνουν ότι το σύστημα μπορεί να επεκταθεί εύκολα και με τα σημαντικά κέρδη στις ζώνες TVWS:

- Αυξημένες κορυφές ρυθμών δεδομένων downlink και uplink
- Κλιμακωτό εύρος ζώνης καναλιών (channel bandwidths) των 1.4, 3, 5, 10, 15, και 20 MHz σε uplink και downlink;
- Βελτιώσεις φασματικής απόδοσης για downlink και uplink;
- Sub-5 ms latency για μικρά πακέτα internet protocol (IP);
- Απόδοση που βελτιστοποιείται για τις χαμηλές κινητές ταχύτητες από 0 έως 15 km/h, που υποστηρίζονται με την υψηλή απόδοση από 15 έως 120 km/h με λειτουργική υποστήριξη από 120 έως 350 km/h, και υπό εξέταση για 350 έως 500 km/h
- Συνύπαρξη με legacy πρότυπα ενώ εξελίσσεται σε ένα all-IP δίκτυο;
- Η επιλογή συχνότητας φάσματος και η ευελιξία της ανάπτυξης στο GSM, CDMA, και στις UMTS ζώνες συχνοτήτων (450, 700, 850, 900, 1700, 1800, 1900, 2100, 2500MHz) σημαίνουν ότι η παγκόσμια περιαγωγή (roaming) θα είναι δυνατή
- Κάλυψη (μέγεθος κελιού ) 5 – 100km με μια μικρή υποβάθμιση μετά τα 30km.

Ο συνδυασμός αυξανόμενης φασματικής αποδοτικότητας και ευελιξίας των LTE, προστιθέμενης της ικανότητας και της απλούστερης δικτυακής αρχιτεκτονικής προσφέρει μια πολύ οικονομικώς αποδοτική πρόταση. Συνδυασμένα με TVWS στις χαμηλές ζώνες συχνοτήτων και με την χρησιμοποίηση των προηγμένων συστημάτων κεραιών, τα δίκτυα LTE θα παράσχουν στους φορείς παροχής υπηρεσιών μια σημαντική βελτίωση στο κόστος ανά παραδοθέν κομμάτι.

### 5.3 Δυνατότητες αγοράς

Ο κόσμος γίνεται όλο και πιο κινητικός, το γεγονός αυτό οδηγεί στην απαίτηση για την ευκολότερη πρόσβαση στο περιεχόμενο και τις υπηρεσίες από οποιαδήποτε θέση, με οποιαδήποτε συσκευή, οποιαδήποτε στιγμή. Οι ευρυζωνικές συνδρομές αναμένονται για να φθάσουν στα 1.8 δισεκατομμύρια μέχρι το 2012 (Εικόνα 5.5).



Εικόνα 5.5: Ευρυζωνική ανάπτυξη 2005–2012 [source: Ericsson]

Περίπου τα δύο τρίτα από αυτούς τους χρήστες θα χρησιμοποιούν κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες. Ο ρυθμός κυκλοφορίας των δεδομένων της κινητής τηλεφωνίας αναμένεται να υπερβεί αυτόν της φωνής στο 2010, η οποία θα έχει υψηλές απαιτήσεις στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας σήμερα και στο μέλλον.

Αρκετές Ευρωπαϊκές χώρες έχουν ήδη κάνει βήματα προς την χρήση ευρυζωνικών συνδέσεων (broadband) στις ζώνες συχνοτήτων TV:

Η Δανία, η Φινλανδία, η Γαλλία, η Γερμανία, η Σουηδία και η Ελβετία έχουν επιβεβαιώσει ότι θα διαθέσουν τα 790-862 MHz για κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες. Η βρετανική κυβέρνηση προτείνει το διαχωρισμό σε κάποια ψηφιακά μερίσματα φάσματος έτσι ώστε οι χειριστές να μπορούν να προωθήσουν το 3G πέρα από την υποχρέωση των άδειων τους που είναι στο 80% του πληθυσμού. Σε αντάλλαγμα, οι χειριστές θα λάβουν επ'αόριστον παράταση για τις 3G άδειες τους.

Στη Γερμανία, οι δοκιμές είναι σε εξέλιξη με μερικές τοπικές αρχές στη Mecklenburg-Vorpommern να χρησιμοποιήσουν τις συχνότητες ψηφιακών μερισμάτων για να παρέχουν τις ευρυζωνικές υπηρεσίες HSPA ή LTE στις κοινότητες που δεν έχουν ευρυζωνικές δυνατότητες. Μια δημοπρασία του φάσματος 790-862 MHz θα γίνει σύντομα.

Στην Ιταλία η Υφυπουργός Επικοινωνιών ανακοίνωσε ότι οι κενές (vacated) συχνότητες θα δημοπρατηθούν κατά την διάρκεια της αλλαγής από αναλογική σε ψηφιακή.

Η Νορβηγία πρόσφατα ανακοίνωσε ότι η περιοχή των 790-862MHz θα διατεθεί για τις κινητές ευρυζωνικές ανάγκες (mobile broadband).

Στην Ισπανία, το υπουργείο Βιομηχανίας εξέδωσε πρόσφατα μια ανακοίνωση Τύπου αναφέροντας ότι το ψηφιακό μέρος φάσματος (digital dividend spectrum) είναι πιθανόν να χρησιμοποιηθεί για κυψελοειδή, ιδίως για κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες Διαδικτύου από τον Ιανουάριο του 2015.

Σύμφωνα με την GSA, 26 χειριστές δικτύων έχουν δεσμευτεί να αναπτύξουν τα 3GPP LTE συστήματα (Πίνακας 5.2). Στην πραγματικότητα η GSA υποστηρίζει ότι αναμένονται 7 φορείς να ξεκινήσουν τις εμπορικές υπηρεσίες LTE μέσα στο 2010. Η Nokia, ο μεγαλύτερος πωλητής στον κόσμο, έχει δεσμευτεί να χρησιμοποιήσει τα LTE ως το προτιμώμενο δίκτυο για τις συσκευές και σχεδιάζει την έναρξη των δεδομένων υψηλής έντασης (data-intensive devices) για τα δίκτυα αυτά μέσα στο 2010.

Χώρα	Χειριστής	Προσδοκώμενη έναρξη LTE
Αρμενία	Vivacell-MTS	2010
Φινλανδία	TeliaSonera	2010
Νορβηγία	TeliaSonera	2010
Σουηδία	TeliaSonera	2010
Σουηδία	TeleNor Sweden	2010
Σουηδία	Tele2 Sweden	2010
Γερμανία	Vodafone	2010-11
Γερμανία	T-Mobile	2011
Ιρλανδία	Hutchison 3	2011
Αυστρία	T Mobile	2011-12
Αυστρία	Mobilkom Austria	2011-12
Αυστρία	Hutchison 3	2011-12
Αυστρία	Orange	2011-12
Γαλλία	Orange	2011-12
Ευρώπη	Telefonica	Αναμονή για επιβεβαίωση
Φινλανδία	Elisa	Αναμονή για επιβεβαίωση
Φινλανδία	DNA	Αναμονή για επιβεβαίωση
Ιταλία	Telecom Italia	Αναμονή για επιβεβαίωση
Νορβηγία	TeleNor	Αναμονή για επιβεβαίωση
Πορτογαλία	TMN	Αναμονή για επιβεβαίωση

Πίνακας 5.2: Υποχρεώσεις χειριστών LTE [πηγή: GSA Information Paper “Evolution to LTE” – Δεκέμβριος 10, 2009].

Τα LTE συστήματα θα επικυρωθούν πλήρως από την ITU και θα αναπτυχθούν στις ITU αναγνωρισμένες ζώνες συχνοτήτων που επιτρέπουν την παγκόσμια περιαγωγή (global roaming) με παρόμοιες δυνατότητες όπως τα σημερινά GSM/UMTS δίκτυα.

Επειδή οι συσκευές LTE θα είναι συμβατές με τα GSM και UMTS συστήματα, ακόμη και σε πρώιμο στάδιο της ανάπτυξης των συστημάτων LTE, οι συνδρομητές LTE θα έχουν την δυνατότητα να περιφέρονται σε όλο τον κόσμο ανεξάρτητα από τη χώρα στην οποία είναι. Οι σημερινές 3GPP τεχνολογίες δικτύων μεταφέρουν 85% των κινητών συνδρομητών, αναμένεται ότι το LTE θα ωφεληθεί από την παρόμοια επίδραση τιμών που οδηγεί στην ορμή και που ωφελείται από τις πολυάριθμες συσκευές που είναι προσιτές για αναπτυγμένες, ανερχόμενες αγορές και δευτεροβάθμιες αγορές (secondary markets) στις αστικές και αγροτικές περιοχές.

### 5.3.1 Αστικές περιοχές

Στις αστικές περιοχές όπου η εσωτερική διείσδυση του ραδιοσήματος είναι δύσκολη ιδιαίτερα σε κτίρια από σκυρόδεμα, η ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση σπάνια είναι διαθέσιμη στο σπίτι. Τα LTE σε TVWS μπορούν να παρέχουν καλή εσωτερική κάλυψη λόγω της ευκολότερης διείσδυσης οικοδόμησης σε αυτές τις συχνότητες, ταιριάζει καλά σε αυτό το είδος περιβάλλοντος. Οι υπηρεσίες σε TVWS θα μπορούσαν να παρασχεθούν με δύο τρόπους τα spectrum commons και τα spectrum secondary market ανάλογα με το QoS που επιθυμεί να έχει ο χρήστης. Παραδείγματος χάριν για την πρόσβαση στο Διαδίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί το spectrum commons το λιγότερο ακριβό φάσμα αλλά για υπηρεσίες real time όπως είναι οι κλήσεις φωνής ή οι κλήσεις βίντεο που απαιτούν ένα ελάχιστο QoS θα χρησιμοποιείται το spectrum secondary market προκειμένου να εξασφαλιστεί η ποιότητα των υπηρεσιών.

### 5.3.2 Αγροτικές περιοχές

Όπως εξηγήθηκε στο κεφάλαιο 5.2.3. για την ίδια κάλυψη οι απαιτήσεις, το έδαφος, η ισχύ εκπομπής και το εύρος ζώνης, αν η συχνότητα που χρησιμοποιείται είναι διπλάσια, με επακόλουθο την απώλεια διαδρομής ραδιοφώνικου σήματος και την αύξηση του αριθμού των τοποθεσιών που πρέπει να εγκατασταθούν, σχεδόν διπλασιάστηκε ο αριθμός αυτός. Με άλλα λόγια, ο αριθμός των BS που απαιτούνται στα 700 MHz ή στα 900 MHz έναντι των 2 GHz έχει μειωθεί κατά σχεδόν 65% για τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και την ίδια κάλυψη. Στις αγροτικές περιοχές όπου η πυκνότητα χρηστών είναι χαμηλή οι BS που αναπτύσσονται σκοπεύουν μόνο να παρέχουν την κάλυψη στα χαμηλά ποσοστά δυαδικών ψηφίων (bitrates).

Χρησιμοποιώντας τις ζώνες TVWS και την προσέγγιση την οποία προτείνουμε είναι εφικτό να μειωθεί ο αριθμός των βάσεων-σταθμών που παρέχει τις ίδιες ή ακόμα και υψηλότερες ρυθμοαποδόσεις (throughputs) που είναι πολύ σημαντικός για το φορέα εκμετάλλευσης δικτύου, επειδή μειώνει το CAPEX (Capital Expenditures, κύριες δαπάνες) και το OPEX (Operational Expenditure, λειτουργικές δαπάνες) καθώς και για το χρήστη που μπορεί να δοκιμάσει καλύτερες υπηρεσίες. Η ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση σε αγροτικές και σε απομονωμένες περιοχές, με απόδοση συγκρίσιμη με εκείνη των υπαρχουσών σταθερών ευρυζωνικών τεχνολογιών πρόσβασης (π.χ., DSL και καλωδιακό μόντεμ) μπορεί να αναπτυχθεί.

## 5.4 Ρυθμιστική δυνατότητα πραγματοποίησης (Regulatory feasibility)

Η διαθεσιμότητα του νέου φάσματος, ιδιαίτερα στις ζώνες ψηφιακών μερισμάτων (Digital Dividend bands), είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για την ανάπτυξη των LTE συστημάτων σε

πολλές χώρες, όπως είναι οι ρυθμιστικοί όροι, και θα καθορίσει άμεσα την ανάπτυξη και την προώθηση της ημερομηνίας έναρξης σε αυτές τις αγορές. Υπάρχει επίσης μεγάλο ενδιαφέρον για τις ευκαιρίες στην ανάπτυξη των LTE που χρησιμοποιούν τις συχνότητες που απελευθερώνονται από re-farming φάσματος, π.χ. στη ζώνη των 900 MHz στο GSM που χαλαρώνει τώρα από τους ρυθμιστές (π.χ. στην Ευρώπη) για να επιτρέψει τις κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες που χρησιμοποιούν τεχνολογίες όπως είναι τα LTE. Υπάρχουν υψηλές προσδοκίες στην Ευρώπη και αλλού για να έχουν πρόσβαση στις πρόσθετες UHF ζώνες από το ψηφιακό μέρισμα (Digital Dividend) για να επιτρέψουν στα LTE την παγκόσμια αποδοτική ανάπτυξη πέρα από τις μεγάλες γεωγραφικές αγροτικές περιοχές, και να βελτιώσουν την κάλυψη μέσα στα κτίρια και τη μέγιστη υποστήριξη κυκλοφορίας πέρα από τις προαστιακές περιοχές. Παρά τα οφέλη που προφανώς προέρχονται από την επέκταση των LTE\UMTS στην χρήση των TVWS band (π.χ. αύξηση κάλυψης ασυρμάτου (radio coverage) και η ικανότητα του συστήματος) υπάρχει περιορισμός που επιβάλλεται από το SLA, μεταξύ των διαχειριστών δικτύου \ φορείς παροχής υπηρεσιών και του χρήστη, ο οποίος καθορίζει το ελάχιστο QoS που θα πρέπει να παρέχεται. Από αυτή την άποψη η διαχείριση του φάσματος θα πρέπει να εγγραφεί την αποκλειστικότητα της χρήσης φάσματος και το επίπεδο παρέμβασης-παρεμβολής προκειμένου να εγγραφεί το QoS που θα παρέχεται στο χρήστη.

## 5.5 επέκταση των UMTS στα TVWS

Τα UMTS είναι δίκτυα τρίτης (3G) τα οποία είναι πιο συχνά διαδεδομένα και αποδεκτά. Είναι μια εξέλιξη από τα δίκτυα δεύτερης γενιάς, GSM, τα οποία χρησιμοποιούν WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) η οποία αποτελεί ευρείας ζώνη φάσματος που χρησιμοποιεί η άμεση ακολουθία κώδικα Division Multiple Access (DS-CDMA) ως μέθοδο πρόσβασης. Η ποιότητα υπηρεσίας (QoS) στα UMTS δίκτυα ελέγχεται και διαχειρίζεται με μηχανισμούς σηματοδότησης και προγραμματισμού οι οποίοι πραγματοποιούν διαφοροποίηση ανά ροή. Περιλαμβάνει επίσης αλγόριθμους ελέγχου πρόσβασης και μπορεί να εκτελέσει την κράτηση των πόρων.

Για να αυξήσουν την απόδοση δικτύων, διάφορες βελτιώσεις επιτεύχθηκαν στην εξέλιξη των UMTS συστημάτων. Στην απελευθέρωση των UMTS διευκρινίστηκαν. 5 HSDPA Το HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) διευκολύνει τη μετάδοση των μεγάλων αρχείων σε κινητές συσκευές όπως είναι τα επισυναπτόμενα αρχεία στο e-mail. Επιτρέπει τις ταχύτητες των 1.8, 3.6, 7.2 και 14.4 Mb/s download rate ακόμα κι αν οι περισσότεροι χειριστές παρέχουν μόνο 3.6 Mb/s. Στην απελευθέρωση των 6 HSUPA αυξάνεται η upload ταχύτητα της κινητής συσκευής με μέγιστη τιμή τα 5.7Mb/s. Η πιο πρόσφατη, σε ημερομηνία, εξέλιξη είναι στα δίκτυα UMTS, το eHSPA (εξελεγμένο HSPA) αναμένεται να επιτρέψει τις ταχύτητες 42Mb/s στο downlink και 11Mb/s στο uplink.

Εάν ένας χρήστης ζητά μια υπηρεσία και το δίκτυο δεν μπορεί να την παρέχει για λόγους υπερφόρτωσης ή επειδή το αντίκτυπο στη χωρητικότητα του συστήματος είναι πολύ σημαντικό (λόγω σημαντικής παρεμβολής σε συγκεκριμένες καταστάσεις) ο χειριστής μπορεί να εκτρέψει τους χρήστες στις TV ζώνες (TVWS), προστατεύοντας τους χρήστες που έχουν ήδη συνδεθεί. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η χωρητικότητα του συστήματος. Στα επόμενα τμήματα εξηγείται με λεπτομέρεια πώς το TVWS μπορεί να υπερνικήσει τα ζητήματα χωρητικότητας στο UMTS.

## 5.5.1 UMTS περιγραφή Use-case: Υπερφόρτωση Δικτύου

### 5.5.1.1 Σενάριο χρήσης. (Use-case)

Κάθε πρώτη Κυριακή του Μαΐου στην πόλη του Ανεϊρο διοργανώνεται ένα μουσικό φεστιβάλ. Αυτό το φεστιβάλ χαρακτηρίζεται από διάφορες μικρές παραστάσεις γύρω από το κέντρο της πόλης για σχεδόν κάθε γούστο. Αυτό το έτος, οι τοπικές αρχές και ένας φορέας εκμετάλλευσης κινητού δικτύου εισήγαγαν ένα καινούργιο στοιχείο: όλες οι συναυλίες μεταδίδονται με video streaming.

Ενώ περπατάει τριγύρω, η Μαρία θέλει να έχει πρόσβαση στην καινοτομία αυτή, προκειμένου να επιλέξει την συναυλία που της ταιριάζει περισσότερο. Έτσι, με το 3G τερματικό της, ζήτησε την εν λόγω υπηρεσία από το χειριστή. Ωστόσο, εκείνη τη συγκεκριμένη στιγμή, η εξυπηρέτηση των κυττάρων ήταν πλήρως απασχολημένη και η υπηρεσία δεν ήταν διαθέσιμη.

Ευτυχώς στον τομέα αυτό τα TVWS είναι διαθέσιμα (η πληροφορία επιβεβαιώνεται από τον χειριστή με συντεταγμένες GPS που αποστέλλονται από ένα τερματικό). Όταν ζητείται η υπηρεσία και ανιχνεύεται η κατάσταση συμφόρησης, ο χειριστής αιτείται από τον Broker τις πληροφορίες σχετικά με την συμφορημένη ζώνη συχνοτήτων στην περιοχή αυτή έτσι ώστε να προστατέψει τους κύριους χρήστες. Μόλις οι κύριοι χρήστες είναι προστατευμένοι, το αίτημα της Μαρίας εισάγεται και μια σύνδεση ξεκινάει χρησιμοποιώντας TVWS ζώνες.

### 5.5.1.2 Το θέμα της υπερφόρτωσης του δικτύου.

Το UMTS χρησιμοποιεί την τεχνική WCDMA, το ίδιο carrier και εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται για όλους τους χρήστες, διαφοροποιείται μόνο στον παραγόμενο κώδικα (generated code). Η βάση σταθμός χρησιμοποιεί το λαμβανόμενο κώδικα για να προσδιορίσει τα data streams που ανήκουν στους διαφορετικούς χρήστες. Από αυτή την άποψη, τα συστήματα WCDMA (και έτσι UMTS) περιορίζουν τις παρεμβολές. Αυτό σημαίνει ότι όλοι οι χρήστες προκαλούν αμοιβαίες παρεμβολές και εάν εκείνο το επίπεδο παρεμβολής φθάνει στο κατώτατο όριο (threshold), δεν θα μπορούν να αναγνωριστούν άλλοι χρήστες.

Το φορτίο του κάθε κυττάρου WCDMA διαφέρει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των κυττάρων σε κάθε στιγμή. Αρκετοί παράγοντες επηρεάζουν το συνολικό φορτίο του κυττάρου: ο αριθμός των ενεργών χρηστών στο κύτταρο, η ταχύτητά τους, το είδος της κυκλοφορίας, ο θόρυβος και τα επίπεδα παρεμβολής στο κελί. Με βάση αυτά τα στοιχεία είναι δυνατόν να καθοριστεί το τρέχον φορτίο στο κελί και να αποφασίσει κατά πόσο νέοι χρήστες μπορούν να γίνουν αποδεκτοί. Επιπλέον, οι πιο απαιτητικές εφαρμογές που ζητούνται από τους χρήστες, αυξάνουν εντυπωσιακά την κυκλοφορία και επηρεάζουν έντονα τη γενική χωρητικότητα του συστήματος. Αυτό οδηγεί σε μια πρόκληση για τους επιχειρηματίες και πρέπει να βρούμε νέες λύσεις για αυτές τις νέες ανάγκες

Ως λύση στο πρόβλημα αυτό προτείνεται η χρήση των TVWS δίνοντας στην χειριστή επιπλέον ασυρμάτους (radio) πόρους που μπορεί να χρησιμοποιεί στις ακόλουθες καταστάσεις:

- Στην περίπτωση της έλλειψης χωρητικότητάς ή υπερφόρτωσης, ανιχνεύεται ότι κανένας νέος χρήστης δεν μπορεί να αναγνωριστεί στο κύτταρο. Κατά συνέπεια, ο χειριστής μπορεί να χρησιμοποιήσει το δευτεροβάθμιο φάσμα (secondary spectrum) στη ζώνη TV για να φιλοξενήσει τους νέους χρήστες
- Στην περίπτωση που οι ήδη αναγνωρισμένοι χρήστες αυξάνουν τις παρεμβολές στο κύτταρο που φθάνει σε μια κατάσταση όπου καμία επικοινωνία δεν είναι δυνατή, η λύση μπορεί να είναι η μετανάστευση εκείνων των χρηστών σε TVWS ώστε να εγγυηθεί η κατάλληλη λειτουργία του συστήματος.

Εάν μερικοί χρήστες μεταφερθούν στις ζώνες TV θα επιτραπεί σε εκείνους όχι μόνο να έχουν την ευκαιρία να λάβουν μια σύνδεση υπηρεσιών αλλά και, για εκείνους που δεν μεταναστεύουν, να δουν την χωρητικότητα να αυξάνεται λόγω της απελευθέρωσης των πόρων που είναι στις ζώνες συχνοτήτων του.

## 5.6 UMTS Secondary End-user/ Ανάλυση εφαρμογής

### 5.6.1 Εφαρμογές και κατηγορίες QoS

Κατά τον καθορισμό των UMTS QoS κατηγοριών οι περιορισμοί του air interface πρέπει να ληφθούν υπόψη. Δεν είναι λογικό να καθοριστούν σύνθετοι μηχανισμοί, όπως είχε συμβεί στα σταθερά δίκτυα, λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών λάθους του air interface. Οι μηχανισμοί QoS που παρέχονται στο κυψελοειδές δίκτυο πρέπει να είναι γεροί και ικανοί ώστε να παρέχουν αξιόλογα αποτελέσματα QoS. Σαν πρόταση υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας QoS (ή κίνηση τάξης): Conversational class, Streaming class, Interactive class και Background class. Ο κύριος παράγοντας που διακρίνεται μεταξύ αυτών των κατηγοριών είναι πως η καθυστέρηση ευαισθητοποιεί την κίνηση.

Η κατηγορία Conversational είναι πολύ ευαίσθητη στην καθυστέρηση ενώ η κατηγορία Background είναι η πιο ανεκτική στη καθυστέρηση κατηγορία κυκλοφορίας (Πίνακας 5.3).

Κατηγορία κυκλοφορίας.	Conversational class Real Time	Streaming class Real Time	Interactive class Best Effort	Background class Best Effort
Βασικά Χαρακτηριστικά	- Προστασία χρονικής σχέσης (παραλλαγή) μεταξύ των οντοτήτων πληροφοριών του ρεύματος - Συνομιλητικό σχέδιο (αυστηρή και χαμηλή καθυστέρηση)	- Προστασία χρονικής σχέσης (παραλλαγή) μεταξύ των οντοτήτων πληροφοριών του ρεύματος	- Απαιτείται σχέδιο απάντησης  - Προστασία ωφέλιμου φορτίου (payload)  - Ο προορισμός δεν περιμένει τα στοιχεία μέσα σε έναν ορισμένο χρόνο  - Προστασία περιεχομένου ωφέλιμου φορτίου (payload)	- Ο προορισμός δεν περιμένει τα στοιχεία μέσα σε έναν ορισμένο χρόνο  - Προστασία περιεχομένου ωφέλιμου φορτίου (payload)
Παράδειγμα Εφαρμογής	Φωνής	Streaming video	Περιήγηση στο web	Τηλεμετρία, ηλεκτρονικά ταχυδρομεία

Πίνακας 5.3: Κατηγορίες QoS UMTS.



Οι πιο σημαντικές παράμετροι των κατηγοριών UMTS QoS συνοψίζονται στον Πίνακα 5.4

	Conversational class	Streaming class	Interactive class	Background class
Καθυστέρηση μεταφοράς	$\geq 80$ ms	$\geq 250$ ms		
Εγγυημένο bit rate	Πάνω από 2 Mbps	Πάνω από 2 Mbps		
Προτεραιότητα χειρισμού κυκλοφορίας			1,2,3	
Προτεραιότητα κατανομής/διατήρησης	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3

Πίνακας 5.4: Οι κατηγορίες UMTS QoS και οι βασικές παράμετροι τους.

Η προτεραιότητα κατανομής/διατήρησης (Allocation/retention priority) και η προτεραιότητα χειρισμού κυκλοφορίας (Traffic handling priority) διαφοροποιούνται σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες προτεραιότητας, με την κάθε κατηγορία QoS. Η προτεραιότητα χειρισμού κυκλοφορίας χρησιμοποιείται για την διαφοροποίηση μεταξύ των φορέων (bearers), και ιδιαίτερα για τις υπηρεσίες που είναι ανεκτές στις καθυστερήσεις και μπορούν να περιμένουν στη σειρά.

Η προτεραιότητα κατανομής (Allocation Priority) χρησιμοποιείται όταν πρέπει να καθιερωθεί ένας φορέας. Η προτεραιότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της συμφόρησης για να δώσει προτεραιότητα στα αιτήματα υπηρεσιών φορέων μεταξύ των τρεχόντων αιτημάτων και των ήδη καθιερωμένων φορέων. Η προτεραιότητα διατήρησης (Retention Priority) είναι η προτεραιότητα του φορέα μόλις καθιερωθεί. Χρησιμοποιείται για να συγκρίνει την προτεραιότητα των νέων εισερχόμενων αιτημάτων με τους ήδη διατιθέμενους πόρους και ρυθμίζει το δικαίωμα προτιμήσεως των καθιερωμένων πόρων.

## 6. Σύνοψη

Στη πτυχιακή αυτή μελετήθηκαν οι βασικές λειτουργίες των cognitive δικτύων. Μελετήθηκε το πρωτόκολλο IEEE 802.22 το οποίο είναι το βασικό πρωτόκολλο που υποστηρίζει cognitive ιδιότητες. Έπειτα αναλύθηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά των δικτύων UMTS και LTE και πώς μπορούν αυτά να συνδυαστούν με cognitive δίκτυα καθώς και ποια θα είναι τα οφέλη από αυτό. Επίσης σε αυτή την πτυχιακή προτείνονται δυο διαφορετικά σενάρια για χρήση των TVWS. Το spectrum commons και το secondary spectrum trading. Στο πρώτο σενάριο το ραδιοφάσμα χρησιμοποιείται από διάφορους χρήστες χωρίς κανένα είδος ελέγχου, όπως γίνεται σήμερα με το Wi-Fi. Στο σενάριο αυτό δεν είναι δυνατόν να έχουμε κανένα έλεγχο για το QoS (ποιότητα υπηρεσίας) το οποίο παρέχεται. Όσον αφορά αυτό δεν είναι δυνατόν να εξασφαλίζεται ένα σταθερό ποσοστό bit rate radio ή να καθυστερεί μόνο τις υπηρεσίες με το best effort (καλύτερη προσπάθεια), όπως είναι η περιήγηση στο διαδίκτυο (web browsing) η οποία μπορεί να παρέχεται. Όμως, εάν η πρόσβαση στις ζώνες TVWS ελέγχεται θα είναι δυνατόν να εξασφαλίζεται, τουλάχιστον σε ένα βαθμό, το QoS και να παρέχεται οποιαδήποτε υπηρεσία. Παρ' όλα αυτά, στις TVWS ζώνες δεν χρησιμοποιούνται υπηρεσίες φωνής που έχουν αυστηρούς περιορισμούς για τη ποιότητα υπηρεσίας (QoS), κυρίως λόγω της καθυστέρησης και του jitter και επειδή δεν υποστηρίζουν αναμεταδώσεις. Υπηρεσίες όπως είναι το video streaming μπορούν να χρησιμοποιούν τα TVWS και την ελεγχόμενη προσέγγιση (controlled approach) με ένα επιπλέον πλεονέκτημα, την αυξημένη κάλυψη που παρέχεται από τις ζώνες TVWS. Στα UMTS δίκτυα, όπως και σε όλα τα δίκτυα, η ραδιοκάλυψη (the radio coverage) μειώνεται με το παρεχόμενο ρυθμοαπόδοση (throughput) για παράδειγμα, η ραδιοκάλυψη για την υπηρεσία φωνητικών μηνυμάτων πρέπει να είναι πολύ κοντά στο 98% αλλά για 384Kps είναι πιθανών να μην είναι περισσότερο από 80%, τα TVWS είναι πιθανών να αυξήσουν αυτό το μοντέλο (ή τον αριθμό) και να παρέχουν μια καλύτερη υπηρεσία.

Το UMTS χρησιμοποιεί μόνο μεταφορείς (carriers) με 5 MHz εύρος ζώνης, με δύο τρόπους εκτύπωσης διπλής όψης (duplexing modes) FDD και TDD, ο FDD είναι η πιο συνηθισμένη, αυτό που είναι μειονέκτημα είναι ότι δεν επιτρέπει καθόλου ευελιξία για τις κατανομές TVWS. Παρ' όλα αυτά για κάθε ζώνη 2x5 MHz στα TVWS η χωρητικότητα των UMTS διπλασιάζεται και η κάλυψη αυξάνεται.

Η επέκταση των UMTS στα TVWS πρέπει επίσης να λαμβάνει υπόψη τα ειδικά χαρακτηριστικά των ραδιοφωνικών σημάτων UMTS ιδίως ό, τι αφορά τις εκπομπές εκτός ζώνης και το τερματικό του χρήστη και τα χαρακτηριστικά του σταθμού βάσης, προκειμένου να αποφεύγονται οι παρεμβολές με το κύριο χρήστη.

## Βιβλιογραφία

- [1] Mitola, J., III; Maguire, G.Q., Jr., "Cognitive radio: making software radios more personal", 1999, Personal Communications, IEEE
- [2] Mitola III, "Cognitive radio: an integrated agent architecture for software defined radio", 2000
- [3] Fette, B. (Editor) , "Cognitive Radio Technology", Newnes, 2006
- [4] Haykin, S., "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications", Feb. 2005, Selected Areas in Communications, IEEE Journal
- [5] Joseph Mitola, III , "Cognitive Radio Architecture: The Engineering Foundations of Radio XML", Wiley, 2006
- [6] I. J. Mitola, "Software radios: Survey, critical evaluation and future directions", 1993, IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag
- [7] Χαχάμης Νικόλαος "Ανίχνευση Φάσματος και Ταυτοποίηση Σήματος για Συστήματα Γνωστικών Επικοινωνιών (Cognitive Radio) " , Αύγουστος 2009
- [8] Ian F. Akyildiz, Won-Yeol Lee, Mehmet C. Vuran, Shantidev Mohanty, "NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey", May 2006.
- [9] T.A. Weiss, J. Hillenbrand, A. Krohn, F.K. Jondral, Efficient signaling of spectral resources in spectrum pooling systems, in: Proc. 10th Symposium on Communications and Vehicular Technology (SCVT), November 2003.
- [10] T.A. Weiss, F.K. Jondral, Spectrum pooling: an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency, IEEE Radio Communication Magazine 42 (March) (2004) 8–14.
- [11] R.W. Brodersen, A. Wolisz, D. Cabric, S.M. Mishra, D. Willkomm, Corvus: a cognitive radio approach for usage of virtual unlicensed spectrum, Berkeley Wireless Research Center (BWRC) White paper, 2004.
- [12] D. Cabric, S.M. Mishra, D. Willkomm, R. Brodersen, A. Wolisz, A Cognitive radio approach for usage of virtual unlicensed spectrum, in: Proc. 14th IST Mobile and Wireless Communications Summit, June 2005.
- [13]. S.M. Nishra, D. Cabric, C. Chang, D. Willkomm, B. Schewick, A. Wolisz, R.W. Brodersen, A real time cognitive radio testbed for physical and link layer experiments, in: Proc. IEEE DySPAN 2005, November 2005, pp. 562–567.
- [14] D. Willkomm, J. Gross, A. Wolisz, Reliable link maintenance in cognitive radio systems, in: Proc. IEEE DySPAN 2005, November 2005, pp. 371–378.
- [15] M.M. Buddhikot, P. Kolody, S. Miller, K. Ryan, J. Evans, DIMSUMNet: new directions in wireless networking using coordinated dynamic spectrum access, in: Proc. IEEE WoWMoM 2005, June 2005, pp. 78–85.

- [16] T. Kamakaris, M.M. Buddhikot, R. Iyer, A case for coordinated dynamic spectrum access in cellular networks, in: Proc. IEEE DySPAN 2005, November 2005, pp. 289–298.
- [17]. M.M. Buddhikot, K. Ryan, Spectrum management in coordinated dynamic spectrum access based cellular networks, in: Proc. IEEE DySPAN 2005, November 2005, pp. 299–307.
- [18] L. Xu, R. Tonjes, T. Paila, W. Hansmann, M. Frank, M. Albrecht, DRiVE-ing to the internet: dynamic radio for ip services in vehicular environments, in: Proc. of 25th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks, November 2000, pp. 281–289.
- [19] D. Grandblaise, D. Bourse, K. Moessner, P. Leaves, Dynamic spectrum allocation (DSA) and reconfigurability, in: Proc. Software-Defined Radio (SDR) Forum, November 2002.
- [20]. P. Leaves, K. Moessner, R. Tafazoli, D. Grandblaise, D. Bourse, R. Tonjes, M. Breveglieri, Dynamic spectrum allocation in composite reconfigurable wireless networks, IEEE Comm. Magazine, vol. 42, May 2004, pp. 72–81.
- [21] Nautilus Project Website. Available from:  
<<http://www.cs.ucsb.edu/htzheng/cognitive/nautilus.html>>.
- [22] H. Zheng, L. Cao, Device-centric spectrum management, in: Proc. IEEE DySPAN 2005, November 2005, pp. 56–65.
- [23] H. Zheng, C. Peng, Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access, in: Proc. IEEE ICC 2005, vol. 5, May
- [24] L. Cao, H. Zheng, Distributed spectrum allocation via local bargaining, in: Proc. IEEE Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON) 2005, September 2005, pp. 475–486.
- [25] I.F. Akyildiz, Y. Li, OCRA: OFDM-based cognitive radio networks, Broadband and Wireless Networking Laboratory Technical Report, March 2006.
- [26] C. Cordeiro, K. Challapali, D. Birru, S. Shankar, IEEE 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios, in: Proc. IEEE DySPAN 2005, November 2005, pp. 328–337.
- [27] IEEE 802.22 Working group on wireless regional area networks, Available from:  
<<http://www.ieee802.org/22/>>.
- [28] RAN Requirements, Doc Num. 22-05-0007-46-0000.
- [29] Dusit Niyato, Ekram Hossain, Zhu Han., “Dynamic Spectrum Access in IEEE 802.22 –based Cognitive wireless networks : a game theoretic model for competitive spectrum bidding and pricing”, IEEE Wireless Communications , vol. 16, no.2, pp.16-23, 2009.
- [30] FCC Notice of Proposed Rule Making FCC 04-113, May 25, 2004.
- [31] Mathew Sherman, Apurva N. Mody , Ralph Martinez , Cristian Rodriguez. , “IEEE Standards supporting cognitive radio and networks, Dynamic Spectrum Access and coexistence ”IEEE Communications Magazine, vol.46, pp.72-79, 2008.

- [32] IEEE 802.22 draft standard, "IEEE P802.22TM/D0.4.8 Draft Standard for Wireless Regional Area Networks," <http://www.ieee802.org/22/>, Draft 0.4.8 March 2008.
- [33] Cavalcanti, D. Ghosh M., "Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications", CrownCom 2008, vol, no, pp.1-6, 2008.
- [34] Carlos Cordeiro, Kiran Challapali, Dagnachew Birru, Sai Shankar N., "IEEE 802.22: The First Worldwide Wireless Standard based on Cognitive Radios", DySPAN, First IEEE International Symposium on, pp. 328 – 337, 2005.
- [35] K. Challapali, S. Mangold, and Z. Zhong, "Spectrum Agile Radio: Detecting Spectrum Opportunities," in ISART, Boulder, CO, March 2004.
- [36] S. Mangold, Z. Zhong, K. Challapali, and C-T. Chou, "Spectrum Agile Radio: Radio Resource Measurements for Opportunistic Spectrum Usage," in IEEE Globecom, 2004.
- [37] K. Challapali, "Spectrum Agile Radios: Real-time Measurements," in Cognitive Radio Conference, Washington DC, October 2004.
- [38] A. Sahai, N. Hoven, and R. Tandra, "Some fundamental limits on cognitive radio," Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, October 2004.
- [39] H. Gossain, C. Cordeiro, T. Joshi, and D. Agrawal., "Cross-Layer Directional Antenna MAC and Routing Protocols for Wireless Ad Hoc Networks," in Wiley Wireless Communications and Mobile Computing Journal, Special Issue on Ad Hoc Wireless Networks, to Appear, vol.6, no.2, pp. 171-182, 2006.
- [40] Lorrie Faith Cranor and Steven S. Wildman, "Rethinking rights and regulations"
- [41] Australian Communication and Media Authority (ACMA), The Economics Of Spectrum management: A Review, (2007)
- [42] Buck S., "Replacing Spectrum Auctions with a Spectrum Commons", Stanford Technology Law Review, 2(2) 2002.
- [43] Johannes M. Bauer, "Spectrum Management: Private Property Rights or Commons".
- [44] George M. Papadourakis και Marianna F. Alogdianaki, "Radio Spectrum Management: A Survey On a Liberalized Framework and Business Strategies, 2009
- [45] Marks, Phillipa and Marks, "Spectrum Allocation, Spectrum Commons and Public Goods: the Role of the Market", September 2007
- [46] Αντώνης Χοντζεας, "Evolution in Communication, LONG TERM EVOLUTION", 2009 Online Available: <http://considerations.wordpress.com>
- [47] "Long Term Evolution (LTE): A Technical Overview". Motorola. Retrieved 2010-07-03. Online Available "[Here](#)".
- [48] LTE – an introduction. Ericsson. 2009. Online Available "[Here](#)".

[49] Online Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Long\\_Term\\_Evolution](http://en.wikipedia.org/wiki/Long_Term_Evolution)

[50] 3GPP TS 23.401. GPRS enhancements on EUTRAN access. Available at <http://www.3gpp.org>. Που είναι

[51] 3GPP TS 23.402. Architecture enhancements for non-3GPP accesses. Available at <http://www.3gpp.org>.

[52] CEPT REPORT 25, Technical Roadmap proposing relevant technical options and scenarios to optimise the Digital Dividend, including steps required during the transition period before analogue switch-off. 1 July 2008. CEPT Report 25.

[53] Analysys Mason, DotEcon, HOGAN & HARTSON, 'Exploiting the digital dividend' – a European approach. 14 August 2009. Report to the European Commission.

[54] STIRLING, ANDREW, White Spaces -- The New WiFi?, s.l. : International Journal of Digital Television, 2010, Vol. 1.

[55] Available: <http://www.thedeathofanalog.tv>.

[56] Spectrum Analysis for Future LTE Deployments., [www.motorola.com](http://www.motorola.com).