

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

TECHNOLOGICAL EDUCATIONAL INSTITUTE OF CRETE

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ / ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

BRANCH OF CHANIA

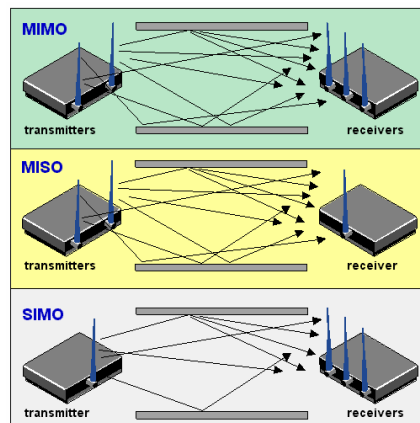
DEPARTMENT OF ELECTONICS / SECTION OF

TELECOMMUNICATION

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη αποκωδικοποίησης MIMO συστημάτων με την χρήση της υποβέλτιστης τεχνικής DELTA για την ελαχιστοποίηση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας

Decoding With Expected Length and Threshold Approximated (DELTA) A Near-ML Scheme for Multiple-Input–Multiple-Output Systems



Εισηγητής : Δρ. Κόκκινος Ευάγγελος (Επίκουρος καθηγητής)

Φοιτητής : Γιαρματσιδης Παναγιώτης (AM 3095)

XANIA 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1- ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΚΑΝΑΛΙΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΙΜΟ.....	8
1.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ.....	8
1.2. ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΚΑΝΑΛΙΑ- ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ.....	10
1.2.1 Το ασύρματο περιβάλλον διάδοσης.....	10
1.2.2. ΑΣΥΡΜΑΤΟ ΚΑΝΑΛΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ	11
1.2.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ.....	15
1.2.4. Χωρητικότητα Καναλιού Επικοινωνίας.....	16
1.3. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΙΣΜΟΥ.....	17
1.4. Ορισμοί των SISO, SIMO, MISO και MIMO καναλιών	23
1.5. ΣΥΣΤΥΜΑΤΑ ΜΙΜΟ	27
1.5.1. Εισαγωγή.....	27
1.5.2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΙΜΟ –.....	29
Συστήματα Πολλαπλών Εισόδων Πολλαπλών Εξόδων.....	29
1.5.3. Διαφορές των ευφύων κεραιών με τα συστήματα ΜΙΜΟ	33
1.6. Πλεονεκτήματα των συστημάτων ΜΙΜΟ.....	34
1.6.1. Κέρδος Διάταξης	35
1.6.2. Κέρδος Διαφορισμού.....	37
1.6.3. Σύγκριση Κέρδους Διαφορισμού και Κέρδους Διάταξης.....	38
1.6.4. Κέρδος Χωρικής Πολυπλεξίας.....	39
1.6.5. Κέρδος Χωρικής Πολυπλεξίας.....	40
1.7. Τα συστήματα ΜΙΜΟ στο εμπόριο	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-	43
ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΙΜΟ	43
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	43
2.1 ΔΕΝΤΡΑ ΚΑΙ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ (TREE SEARCH).....	44
2.1.1.Εισαγωγικές Έννοιες - Ορισμοί	44
2.1.2. Δυαδικά Δέντρα Αναζήτησης.....	46

2.1.3. Αλγόριθμος Αναζήτησης:.....	46
2.2. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ ΣΤΑ ΔΕΝΤΡΑ	47
2.2.1. Modified METRIC-FIRST METHOD.....	47
2.2.2. Αλγόριθμος Breadth-First.....	48
2.2.3. Αλγόριθμος Depth first.....	50
2.3. Αλγόριθμος Σφαιρικού Αποκωδικοποιητή (Sphere Decoder) – (NEAR MAXIMUM LIKELIHOOD)	51
2.4. Schonorr-Euchner enumeration- SEE-LSD algorithm	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-	62
ΑΝΑΛΥΣΗ PAPER:.....	62
3.1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ	62
3.2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	62
3.3. QR Αποκωδικοποιητής (QR decomposition)	65
3.4. ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	67
3.5. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΣΧΗΜΑ-ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΟΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ	71
3.6. ΤΕΧΝΙΚΗ DELTA.....	74
3.7. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	76
ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	77

Περίληψη

Σε αυτήν την εργασία έγινε μελέτη και ανάλυση των συστημάτων MIMO. Αναλύθηκαν αρκετές ορολογίες που χρησιμοποιούνται από αυτήν την τεχνολογία και αναλύθηκε μια εργασία στην οποία οι συγγραφείς προτείνουν μια τεχνική αποκωδικοποίησης την οποία ονομάζουν DELTA με την οποία αποδεικνύουν ότι μειώνει αρκετά την υπολογιστική πολυπλοκότητα.

Έχει δειχθεί, στις σχετικές έρευνες, ότι οι διατάξεις (Multiple Input – Multiple Output, MIMO) προσφέρουν σημαντική βελτίωση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος, σε σχέση με τα παραδοσιακά τηλεπικοινωνιακά συστήματα μίας εισόδου – μίας εξόδου (Single Input – Single Output , SISO Systems).

Τα συστήματα πολλαπλών κεραιών μπορούν να οριστούν ως ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα, στο οποίο τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης μπορούν να διαθέτουν πολλαπλές κεραιές. Η βασική ιδέα πίσω από τα συστήματα πολλαπλών κεραιών είναι ότι τα σήματα που μεταδίδονται από τις κεραιές του πομπού και λαμβάνονται από τις κεραιές του δέκτη, συνδυάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιώνεται σημαντικά η ποιότητα της επικοινωνίας, ή διαφορετικά ο ρυθμός σφάλματος δεδομένων (bit error rate BER).

SUMMARY

In this work was the study and analysis of MIMO systems. Analyzed several terminologies used in this technology and analyzed a task in which the authors propose a technique of decoding which is called DELTA which show that considerably reduces the computational complexity. It has been shown in investigations, that the provisions (Multiple Input - Multiple Output, MIMO) offers significant improvements in data rate and received signal strength, compared with traditional telecommunication systems, one input - one output (Single Input - Single Output, SISO Systems). The multiple antennas can be defined as a wireless telecommunications system in which both the transmitter and receiver can be equipped with multiple antennas. The basic idea behind the multiple antenna systems is that the signals transmitted from the antennas of the transmitter and received by the receiver antennas are combined so as to greatly improve the communication quality, or otherwise the data error rate (bit error rate BER).

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες η πρόοδος που έχει σημειωθεί στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών είναι ιδιαίτερα σημαντική, τόσο σε επίπεδο ερευνών όσο και εφαρμογών. Η κινητή τηλεφωνία, οι δορυφορικές επικοινωνίες και τα ασύρματα τοπικά δίκτυα είναι μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα. Ταυτόχρονα με την ανάπτυξη των εφαρμογών, ωστόσο, αυξάνονται και οι απαιτήσεις για υψηλή ποιότητα επικοινωνίας (υψηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, αξιόπιστη και αδιάλειπτη επικοινωνία, ταυτόχρονη μετάδοση διαφορετικών τύπων δεδομένων όπως ήχος, εικόνα, data). Είναι φανερό λοιπόν η ανάγκη που προκύπτει για βελτίωση των επιδόσεων των ασύρματων επικοινωνιών.

Η χωρητικότητα του ασύρματου καναλιού είναι ένα από τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν την επίδοση του, έτσι ένα τμήμα των ερευνών που αφορούν στις ασύρματες επικοινωνίες στοχεύει στη βελτιστοποίηση της. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, προς αυτή την κατεύθυνση, παρουσιάζει η πρόταση για χρήση διατάξεων πολλαπλών κεραιών στο ένα ή και στα δύο άκρα της τηλεπικοινωνιακής ζεύξης.

Έχει δειχθεί, στις σχετικές έρευνες, ότι οι διατάξεις αυτές (Multiple Input – Multiple Output, MIMO) προσφέρουν σημαντική βελτίωση του

ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος, σε σχέση με τα παραδοσιακά τηλεπικοινωνιακά συστήματα μίας εισόδου – μίας εξόδου (Single Input – Single Output , SISO Systems).

Πρόσφατα, με την εμφάνιση των μεγάλων ταχυτήτων και των συστημάτων μετάδοσης πολυμέσων, οι προηγμένες ασύρματες μεταδόσεις και οι τεχνικές κεραιών έχουν ερευνηθεί ως προς την ποικιλομορφία τους, οι προσαρμοστικές κεραιές και οι πολλαπλής εισόδου – πολλαπλής εξόδου τεχνικές (MIMO), οι οποίες εκμεταλλεύονται ρητά τις πολλαπλές διαδρομές της ασύρματης σύνδεσης. Προκειμένου να σχεδιαστούν κατάλληλα, να προγραμματιστούν και να βελτιστοποιηθούν τα συστήματα που υιοθετούν τέτοιες τεχνικές, τα πρότυπα πρόβλεψης κάλυψης δεν είναι πλέον επαρκή.

Ένας πολυδιάστατος χαρακτηρισμός της διάδοσης στον αέρα είναι απαραίτητος, συμπεριλαμβανομένης της χρονικής καθυστέρησης, της γωνίας άφιξης, της γωνίας αναχώρησης των προτύπων και της χρονικής διαφοράς του ραδιοδιαύλου. Επομένως, η πολυδιάστατη ανάλυση και η διαμόρφωση της πολλαπλών διαδρομών διάδοσης πρέπει να εξεταστούν από στρατηγικής σημασίας για την σχεδίαση και τη εφαρμογή των μελλοντικών κινητών επικοινωνιών και των συστημάτων ασύρματης μετάδοσης, ειδικά στο αστικό περιβάλλον όπου η πολλαπλών διαδρομών διάδοση είναι πιο έντονη.

Συγκεκριμένα, ένας αξιόπιστος χαρακτηρισμός των χωρικών και χρονικών ιδιοτήτων της σκέδασης του σήματος έχει μεγάλη σημασία προκειμένου να προβλεφθεί σωστά η απόδοση των συστημάτων MIMO. Τεχνικές MIMO, δηλαδή τεχνικές ασύρματης μετάδοσης βασισμένες στην υιοθέτηση των πολλαπλάσιων κεραιών και στα δύο τερματικά της σύνδεσης, έχουν προταθεί και έχουν μελετηθεί ευρέως τα τελευταία χρόνια από την θεωρία της πληροφορίας μέχρι και την μετάδοση του σήματος.

Θεωρητικά τα συστήματα MIMO πρέπει να οδηγήσουν σε μεγάλα πλεονεκτήματα όσον αφορά τις συμβατικές τεχνικές μετάδοσης από την άποψη του κέρδους ποικιλομορφίας και του κέρδους πολυπλεξίας, και επομένως και της χωρητικότητας. Η χωρητικότητα αυξάνεται ανάλογα με τον αριθμός των κεραιών (εισόδου και εξόδου), αλλά και με την αποκαλούμενη «πολλαπλών διαδρομών αφθονία» που είναι εν συντομία η ιδιότητα των πολλαπλών διαδρομών να συγκροτούνται από πολλές συνιστώσες με παρόμοιο εύρος, μήκος διάδοσης κατά την εκπομπή και την

λήψη, γωνία και χρόνο καθυστέρησης. Το όφελος των πολλαπλών διαδρομών μπορεί να μετρηθεί μέσω των αποτελεσματικών βαθμών ελευθερίας (EDOF) του ραδιοκαναλιού, που θέτει πραγματικά ένα ανώτερο επίπεδο στην απόδοση των συστημάτων, και είναι αντιστρόφως ανάλογο από τις ιδιότητες της χωρικής συσχέτισης των πολλαπλών διαδρομών του καναλιού.

Εφόσον η υλοποίηση MIMO είναι δαπανηρή από άποψη πολυπλοκότητας και μεγέθους κεραιών, η οικονομική αποτελεσματικότητά του εξαρτάται έντονα από το επιτεύξιμο κέρδος στην χωρητικότητα και επομένως και στο βαθμό των πολλαπλών διαδρομών που μπορεί να βρεθεί στα αστικά περιβάλλοντα.

Επομένως, οι κατασκευαστές και οι χειριστές ενδιαφέρονται αυτή τη στιγμή πολύ για τις εκτιμήσεις απόδοσης MIMO στο πραγματικό περιβάλλον και συνεπώς σε έναν ρεαλιστικό χαρακτηρισμό πολλαπλών διαδρομών διάδοσης μέσα σε αστικό περιβάλλον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1- ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΚΑΝΑΛΙΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑ MIMO

1.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Αφορμή για τη γέννηση της επιστήμης της ασύρματης επικοινωνίας στάθηκε η θεμελίωση της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας από το Maxwell το 1861. Πρώτος ο Maxwell απέδειξε την ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και πρότεινε τη χρήση τους στο χώρο των επικοινωνιών. Βασισμένος στις αποδείξεις του Maxwell ο Marconi το 1895 πραγματοποιεί την πρώτη επίσημη ασύρματη μετάδοση με τη βοήθεια ενός δίπολου Hertz. Κατασκεύασε με αυτόν τον τρόπο τον πρώτο ασύρματο τηλέγραφο. Μετά από αυτή την πρώτη μετάδοση ξεκίνησαν περαιτέρω προσπάθειες ανάπτυξης των ασύρματων επικοινωνιών και μάλιστα η εφεύρεση των ενισχυτικών λυχνιών και ταλαντωτών τη δεκαετία 1905-1915 οδήγησε σε ακόμη ταχύτερη εξέλιξή τους.

Η πρώτη εμφάνιση κινητής ασύρματης ζεύξης πραγματοποιείται στους 2 μεγακύκλους γύρω στα 1921 στα πλαίσια των αναγκών της αστυνομίας του Detroit. Ωστόσο εξαιτίας των χαμηλών συχνοτήτων

εκπομπής τα κανάλια παρέμειναν περιορισμένα, γεγονός που αποτελούσε ανυπέρβλητο εμπόδιο για την περαιτέρω ανάπτυξη τόσο των κινητών όσο και των ασύρματων επικοινωνιών.

Σταθμός στην πορεία των τηλεπικοινωνιών αποτέλεσε η χρησιμοποίηση της διαμόρφωσης συχνότητας (Frequency Modulation) από τον Armstrong στα 1933. Από 1946 οι μεταδόσεις μπορούσαν να πραγματοποιούνται στα 150MHz ενώ εμφανίστηκαν και τα πρώτα κανάλια φωνής εύρους 120KHz.

Το πρώτο σύστημα κινητών τηλεπικοινωνιών ήταν το IMTS (Improved Mobile Telephone Service) το οποίο συνδεόταν μέσω σταθερών ραδιοκαναλιών με το δημόσιο δίκτυο. Το 1947 τα Bell Labs παρουσίασαν την ιδέα των κυψελωτών συστημάτων, γεγονός που οδήγησε στη ευρεία γεωγραφική ανάπτυξη των κινητών τηλεπικοινωνιών (Arogyaswami,2003).

Το πρώτο κυψελωτό σύστημα κινητής τηλεφωνίας υψηλής χωρητικότητας ευρείας γεωγραφικής κάλυψης προτάθηκε το 1970 από την AT&T. Το σύστημα αυτό που ονομάστηκε AMPS (Advanced Mobile Phone Service) ήταν καθαρά αναλογικό και αναφέρεται ως σύστημα 1ης γενιάς. Το 1982 με την είσοδο της ψηφιακής επεξεργασίας των σημάτων εμφανίζεται το GSM (Global System for Mobile) το οποίο αναφέρεται ως σύστημα 2ης γενιάς και επικρατεί στον Ευρωπαϊκό χώρο έως και σήμερα. Το GSM υλοποιήθηκε ώστε να υποστηρίζει κυρίως υπηρεσίες φωνής (13Kbps) και δεδομένων μέχρι 9.6Kbps.(Κανάτας 2001)

Ωστόσο στις αρχές του 2000 οι ανάγκες για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης αυξήθηκαν σημαντικά ώστε το GSM να θεωρείται ανεπαρκές. Μπροστά στις νέες αυτές απαιτήσεις έγιναν προσπάθειες βελτιστοποίησης προς όλες τις βαθμίδες ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Συγκεκριμένα βελτιώθηκαν οι μέθοδοι διαμόρφωσης, κωδικοποίησης καθώς και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Ωστόσο οι απαιτήσεις ήταν ακόμη μεγαλύτερες με αποτέλεσμα τα τελευταία χρόνια να γίνονται προσπάθειες βελτίωσης της τεχνολογίας των κεραιών.

Η νέα τεχνολογία κεραιών που εισήχθη ονομάστηκε τεχνολογία ευφυών κεραιών. Πρόγονος αυτών των κεραιών θεωρούνται οι απλές στοιχειοκεραίες.

Οι ασύρματες τηλεπικοινωνίες παρουσιάζουν ραγδαία εξέλιξη, φτάνοντας στα σημερινά χρόνια, όπου αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι

της καθημερινότητάς μας. Η αλματώδης ανάπτυξη τους τα τελευταία χρόνια, που συμβαδίζει με τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για μεγαλύτερη ταχύτητα και καλύτερη ποιότητα μετάδοσης δεδομένων, λιγότερη ενέργεια, μικρότερες και φθηνότερες διατάξεις επιβάλλει την εστίαση της επιστημονικής έρευνας προς αυτή την κατεύθυνση. Νέες τεχνικές ασύρματης μετάδοσης έχουν επινοηθεί με σκοπό τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Τα συστήματα πολλαπλών κεραιών εκπομπής και λήψης (MIMO) αποτελούν μια αξιόπιστη λύση καθώς βελτιώνουν την ποιότητα μετάδοσης του συστήματος διατηρώντας ταυτόχρονα την ταχύτητα μετάδοσης σε υψηλά επίπεδα. Ικανοποιώντας λοιπόν τις σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις, οι τεχνικές MIMO (Multiple Input Multiple Output) αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη μέθοδο για τις αναπτυσσόμενες τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές του μέλλοντος (κινητή τηλεφωνία, WiFi, WiMax κλπ.).

Οι ασύρματες τηλεπικοινωνίες έχουν εισχωρήσει σε μεγάλο βαθμό στη ζωή μας βρίσκοντας εφαρμογή σε μία ευρύτατη κατηγορία συστημάτων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα χρήσης ασύρματης επικοινωνίας είναι τα συστήματα αεροπλοΐας, ναυσιπλοΐας, τηλεμετρίας και τηλεπισκόπησης, ενώ εξετάζεται πλέον η χρήση ασυρμάτων τεχνολογιών για ιατρικούς και διαγνωστικούς σκοπούς. Πέραν τούτου δεν θα πρέπει να ξεχνάει κανείς την επίδραση των ασυρμάτων τηλεπικοινωνιών στην καθημερινότητά μας μέσω των ασυρμάτων και κινητών δικτύων τηλεφωνίας και δεδομένων, αλλά και των δορυφορικών συστημάτων που προσφέρουν την δυνατότητα επικοινωνίας ακόμη και σε απομακρυσμένες περιοχές.

1.2. ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΚΑΝΑΛΙΑ- ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ

1.2.1 Το ασύρματο περιβάλλον διάδοσης

Ενδιαφερόμαστε κυρίως για τη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, τα οποία στην περίπτωση των κινητών τηλεπικοινωνιών κυμαίνονται από μερικές εκατοντάδες MHz έως λίγα GHz. Σε αυτές τις συχνότητες η συμπεριφορά του ασύρματου καναλιού έχει μελετηθεί και τα

προβλήματα που εμφανίζονται στη διάδοση των σημάτων έχουν προσδιορισθεί.

Σε ένα ασύρματο περιβάλλον η διάδοση των σημάτων πραγματοποιείται κυρίως με τέσσερις τρόπους: με απευθείας διάδοση, με ανάκλαση, με περίθλαση και με σκέδαση. Ανάκλαση συμβαίνει όταν ένα κύμα προσπίπτει σε εμπόδιο πολύ μεγάλων διαστάσεων σε σχέση με το μήκος κύματός του, ενώ σκέδαση όταν οι διαστάσεις του αντικειμένου είναι συγκρίσιμες με το μήκος κύματός του. Περίθλαση συμβαίνει όταν το κύμα συναντάει αδιαπέραστο εμπόδιο με αιχμηρές κυρίως καταλήξεις και απευθείας διάδοση όταν μεταξύ πομπού και δέκτη δεν παρεμβάλλονται εμπόδια.

Ένας τρόπος να ελεγχθεί η ποιότητα μιας ασύρματης ζεύξης είναι τα επίπεδα ισχύος του λαμβανόμενου σήματος. Έτσι δημιουργείται το προφίλ ισχύος μιας περιοχής διάδοσης συναρτήσει της απόστασης. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι η ισχύς των σημάτων επηρεάζεται από τρία κυρίως φαινόμενα. Τις απώλειες διάδοσης (path loss), τη σκίαση (shadowing) και τις διαλείψεις λόγω πολύοδης διάδοσης (multipath fading). Παρακάτω αναλύονται σύντομα τα τρία αυτά φαινόμενα διάδοσης και ταυτόχρονα οι λόγοι μείωσης της ισχύος ενός σήματος (Θεολόγου, 2002).

Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω ενός ασύρματου καναλιού είναι ένα πολύ πολύπλοκη διαδικασία η οποία χαρακτηρίζεται από ένα πλήθος φαινομένων όπως η πολυόδευση, η σκίαση από διάφορα αντικείμενα κ.α. Μια ακριβής μαθηματική περιγραφή αυτής της διαδικασίας, μας είναι είτε άγνωστη ή πολύ σύνθετη. Για αυτό το λόγο, μεγάλες προσπάθειες έχουν γίνει προς την κατεύθυνση της στατιστικής μοντελοποίησης του ασύρματου καναλιού με σκοπό το χαρακτηρισμό των φαινομένων που δρουν σε αυτό. Αποτέλεσμα αυτών των προσπαθειών είναι κάποια σχετικά απλά στατιστικά μοντέλα τα οποία περιγράφουν με αρκετή ακρίβεια τα διάφορα κανάλια διαλείψεων ανάλογα με το περιβάλλον και το σενάριο επικοινωνίας.

1.2.2. ΑΣΥΡΜΑΤΟ ΚΑΝΑΛΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ

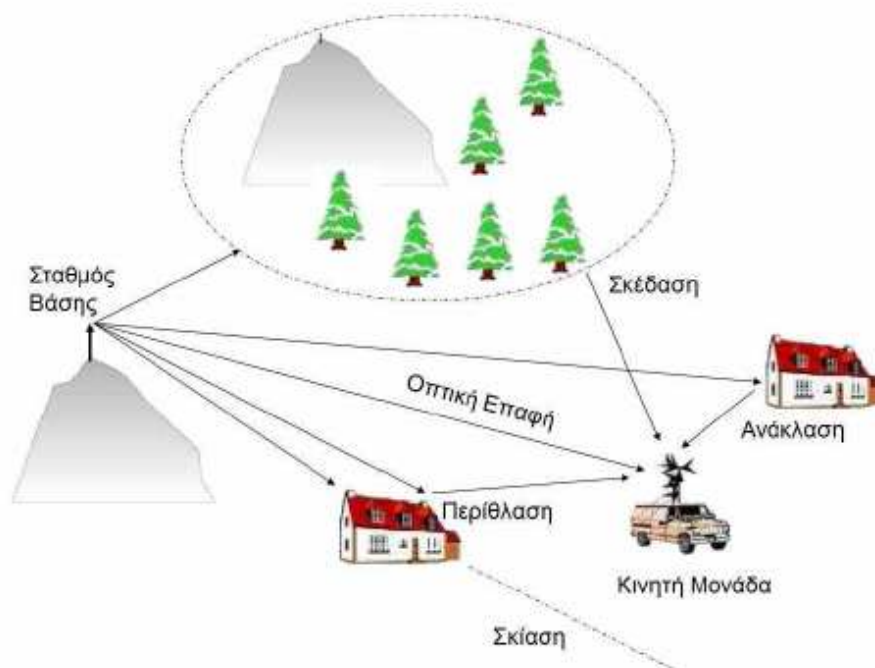
Η ασύρματη διάδοση ραδιοκυμάτων είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη. Δεδομένου ότι η ζεύξη μεταξύ του πομπού και του δέκτη παρεμποδίζεται

από φυσικά εμπόδια, ένα σήμα φθάνει στον προορισμό του ακολουθώντας πολλές διαφορετικές διαδρομές (πολυόδευση). Οι διαδρομές αυτές προκύπτουν λόγω των φαινομένων ανάκλασης, περίθλασης και σκέδασης που δημιουργούνται από τα αντικείμενα του περιβάλλοντος καθώς και εξαιτίας του φαινομένου της διάθλασης στο φυσικό μέσο διάδοσης. Κατά συνέπεια, η ισχύς των εκπεμπόμενων σημάτων λαμβάνεται στο δέκτη μέσα από μια πολλαπλότητα διαδρομών διαφορετικής έντασης. Επιπλέον, οι χρόνοι άφιξης των σημάτων είναι διαφορετικοί (ανάλογοι προς τα μήκη των διαδρομών που δυνήθηκαν) γεγονός το οποίο δυσκολεύει το δέκτη στην σύνθεση του αρχικά εκπεμπόμενου σήματος.

Όπως είναι κατανοητό, η ανάλυση που βασίζεται σε αιτιοκρατικούς μηχανισμούς διάδοσης μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο σε πολύ απλές περιπτώσεις. Η επίλυση των εξισώσεων Maxwell με συνοριακές συνθήκες που να αντιπροσωπεύουν τις φυσικές ιδιότητες και την αρχιτεκτονική του περιβάλλοντος είναι υπολογιστικά αδύνατη, αφού ακόμη και με τους σημερινούς ισχυρότατους Η/Υ, δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν ρεαλιστικές καταστάσεις. Σε σχεδόν όλα τα πραγματικά ασύρματα κανάλια διάδοσης (εσωτερικά- υπαίθρια περιβάλλοντα, indoor/outdoor environments), χρησιμοποιείται η στατιστική προσέγγιση η οποία είναι αρκετά ακριβής. Στην μοντελοποίηση καναλιών διάδοσης με στατιστικά μοντέλα, οι στατιστικές παράμετροι συλλέγονται από πραγματικές μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιούνται στις πιθανές θέσεις εγκατάστασης του πομπού και του δέκτη (Κωττής 2011).

Παρά την πολυπλοκότητα των χαρακτηριστικών διάδοσης, έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες προκειμένου να επιτύχουμε τη μοντελοποίηση του ασύρματου καναλιού και το χαρακτηρισμό των διαφορετικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε αυτό. Τα αποτελέσματα των προσπαθειών αυτών είναι ένα σύνολο σχετικά απλών στατιστικών μοντέλων των καναλιών εξασθένισης με ιδιαίτερη ακρίβεια.

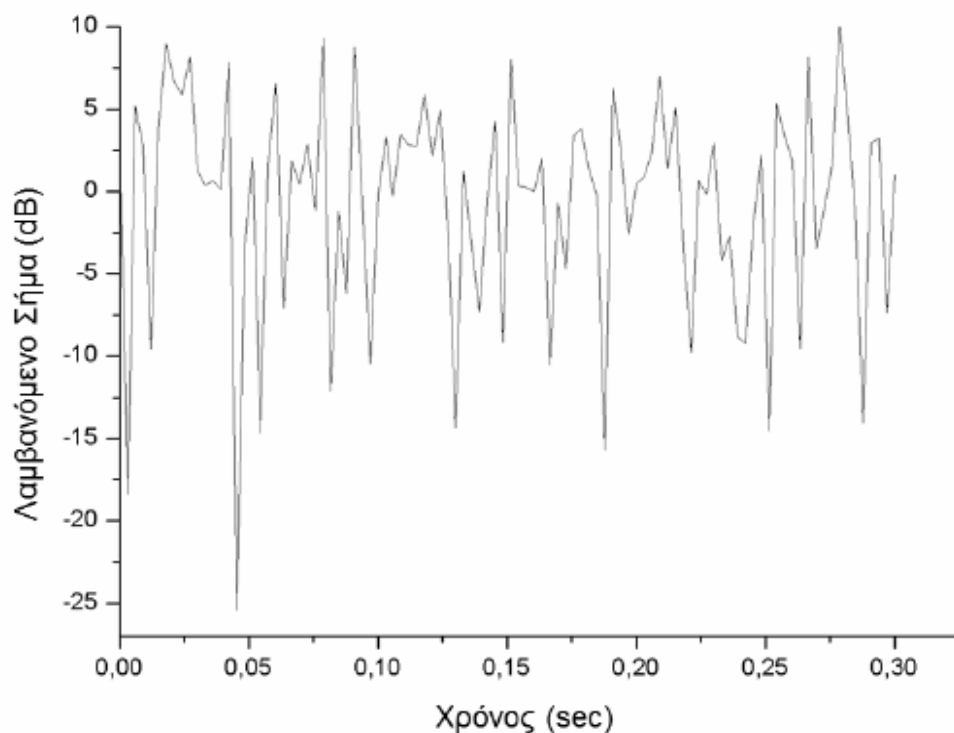
Ένα τυπικό σενάριο για μετάδοση μέσα στο επίγειο ασύρματο κανάλι δίνεται στο σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 – Τυπικό σενάριο πολυόδευσης στο επίγειο ασύρματο κανάλι .

Τα διαφορετικά αυτά σήματα μπορεί να συμβάλλουν αφαιρετικά στον δέκτη προκαλώντας απότομες μεταβολές της ισχύος, γεγονός το οποίο αντιστοιχεί στην παραμόρφωσή του σήματος και κατά συνέπεια την υποβάθμιση της ποιότητας της τηλεπικοινωνιακής ζεύξης. Οι παραμορφώσεις αυτές εκδηλώνονται ως χρονικές διακυμάνσεις της έντασης του σήματος και καλούνται διαλείψεις (fading). Η πολυόδευση σε συνδυασμό με την κίνηση του δέκτη (η ακόμα και του πομπού) οδηγεί σε μεγάλες και τυχαίες διακυμάνσεις της στάθμης ισχύος του λαμβανόμενου σήματος.

Ένα τυπικό παράδειγμα διαλείψεων φαίνεται στο σχήμα 1.2. Η πολυόδευση του σήματος (multipath propagation), αποτελεί τη βασική αιτία εμφάνισης διαλείψεων στον δέκτη.



Σχήμα 1.2 - Στάθμη ισχύος του λαμβανομένου σήματος συναρτήσει του χρόνου

Για την ασύρματη μετάδοση το κανάλι είναι συνήθως η ατμόσφαιρα (ελεύθερος χώρος). Κάποιες από τις επιθυμητές ιδιότητες ενός ασύρματου συστήματος επικοινωνίας είναι η υψηλή χωρητικότητα και ποιότητα υπηρεσιών, ο υψηλός ρυθμός μετάδοσης σε συνδυασμό με χαμηλό ρυθμό σφαλμάτων (BER – Bit Error Rate), το μεγάλο εύρος ζώνης και το χαμηλό κόστος λειτουργίας. Οι απαιτήσεις αυτές σε πολλές περιπτώσεις πρέπει να ικανοποιούνται ταυτόχρονα, σε ολόκληρη την έκταση του ασύρματου καναλιού, το οποίο από τη φύση του είναι ιδιαίτερα αφιλόξενο. Χαρακτηριστική τέτοια περίπτωση είναι η μετάδοση σε συνθήκες μη οπτικής επαφής (NLOS propagation scenario). Τις τελευταίες δεκαετίες η μετάδοση μη οπτικής επαφής - NLOS αποτελεί συνηθισμένη περίπτωση, εξαιτίας της ραγδαίας ανάπτυξης των ασύρματων επικοινωνιών σε αστικό

περιβάλλον. Ως εκ τούτου η ανάγκη για σχεδιασμό αποδοτικών συστημάτων σε τέτοιου είδους συνθήκες έχει αυξηθεί (Κωττής, 2011)

1.2.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ

Οποιοδήποτε κι αν είναι το φυσικό μέσο - κανάλι για τη μετάδοση του σήματος, το κύριο χαρακτηριστικό του είναι ότι το μεταδιδόμενο σήμα αλλοιώνεται κατά τυχαίο τρόπο από μία ποικιλία μηχανισμών που επενεργούν σ' αυτό. Τέτοιοι μηχανισμοί υποβάθμισης του σήματος είναι ο θερμικός θόρυβος, οι παρεμβολές από άλλα σήματα, οι απώλειες διαδρομής κ.α. Στις περιπτώσεις διάδοσης σε συνθήκες μη οπτικής επαφής υπάρχει και μία επιπρόσθετη μορφή υποβάθμισης του μεταδιδόμενου σήματος, το φαινόμενο των διαλείψεων. Εξαιτίας των πολλαπλών διαδρομών (multipath propagation) τις οποίες ακολουθεί το σήμα μέχρι να φτάσει στον δέκτη εκδηλώνονται ως χρονικές διακυμάνσεις της έντασης του σήματος και καλούνται διαλείψεις. Τα φαινόμενα multipath δημιουργούνται όταν πολλαπλά αντίγραφα του αρχικά μεταδιδόμενου σήματος φθάνουν στον δέκτη αφού έχουν υποστεί τις επιδράσεις των διαφόρων σωμάτων που βρίσκονται στο περιβάλλον της διάδοσης. Τα διαφορετικά αυτά σήματα μπορεί να συμβάλλουν αφαιρετικά στον δέκτη προκαλώντας απότομες μεταβολές της ισχύος), με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας της τηλεπικοινωνιακής ζεύξης (διαλείψεις - signal fading). (Rappaport, 2001)

Ένα από τα θεμελιώδη ζητήματα που προκύπτουν κατά τη σχεδίαση ενός ασύρματου ή κινητού τηλεπικοινωνιακού συστήματος είναι η μοντελοποίηση της επίδρασης του ασύρματου καναλιού στην ποιότητα της λήψης. Για την κατανόηση και τη μοντελοποίηση αυτής της επίδρασης είναι απαραίτητη η μελέτη των φυσικών μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι

Ανάκλαση: Η αλλαγή κατεύθυνσης του κύματος κατά την πρόσπτωσή του στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων, με τέτοιο τρόπο ώστε το κύμα να επιστρέφει στο μέσο όπου και παρήχθη.

Περίθλαση: Σχετίζεται με διάφορα φαινόμενα στα οποία υπόκειται το μεταδιδόμενο κύμα, όταν προσπίπτει σε κάποιο αιχμηρό αντικείμενο ή άνοιγμα.

Διάθλαση: Η αλλαγή της κατεύθυνσης του κύματος εξαιτίας της μεταβολής στην ταχύτητα διάδοσής του, καθώς περνά από ένα μέσο σε κάποιο άλλο.

Σκέδαση: Μια φυσική διαδικασία στην οποία εξαναγκάζονται τα κύματα όταν αλληλεπιδρούν με αντικείμενα μεγέθους συγκρίσιμου ως προς το μήκος κύματος, και κατά την οποία το αρχικό κύμα διαχέεται προς διάφορες κατευθύνσεις μετά την επίδραση με το αντικείμενο.⁴

1.2.4. Χωρητικότητα Καναλιού Επικοινωνίας

Βάσει του θεωρήματος του Shannon, ως χωρητικότητα ενός καναλιού επικοινωνίας ορίζεται το μέτρο του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων για αξιόπιστη επικοινωνία – με την έννοια της δυνατότητας μετάδοσης με μικρή πιθανότητα σφάλματος. Με άλλα λόγια, αυτό που απορρέει από το θεώρημα Shannon είναι ότι ο κύριος περιορισμός που θέτει σ' ένα κανάλι επικοινωνίας η ύπαρξη θορύβου, δεν αφορά στη ποιότητα της επικοινωνίας αυτή καθαυτή αλλά στην ταχύτητα της. Αυτό που τελικά μας δίνει, δηλαδή, το παραπάνω θεώρημα είναι ένα άνω όριο της λειτουργίας του τηλεπικοινωνιακού συστήματος.

Η χωρητικότητα ενός συγκεκριμένου ασύρματου συστήματος επικοινωνίας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως ο θόρυβος, το πλήθος των χρησιμοποιούμενων κεραιών στον πομπό και στον δέκτη και η επίδραση των συνιστωσών πολλαπλών οδεύσεων που δημιουργούνται κατά τη μετάβαση του σήματος μέσα από το κανάλι. Κάποιες από τις παραπάνω παραμέτρους είναι καθορισμένες, ενώ άλλες μπορούν να επιλεγθούν κατάλληλα ώστε να βελτιστοποιηθεί η επίδοση του συστήματος. (Marzetta, 1999)

Ας θεωρήσουμε αρχικά την απλή περίπτωση, στην οποία έχουμε μία κεραία εκπομπής και μία λήψης. Ένα τέτοιο σύστημα καλείται σύστημα μίας εισόδου – μίας εξόδου (Single Input – Single Output, SISO system).

Υποθέτουμε επίσης ότι το εκπεμπόμενο σήμα διαβρώνεται από λευκό, προσθετικό Gaussian θόρυβο (AWGN). Η σχέση εισόδου – εξόδου ενός τέτοιου καναλιού μπορεί είναι

1.3. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΙΣΜΟΥ

Η έννοια του διαφορισμού

Σε μια προσπάθεια καταπολέμησης των διαλείψεων του λαμβανόμενου σήματος λόγω των διαφόρων μηχανισμών εξασθένησης που προκαλούνται στα ασύρματα κανάλια (κυρίως λόγω του φαινομένου της πολυόδευσης), μελετήθηκαν διάφορες τεχνικές. Μία από αυτές είναι η τεχνική της απόκλισης ή αλλιώς τεχνική διαφορικής εκπομπής – λήψης. Η βασική ιδέα της τεχνικής αυτής στηρίζεται στην λήψη από τον δέκτη του συστήματος επικοινωνίας πολλών αντιγράφων του μεταδιδόμενου σήματος. Αν τα διαφορετικά αυτά αντίγραφα υπόκεινται σε διαφορετικές, ανεξάρτητες διαλείψεις είναι λιγότερο πιθανό να υποστούν ταυτόχρονα μια καταστροφική πτώση της ισχύος. Τα αντίγραφα του μεταδιδόμενου σήματος, έχοντας υποστεί διαφορετικές διαλείψεις, συνδυαζόμενα κατάλληλα μπορούν να σχηματίσουν στο δέκτη ένα σήμα με αρκετά μικρότερες διακυμάνσεις

Ο όρος **διαφορισμός** (*diversity*) αναφέρεται στην εκμετάλλευση δύο ή περισσότερων αντιγράφων του εκπεμπόμενου σήματος πληροφορίας, τα οποία φτάνουν στον δέκτη μεταδιδόμενα μέσα από κανάλια με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Σκοπός της τεχνικής αυτής είναι η αύξηση της λαμβανόμενης ενέργειας του σήματος με τον κατάλληλο συνδυασμό των πολλαπλών αντιγράφων του ίδιου σήματος πληροφορίας, που συλλέγει ο δέκτης. Για να κατανοήσουμε καλύτερα την κεντρική ιδέα που βρίσκεται πίσω από τον διαφορισμό, ας θεωρήσουμε ότι η πιθανότητα να εξασθενίσει ένα από τα σήματα κάτω από μια κρίσιμη τιμή είναι p . Τότε, η πιθανότητα να εξασθενίσουν ταυτόχρονα όλα τα L ανεξάρτητα αντίγραφα του σήματος κάτω από την ίδια κρίσιμη τιμή είναι p^L . (Alamouti, 1998)

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι με τη χρήση τεχνικών διαφορισμού και τον κατάλληλο συνδυασμό των σημάτων στον δέκτη, μπορούμε να εξασφαλίσουμε ικανοποιητική σηματοθορυβική σχέση και να περιορίσουμε σημαντικά το βάθος και την διάρκεια των διαλείψεων.

Ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής των πολλαπλών αντιγράφων του σήματος πληροφορίας στον δέκτη, μπορούμε να διακρίνουμε τους παρακάτω τύπους διαφορισμού λήψης (*receive diversity*):

Το πλεονέκτημα το οποίο προκύπτει από την ύπαρξη διαφορισμού σε ένα σύστημα λέγεται κέρδος διαφορισμού G_d και ουσιαστικά είναι η κλίση της καμπύλης πιθανότητας (dB) e^P ως προς το SNR (dB), για πολύ μεγάλες τιμές του SNR .

$$G_d = - \lim_{SNR \rightarrow \infty} \frac{\log(P_e)}{\log(SNR)}$$

Διαφορισμός Χώρου ή Κεραίας (*Space or Antenna Diversity*): Διακρίνεται σε :

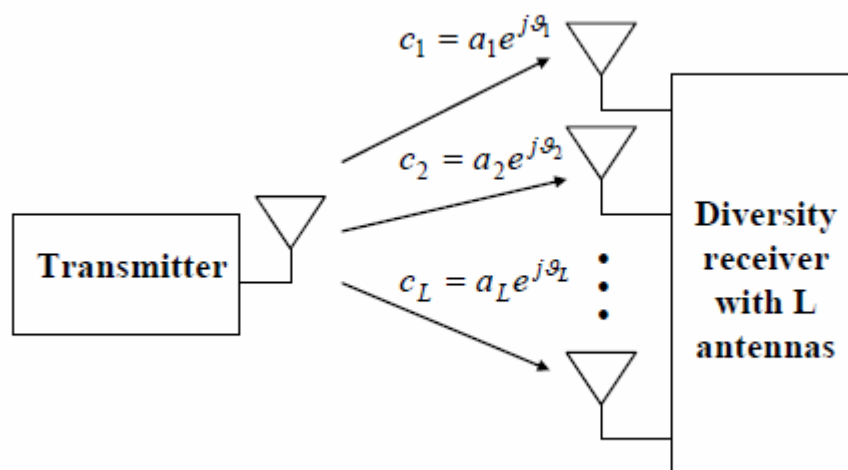
- διαφορισμό εκπομπής (transmit antenna diversity) και
- διαφορισμό λήψης (receive antenna diversity).

Η απλούστερη και η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος για να επιτύχουμε διαφοροποίηση του σήματος είναι μέσω της χρήσης πολλαπλών κεραιών λήψης, αλλά με την ίδια κεραία εκπομπής. Δεν απαιτεί ούτε επιπλέον ισχύ εκπομπής, αλλά ούτε επιπλέον εύρος ζώνης και πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας κεραιές λήψης ή εκπομπής τοποθετημένες σε ορισμένη απόσταση μεταξύ τους ώστε να έχουμε ανεξάρτητες- διαφορετικές διαλείψεις σε κάθε λαμβανόμενο σήμα. Οι κεραιές λήψης πρέπει να απέχουν αρκετά μεταξύ τους, ώστε οι πολλαπλές συνιστώσες του σήματος να φτάνουν στον δέκτη μέσω σημαντικά διαφορετικών διαδρομών. Σύμφωνα με διάφορες εκτιμήσεις, απαιτείται μια απόσταση μισού έως μερικών μηκών κύματος μεταξύ κάθε ζεύγους κεραιών λήψης, προκειμένου οι διαλείψεις των σημάτων να είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Οι απαιτήσεις χώρου λόγω της χρήσης πολλών κεραιών αποτελούν και το κυριότερο μειονέκτημα της τεχνικής αυτής.

Ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του '50 χρησιμοποιείται επιτυχώς η τεχνική λήψης του ίδιου σήματος πληροφορίας από πολλές κεραιές στο δέκτη, ο λεγόμενος συνδυασμός μεγίστου λόγου (*Maximum Ratio*

Combining-MRC) που θα περιγραφεί στην επόμενη ενότητα. Παρόμοιες τεχνικές αποτελούν ο συνδυασμός ίσου κέρδους (Equal Gain Combining-EGC), ο συνδυασμός τετραγωνικού νόμου (Square Law Combining-SLC) και ο συνδυασμός επιλογής (Selection Combining- SC). Για την περίπτωση της χρήσης πολλαπλών κεραιών στον πομπό, έχει αποδειχθεί ότι διαφορισμός επιτυγχάνεται μόνο στη περίπτωση που υπάρχει γνώση του καναλιού από αυτόν (τεχνικές Beamforming). Εδώ και μία δεκαετία, η μελέτη των συστημάτων πολλαπλών κεραιών εκπομπής και λήψης (Multiple Input Multiple Output-MIMO) εφαρμόζονται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται υψηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων σε συνδυασμό με μικρή πιθανότητα σφάλματος. (Chyi, 2002)

Η σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος διαφορισμού χώρου φαίνεται στο σχήμα 2.1



Σχήμα 2.1: Σύστημα διαφορισμού χώρου με μια κεραία εκπομπής και L κεραιές λήψης

Διαφορισμός Χρόνου (Time Diversity):

Είναι μηχανισμός περισσότερο εφαρμόσιμος σε συστήματα ψηφιακής μετάδοσης. Το ίδιο ψηφίο (bit) πληροφοριακού σήματος εκπέμπεται επανειλημμένα σε διαφορετικές χρονοθυρίδες (time slots) που απέχουν κάποιο χρονικό διάστημα ώστε οι διαλειπτικές διακυμάνσεις στις διαφορετικές αυτές επαναλήψεις να είναι ανεξάρτητες. Το πλεονέκτημα

είναι ότι απαιτείται η χρήση μίας μόνο κεραίας. Το μειονέκτημα είναι ότι αργά κινούμενοι δέκτες απαιτούν μεγαλύτερη απόσταση χρονοθυρίδων πράγμα που μειώνει την απόδοση του συστήματος.

Ο διαφορισμός μπορεί να επιτευχθεί και μέσω της μετάδοσης του ίδιου σήματος πληροφορίας σε διαφορετικές χρονοθυρίδες, με χρονική απόσταση μεταξύ τους ίση ή μεγαλύτερη από το χρόνο συμφωνίας T_c του καναλιού. Δεδομένου, όμως, ότι ο χρόνος συμφωνίας του καναλιού είναι αντιστρόφως ανάλογος της εξάπλωσης Doppler, η τεχνική αυτή είναι ασύμφορη σε κανάλια όπου η εξάπλωση Doppler είναι μικρή, καθώς εισάγει μεγάλη καθυστέρηση στη μετάδοση του σήματος και οδηγεί σε μείωση του ρυθμού μετάδοσης της πληροφορίας. Επιπλέον, η τεχνική αυτή απαιτεί πολύ καλό συγχρονισμό και μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε σχέση με τον διαφορισμό χώρου. (Neasmith, 1998)

Διαφορισμός Συχνότητας (Frequency Diversity):

Εφαρμόζεται μεταδίδοντας την ίδια πληροφορία σε διαφορετικές συχνότητες οι οποίες απέχουν επαρκώς μεταξύ τους ώστε να εξασφαλιστεί η στατιστική ανεξαρτησία μεταξύ των αντιγράφων του μεταδιδόμενου σήματος. Το μόνο πλεονέκτημα του είναι ότι απαιτείται η χρήση μίας μόνο κεραίας. Τα μειονεκτήματα είναι η κατάληψη μεγαλύτερου εύρους ζώνης, το μοίρασμα της εκπεμπόμενης ισχύος στις αντίστοιχες φέρουσες συχνότητες και το υψηλό κόστος υλοποίησης.

Πιο αναλυτικά, στην τεχνική αυτή, μεταδίδουμε το σήμα πληροφορίας σε δύο ή περισσότερες φέρουσες συχνότητες ενός OFDM, στο οποίο η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών φερουσών είναι ίση ή μεγαλύτερη από το σύμφωνο εύρος ζώνης B_c του καναλιού, ώστε να εξασφαλίζεται η ανεξαρτησία των αντιγράφων του εκπεμπόμενου σήματος. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για την καταπολέμηση των διαλείψεων επιλεκτικών στη συχνότητα. Είναι, επίσης, προφανές ότι η μέθοδος αυτή απαιτεί σημαντικά μεγαλύτερο εύρος ζώνης, το οποίο αυξάνει ανάλογα με την τάξη του διαφορισμού που επιθυμούμε να πετύχουμε. Κατά τη μετάδοση μέσα από ευρυζωνικό κανάλι, παρουσιάζονται διαλείψεις επιλεκτικές στη συχνότητα, δηλαδή, κάθε φασματική συνιστώσα του σήματος επηρεάζεται με διαφορετικό τρόπο.

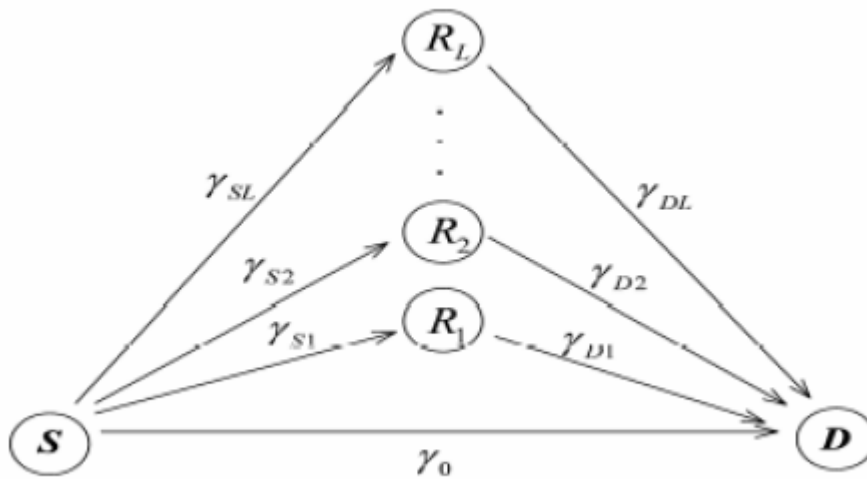
Σκοπός είναι η καταπολέμηση αυτών των διαλείψεων που προκαλούν ενδοσυμβολική παρεμβολή και αυτό επιτυγχάνεται με τις τεχνικές OFDM και CDMA.

Το κύριο πλεονέκτημα που προσφέρει η τεχνική OFDM είναι ο αποτελεσματικός τρόπος με τον οποίο χειρίζεται την εξάπλωση καθυστέρησης (delay spread) των πολλαπλών οδεύσεων (multipath) του λαμβανόμενου σήματος. Με τη διαίρεση της ακολουθίας των δεδομένων εισόδου σε s N φέροντα, η διάρκεια του κάθε συμβόλου αυξάνεται κατά s N φορές και γίνεται μεγαλύτερη από την εξάπλωση καθυστέρησης. (Alamoutti,1998)

Διαφορισμός πολλαπλών οδεύσεων (Multipath Diversity) Σε περίπτωση που οι χρονικές καθυστερήσεις δεν εισάγονται τεχνητά, όπως στη περίπτωση του διαφορισμού χρόνου, αλλά μέσω των πολλαπλών οδεύσεων, έχουμε διαφορισμό πολλαπλών οδεύσεων. Σε αντίθεση με τον διαφορισμό χρόνου και συχνότητας, η μέθοδος αυτή δεν απαιτεί επιπρόσθετο εύρος ζώνης για την υλοποίηση της. Ο διαχωρισμός του σήματος σε συνιστώσες με διαφορετικές καθυστερήσεις οφείλεται στη χρήση σήματος με εύρος ζώνης μεγαλύτερο από το σύμφωνο εύρος ζώνης του καναλιού. Η μέθοδος αυτή σε συνδυασμό με έναν δέκτη RAKE βρίσκει σημαντική εφαρμογή σε συστήματα επικοινωνιών ευρείας ζώνης.

Διαφορισμός Συνεργασίας (Cooperative Diversity) Στον διαφορισμό συνεργασίας το σήμα που φτάνει στον δέκτη του χρήστη αποτελείται από το σήμα που προέρχεται απευθείας από τον πομπό και από αντίγραφα του ίδιου σήματος, που μεταδίδονται μέσω κεραιών διασκορπισμένων στο χώρο και ανήκουν σε άλλους χρήστες. (Sendonaris,2003)

Στο σχήμα 1.3 παρουσιάζεται το μπλοκ διάγραμμα ενός συστήματος διαφορισμού συνεργασίας.



Σχήμα 1.3: Διαφορισμός συνεργασίας.

Διαφορισμός πόλωσης

Ο διαφορισμός πόλωσης αποτελεί μια έξυπνη ιδέα αντικατάστασης αρχικά δύο απομακρυσμένων κεραιών από μία η οποία δύναται να υποστηρίξει εκπομπή/λήψη με δύο είδη πολώσεων, δηλαδή οριζόντια και κάθετη. Παρ' όλα αυτά, λόγω αδυναμίας τέλει πόλωσης στα πρακτικά συστήματα, η ποιότητα επικοινωνίας περιορίζεται εξαιτίας παρεμβολής των σημάτων που εκπέμπονται με τις δύο διαφορετικές πολώσεις. Τα τελευταία χρόνια διάφορες μελέτες παρουσιάζουν υβριδικά συστήματα διαφορισμού πόλωσης-χρόνου, με αμφισβητούμενα ωστόσο αποτελέσματα.

Διαφορισμός Γωνίας (angle diversity).

Πραγματοποιείται κατά την εκπομπή του σήματος από διαφορετικές γωνίες, χρησιμοποιώντας κατευθυντικές κεραιές ώστε στο δέκτη να λαμβάνονται ασυσχέτιστα σήματα. Με την τεχνική αυτή περιορίζεται σημαντικά το φαινόμενο Doppler ενώ δεν εφαρμόζεται αποτελεσματικά σε μη κινητούς δέκτες.

Επιπλέον, διαφορισμός μπορεί να εφαρμοστεί και στην εκπομπή (*transmit diversity*) με τη χρήση πολλαπλών κεραιών εκπομπής. Η πλέον δημοφιλής τεχνική είναι η χρήση δύο κεραιών εκπομπής και κατάλληλη προεπεξεργασία του προς μετάδοση σήματος .

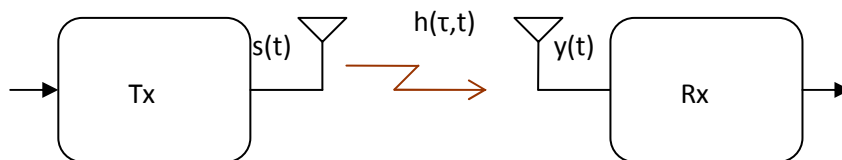
Τέλος, αξίζει να σημειώσουμε πως στη πράξη τα πλάτη των διαλείψεων δεν είναι εντελώς ανεξάρτητα, αλλά παρουσιάζουν κάποια συσχέτιση η οποία εξαρτάται από τον τύπο διαφορισμού που χρησιμοποιείται και από το περιβάλλον διάδοσης, με αποτέλεσμα το διαφορικό κέρδος να είναι μικρότερο από αυτό που θα προέκυπτε στην ιδανική περίπτωση των ανεξάρτητων καναλιών. Ωστόσο, για λόγους απλότητας, θα θεωρούμε στη συνέχεια ότι τα κανάλια είναι ανεξάρτητα και τα πλάτη των διαλείψεων ασυσχέτιστα. (Stüber,2001)

1.4. Ορισμοί των SISO, SIMO, MISO και MIMO καναλιών

Σε όλες τις προηγούμενες παραγράφους αναφερθήκαμε στο ασύρματο κανάλι μόνο ως μέσο διάδοσης, περιγράψαμε τα προβλήματα που προκαλεί στο διαδιδόμενο σήμα ενώ παρουσιάσαμε και τις υπό συνθήκες στατιστικές ιδιότητες που εμφανίζει. Ωστόσο το ραδιοκανάλι αποτελεί μέρος του καλούμενου ασύρματου συστήματος. Ένα ασύρματο σύστημα αποτελείται από τον πομπό, το δέκτη και φυσικά το ραδιοκανάλι. Αυτά τα συστήματα χωρίζονται σε ευρύτερες κατηγορίες ανάλογα με το πλήθος των εισόδων και των εξόδων τους. Ως είσοδοι και έξοδοι ενός ασύρματου συστήματος λαμβάνονται τα στοιχεία των στοιχειοκεραιών του πομπού και του δέκτη, ή ακόμη και οι διαφορετικές πολώσεις αυτών των κεραιών. Στη συνέχεια περιγράφονται οι κατηγορίες των συστημάτων SISO, MISO, SIMO και MIMO. (Gesbert,2003)

Σύστημα μιας εισόδου-μιας εξόδου (SISO)

Τα συστήματα SISO αποτελούν την πιο απλή μορφή τέτοιων συστημάτων και προϋποθέτουν μια απλή κεραία για πομπό και δέκτη όπως στο σχήμα 1.4. Η κρουστική απόκριση του καναλιού σε αυτή την περίπτωση, $h(\tau, t)$, αφορά στην πορεία του παλμού από την είσοδο στον περιοριστή του πομπού έως την έξοδό του από τον ολοκληρωτή του δέκτη. Γενικά $h(\tau, t)$ είναι η απόκριση του καναλιού τη χρονική στιγμή t σε κρουστικό παλμό που στάλθηκε τη χρονική στιγμή $t-\tau$.



Σχήμα 1.4: Υλοποίηση SISO καναλιού. Όπου Tx ο πομπός και Rx ο δέκτης.

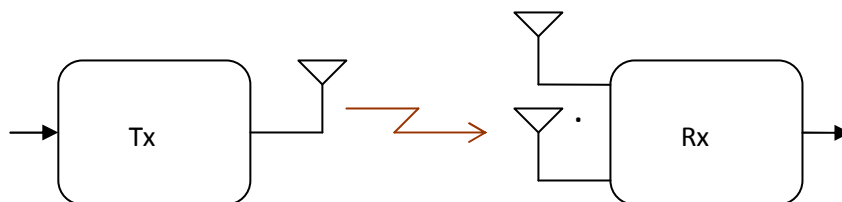
Αν το εκπεμπόμενο σήμα είναι το $s(t)$ τότε το λαμβανόμενο σήμα δίδεται από τη σχέση:

$$y(t) = h(\tau, t) \otimes s(t)$$

δηλαδή το αποτέλεσμα στο δέκτη δίνεται από τη συνέλιξη της κρουστικής απόκρισης του καναλιού και του εκπεμπόμενου σήματος.

Συστήματα μιας εισόδου- πολλαπλών εξόδων (SIMO)

Προκύπτουν με την εφαρμογή στοιχειοκεραίας στο δέκτη όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.5. : Υλοποίηση SIMO καναλιού

Ο πομπός στέλνει το σήμα μια φορά μέσω της απλής κεραίας του ενώ ο δέκτης λαμβάνει το ίδιο σήμα τόσες φορές όσες είναι και τα στοιχεία της στοιχειοκεραίας του. Έστω M_R ο αριθμός των στοιχείων της κεραίας του

δέκτη. Θεωρώντας την απλούστερη περίπτωση, που όπως θα αναλύσουμε με λεπτομέρεια παρακάτω, είναι αυτή κατά την οποία το SIMO σύστημα αντιμετωπίζεται ως M_R SISO κανάλια, το συνολικό SIMO κανάλι περιγράφεται από τον πίνακα:

$$\mathbf{h}(\tau, t) = [h_1(\tau, t) \ h_2(\tau, t) \dots h_{M_R}(\tau, t)]^T$$

Με $s(t)$ το εκπεμπόμενο σήμα, ο δέκτης των M_R στοιχείων λαμβάνει το $M_R \times 1$ διάνυσμα της μορφής:

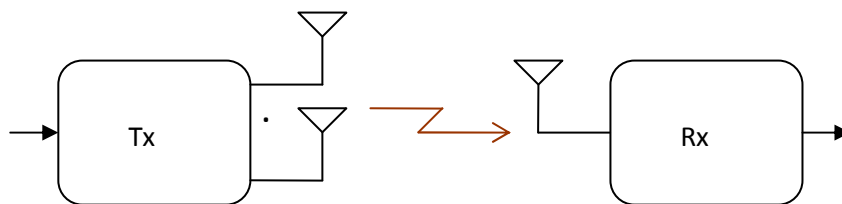
$$\mathbf{y}(t) = [y_1(t) \ y_2(t) \dots y_{M_R}(t)]^T$$

όπου $y_i(t)$ είναι το λαμβανόμενο σήμα από το i -οστό στοιχείο της κεραίας του. Το λαμβανόμενο λοιπόν σήμα θα δίδεται από τη σχέση:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{h}(\tau, t) \otimes s(t)$$

Συστήματα πολλαπλών εισόδων – μιας εξόδου (MISO)

Πρόκειται για συστήματα που χρησιμοποιούν στοιχειοκεραία στην πλευρά του πομπού ενώ ο δέκτης διαθέτει απλή κεραία όπως στο σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6. : Υλοποίηση MISO καναλιού

Έστω M_T ο αριθμός των στοιχείων της κεραίας του πομπού. Το σήμα στέλνεται ταυτόχρονα και από τα M_T στοιχεία ενώ ο δέκτης λαμβάνει ένα συνδυασμό αυτών. Θεωρώντας πάλι την απλή περίπτωση όπου το MISO

σύστημα λαμβάνεται ως M_T συστήματα SISO το κανάλι περιγράφεται από τον εξής πίνακα γραμμής:

$$\mathbf{h}(\tau, t) = [h_1(\tau, t) \ h_2(\tau, t) \dots h_{M_T}(\tau, t)]$$

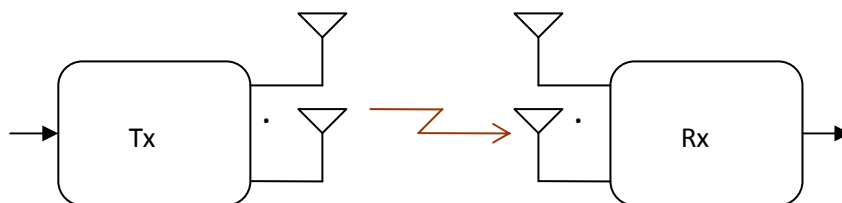
ενώ αν $s_j(t)$ είναι το σήμα που εκπέμπεται από το j -οστό στοιχείο του πομπού τότε το λαμβανόμενο σήμα από τον πομπό θα είναι:

$$y(t) = \sum_{j=1}^{M_T} h_j(\tau, t) \otimes s_j(t)$$

ή σε συμπυκνωμένη μορφή: $y(t) = \mathbf{h}(\tau, t) \otimes \mathbf{s}(t)$

Συστήματα πολλαπλών εισόδων – πολλαπλών εξόδου (MIMO)

Τα συστήματα αυτά προϋποθέτουν στοιχειοκεραίες και στην πλευρά του πομπού και στην πλευρά του δέκτη όπως στο σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.7: Υλοποίηση MIMO καναλιού

Υποθέτουμε M_T τα στοιχεία του πομπού και M_R τον αριθμό των στοιχείων του δέκτη. Ο πομπός στέλνει M_T σήματα ταυτόχρονα, τα οποία λαμβάνονται από κάθε ένα στοιχείο της κεραίας του δέκτη, άρα ο δέκτης λαμβάνει συνολικά $M_T \cdot M_R$ σήματα προς μετέπειτα επεξεργασία.

Το κανάλι σε αυτήν την περίπτωση δίδεται από τον $M_R \times M_T$ πίνακα \mathbf{H}

$$\mathbf{H}(\tau, t) = \begin{bmatrix} h_{1,1}(\tau, t) & h_{1,2}(\tau, t) & \dots & h_{1,M_T}(\tau, t) \\ h_{2,1}(\tau, t) & h_{2,2}(\tau, t) & \dots & h_{2,M_T}(\tau, t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M_R,1}(\tau, t) & h_{M_R,2}(\tau, t) & \dots & h_{M_R,M_T}(\tau, t) \end{bmatrix}$$

Τα στοιχεία του πίνακα \mathbf{H} είναι μιγαδικοί που αντιπροσωπεύουν την εξασθένιση και της ολίσθηση φάσης που εισάγει το κανάλι στο σήμα που φτάνει στο δέκτη με καθυστέρηση τ . Το στοιχείο h_{ij} του πίνακα αποτελεί τη συνάρτηση μεταφοράς από το j -οστό στοιχείο του πομπού στο i -οστό στοιχείο του δέκτη, ενώ ταυτόχρονα θεωρείται και ένα υποκανάλι διάδοσης από τα $M_T \cdot M_R$ που υπάρχουν συνολικά. Έτσι το λαμβανόμενο από το δέκτη σήμα θα είναι:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{H}(\tau, t) \otimes \mathbf{s}(t)$$

όπου τα $\mathbf{s}(t)$ και $\mathbf{y}(t)$ είναι τα διανύσματα αποστολής και λήψης διαστάσεων $M_T \times 1$ και $M_R \times 1$ αντίστοιχα.

1.5. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ MIMO

1.5.1. Εισαγωγή

Η τεχνολογία MIMO έχει προσελκύσει την προσοχή στις ασύρματες επικοινωνίες, δεδομένου ότι προσφέρει σημαντική αύξηση στην έξοδο δεδομένων και σειρά συνδέσεων χωρίς πρόσθετο εύρος ζώνης ή ισχύ μετάδοσης. Αυτό επιτυγχάνεται με την υψηλότερη απόδοση του φάσματος (περισσότερα bit ανά δευτερόλεπτο ανά hertz του εύρους ζώνης) και την αξιοπιστία ή την ποικιλομορφία των συνδέσεων (μειωμένη εξασθένιση). Λόγω αυτών των ιδιοτήτων, τα συστήματα MIMO είναι ένα κεντρικό θέμα της διεθνούς ασύρματης έρευνας αυτήν την περίοδο (2008). Οι πρώτες ιδέες για χρήση μιας τέτοιας τεχνολογίας αναφέρονται στην εργασία των A.R. Kaye, D.A. George (1970) και W. van Etten (1975, 1976). Ο Jack Winters και ο Jack Salz των εργαστηρίων Bell δημοσίευσαν διάφορα έγγραφα για σχετικές εφαρμογές το 1984 και το 1986. Το 1993 ο Arogyaswami Paulraj και ο Thomas Kailath πρότειναν την έννοια της χωρικής πολυπλεξίας για χρήση συστημάτων MIMO. Το αμερικάνικο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας υπ' αριθμό 5.345.599 που τους απένειμαν το 1994 για τη χωρική πολυπλεξία τόνωσε την εξέλιξη των ασύρματων μεταδόσεων.

Το 1996, ο Greg Raleigh και ο Gerard J. Foschini καθόρισαν νέες προσεγγίσεις στην τεχνολογία MIMO, οι οποίες μελετούσαν μια διαμόρφωση όπου οι πολλαπλές κεραιές εκπομπής συνδυάζονται σε ένα πομπό για να βελτιώσει τη αποτελεσματικότητα των συνδέσεων. Τα εργαστήρια Bell ήταν τα πρώτα που επέδειξαν ένα εργαστηριακό πρωτότυπο χωρικής πολυπλεξίας (SM) το 1998, όπου χωρική πολυπλεξία είναι μια κύρια τεχνολογία για να βελτιώσει την απόδοση των συστημάτων επικοινωνιών MIMO. Τα διάφορα ασύρματα δίκτυα υψηλών ταχυτήτων, που πλησιάζουν το 1 Gb/s όπως WPAN, WLAN, WMAN, κυψελοειδής, και τα οικιακά δίκτυα ήχου και εικόνας αναμένονται να εξοπλιστούν με συστήματα MIMO. Ο σχεδιασμός ασύρματων συστημάτων υψηλών ταχυτήτων που προσφέρουν καλή ποιότητα υπηρεσίας (QoS) και εκτενείς δυνατότητες μετάδοσης σε περιβάλλοντα χωρίς οπτική επαφή (non-line-of-sight) αποτελούν μια σημαντική πρόκληση έρευνας και εφαρμογής. Αγνοώντας την εξασθένηση στα χωρίς οπτική επαφή περιβάλλοντα, μπορούμε, σε γενικές γραμμές, να καλύψουμε την απαίτηση του 1Gb/s με απλής εκπομπής και λήψης ασύρματο σύστημα κεραιών (SISO) εάν το εύρος ζώνης συχνοτήτων και της φασματική αποδοτικότητα είναι της τάξης του 10⁹. Τεχνολογικά όμως εμπόδια και εμπόδια περιορισμών καθιστούν μια τέτοια λύση μη ελκυστική εάν όχι αδύνατη. Η χρήση των πολλαπλών κεραιών στο πομπό και στο δέκτη, γενικά γνωστή ως multiple-input multiple-output μετάδοση (MIMO) είναι μια νέα οικονομική και αποδοτική τεχνολογία που προσφέρει ουσιαστικά δυνατότητα παροχής 1Gb/s στις ασύρματες συνδέσεις. Οι καταναλωτικές ηλεκτρονικές αγορές τώρα πωλούν διάφορα WLAN εξοπλισμένα με AP/STAs MIMO. Τα διεθνή πρότυπα WMAN (WiMax) και κυψελοειδής (3GPP/3GPP2) έχουν δεχτεί να εφαρμόσουν υποχρεωτικά τεχνολογία MIMO στους σταθμούς βάσης. Η έρευνα της τεχνολογίας MIMO για WPAN ως η εκμετάλλευση του βαθμού ελευθερίας για πολλαπλούς χρήστες είναι σε αρχικό στάδιο. (Kühn,2006)

Επομένως, η επίδραση της τεχνολογίας MIMO στα οικονομικά φαίνεται απρόβλεπτα υψηλή, σημειώνοντας 7 τρισεκατομμύρια ασύρματες συσκευές για 70 δισεκατομμύρια ανθρώπους το 2017 ".

Αυτήν την περίοδο, τα WLANs προσφέρουν την μέγιστη ταχύτητα των 10 Mb/s και σύντομα θα αναβαθμιστεί σε 50-100 Mb/s. Εντούτοις, ακόμη και τα 50 Mb/s είναι ανεπαρκή όταν βρίσκεται αντιμέτωπο με την απαίτηση για υψηλότερες ταχύτητες πρόσβασης λόγω της αύξησης του

περιεχόμενου του δικτύου και τον ανταγωνισμό ενσύρματων συστημάτων LANs 10 Gb/s. Επιπλέον, μελλοντικά τα οικιακά δίκτυα εικόνας και ήχου θα απαιτήσουν πολλαπλάσια ταχύτητα για να υποστηρίξουν υψηλής ευκρίνειας τηλεοράσεις (HDTV), κοντά στο 1 Gb/s. Μια άλλη πρόκληση που αντιμετωπίζουν τα WLANs και τα οικιακά δίκτυα A/V όπως και τα υπαίθρια ασύρματα συστήματα δικτύων ευρείας περιοχής (WWAN) είναι η πρόσβαση χωρίς οπτική επαφή. Όπου η διάδοση προκαλεί τυχαίες διακυμάνσεις στο επίπεδο σημάτων, γνωστές ως εξασθένιση.

1.5.2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ MIMO –

Συστήματα Πολλαπλών Εισόδων Πολλαπλών Εξόδων

Οι απαιτήσεις σε χωρητικότητα για τα κινητά και ασύρματα τοπικά δίκτυα αυξάνονται με πολύ γρήγορους ρυθμούς τα τελευταία χρόνια. Η ανάγκη για ασύρματη πρόσβαση στο δίκτυο και χρήση εφαρμογών πολυμέσων απαιτούν μία αυξημένη ροή πληροφορίας. Οι ρυθμοί δεδομένων στα ασύρματα τοπικά δίκτυα περιορίζονται από διάφορα προβλήματα, όπως η ανάγκη κάλυψης μεγάλης περιοχής, πιθανές μετατοπίσεις του δέκτη και από τον περιορισμό του δυνατού εύρους χρήσης. Μία τεχνολογική καινοτομία που μπορεί να μας προσφέρει τους απαιτούμενους ρυθμούς δεδομένων είναι τα συστήματα πολλαπλών κεραιών.

Τα συστήματα πολλαπλών κεραιών μπορούν να οριστούν ως ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα, στο οποίο τόσο ο πομπός όσο και ο

δέκτης μπορούν να διαθέτουν πολλαπλές κεραιές. Η βασική ιδέα πίσω από τα συστήματα πολλαπλών κεραιών είναι ότι τα σήματα που μεταδίδονται από τις κεραιές του πομπού και λαμβάνονται από τις κεραιές του δέκτη, συνδυάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιώνεται σημαντικά η ποιότητα της επικοινωνίας, ή διαφορετικά ο ρυθμός σφάλματος δεδομένων (bit error rate BER).

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των συστημάτων πολλαπλών κεραιών αποτελεί η δυνατότητα που να μετατρέπουν το φαινόμενο της πολύδρομης μετάδοσης του σήματος, το οποίο αποτελεί κύριο πρόβλημα για τα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας, σε πλεονέκτημα. Ωστόσο, όπως συμβαίνει και στα ενσύρματα κανάλια, το μεταδιδόμενο σήμα υποβαθμίζεται κατά την μετάδοσή του από το τηλεπικοινωνιακό κανάλι. Το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης τελικά είναι διαβρωμένο από τον θερμικό θόρυβο και τη διασυμβολική παρεμβολή. Στην περίπτωση των ασύρματων συστημάτων πολλαπλών κεραιών, το φαινόμενο της παρεμβολής άλλων συμβόλων είναι ακόμα πιο έντονο. Αυτό διότι μαζί με τα σύμβολα των χρονικών καθυστερήσεων, υπάρχουν και τα σύμβολα των υπόλοιπων κεραιών που μπορούν να επηρεάσουν το λαμβανόμενο σήμα. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι οι απαιτήσεις στην περίπτωση των συστημάτων MIMO αυξάνονται παράλληλα με την αύξηση της

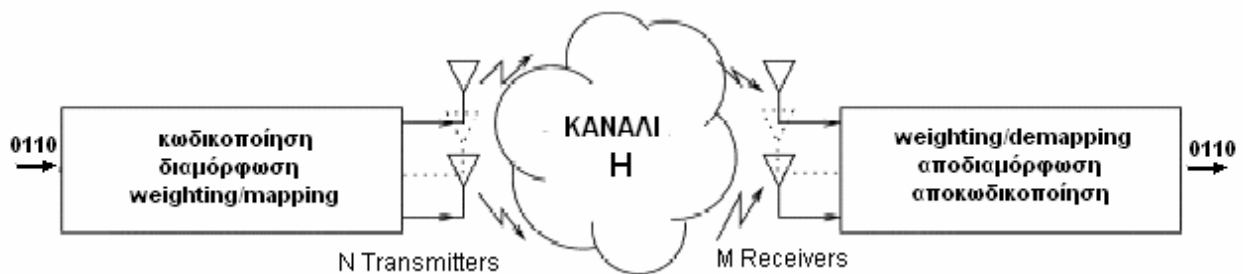
Τα συστήματα MIMO (Multiple input multiple output) μπορούμε να πούμε ότι θα αποτελέσουν απαίτηση του μέλλοντος όσον αφορά τις τηλεπικοινωνίες. Το διαθέσιμο φάσμα έχει ήδη κατανεμηθεί στους τηλεπικοινωνιακούς φορείς και στο άμεσο μέλλον αυτό δε θα επαρκεί για την κάλυψη των ολοένα αυξανόμενων εφαρμογών ευρείας ζώνης. Ήδη τα κινητά τρίτης γενιάς υποχρεούνται να διαθέτουν εφαρμογές πρόσβασης στο Internet, video on demand κ.λ.π. γεγονός που δηλώνει την απαίτηση για χωρητικότητες της τάξης των Mbps.

Το πρώτο βήμα στην εξέλιξη των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων πραγματοποιήθηκε με τις στοιχειοκεραίες οι οποίες επιτρέπουν μερική εκμετάλλευση της χωρικής διάστασης. Η προσπάθεια συνεχίστηκε με την είσοδο των συστημάτων έξυπνων κεραιών με δυναμικά μεταβαλλόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας, ωστόσο η αύξηση των χρηστών αλλά και απαιτητικές σε εύρος ζώνης εφαρμογές δυσχεραίνουν ολοένα και περισσότερο την ποιότητα (QoS) που προσφέρουν τα συστήματα αυτά

Τα συστήματα MIMO τα οποία βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο βασίζονται στις ευφρείς κεραίες. Ένα σύστημα MIMO μπορούμε να πούμε ότι αποτελείται από ένα πομπό, ένα δέκτη και ένα ραδιοκανάλι το οποίο όμως διαθέτει πολλαπλές εισόδους και εξόδους. Οι πολλαπλές αυτές εισοδοι και έξοδοι υλοποιούνται με κεραίες πολλαπλών στοιχείων τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη. Κάθε bit stream που πρόκειται να εκπεμφθεί από τον πομπό υπόκειται σε μια διαδικασία κωδικοποίησης, διαμόρφωσης και διαχωρισμού. Κάθε τμήμα του αρχικού bit stream πολλαπλασιάζεται με ένα κατάλληλο συντελεστή βάρους και αποδίδεται στο κατάλληλο στοιχείο της κεραίας του πομπού. Ακριβώς η αντίστροφη διαδικασία πραγματοποιείται στο δέκτη ώστε να προκύψει το αρχικό bit stream.

Πρωταρχικής σημασίας στα συστήματα MIMO είναι η κατάλληλη επιλογή όλων των διεργασιών που προηγούνται της εκπομπής και έπονται της λήψης. Ποιοι δηλαδή είναι οι κατάλληλοι αλγόριθμοι κωδικοποίησης, διαμόρφωσης και ανάθεσης έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η απόδοση της ασύρματης ζεύξης (Gesbert,2003).

Μια διαγραμματική απεικόνιση ενός MIMO συστήματος φαίνεται στο σχήμα 1.8.



Σχήμα 1.8 : Σύστημα MIMO με N εισόδους και M εξόδους. Πομπός και δέκτης διαθέτουν στοιχειοκεραίες με αντίστοιχο αριθμό στοιχείων.

Η απόδοση μιας ζεύξης συνίσταται κυρίως στη βελτιστοποίηση της χωρητικότητας (Bit Rate), της αξιοπιστίας (reliability), η οποία εκφράζεται κυρίως από το μέσο ρυθμό λαθών (average BER), και της πολυπλοκότητας (complexity) του συστήματος πομπού και δέκτη. Έτσι ο σχεδιασμός των λειτουργιών που προηγούνται της εκπομπής και έπονται της λήψης σε ένα MIMO σύστημα γίνεται με σκοπό να βελτιστοποιηθεί η απόδοση της ασύρματης ζεύξης.

Όσον αφορά στο Bit Rate, ο σκοπός είναι επιτευχθεί ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης συμβόλων ανά Herz. Το κριτήριο αυτό καλείται διαφορετικά και φασματική απόδοση του συστήματος. Η μέγιστη θεωρητική τιμή του bit rate υπολογίζεται υπό συνθήκες λευκού θορύβου ενώ δίδεται από τον τύπο του Shannon.

Δεύτερο κριτήριο για τη απόδοση μιας ζεύξης είναι η αξιοπιστία της. Εκφράζεται με το μέσο ρυθμό λαθών και αποτελεί ένα δείκτη για τη συμπεριφορά του συστήματος απέναντι στις διαλείψεις του χρονικά μεταβαλλόμενου καναλιού.

Τρίτο και τελευταίο κριτήριο για την απόδοση μιας ζεύξης είναι η **πολυπλοκότητα**. Συγκεκριμένα για την πολυπλοκότητα επειδή αυτή μεταφράζεται κυρίως με κατανάλωση ισχύος, επιθυμητό είναι να ισχύει μια μη συμμετρικότητα στην πολυπλοκότητα πομπού-δεκτή. Δηλαδή χαμηλή πολυπλοκότητα στη μεριά του κινητού το οποίο τροφοδοτείται με μπαταρία και αυξημένης πολυπλοκότητας λειτουργίες στη μεριά του σταθμού βάσης. Η ταυτόχρονη ωστόσο βελτιστοποίηση των τριών παραπάνω μεγεθών είναι σχεδόν πάντα αδύνατη με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε σε ένα αναγκαστικό tradeoff ανάμεσά τους κατά τη σχεδίαση του MIMO συστήματος. (Patzold,2008)

Η σχεδίαση των συστημάτων MIMO μπορεί να γίνει με δύο διαφορετικούς τρόπους. Στον πρώτο τρόπο ο πομπός γνωρίζει το κανάλι ενώ στο δεύτερο όχι. Για να γνωρίζει το κανάλι ο πομπός σε κάθε μετάδοση πρέπει να υπάρχει ένα κανάλι ανάδρασης που θα του παρέχει την πληροφορία. Αν και η γνώση του καναλιού στον πομπό έχει ως αποτέλεσμα την πιο αξιόπιστη μετάδοση, το κανάλι ανάδρασης καταναλώνει μέρος από το διαθέσιμο εύρος του συστήματος.

Συνοψίζοντας τη διαδικασία που ακολουθείται κατά την εκπομπή και τη λήψη μιας ακολουθίας bit (bit stream) σε ένα σύστημα MIMO μπορούμε να πούμε τα εξής: όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.3 μια ακολουθία από bits τροφοδοτεί ένα τμήμα του πομπού που περιλαμβάνει απλοποιημένες διεργασίες εκπομπής. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει διεργασίες κωδικοποίησης για τον έλεγχο και τη διόρθωση λαθών, διεργασίες αντιστοίχισης των bit πληροφορίας στα κατάλληλα διανύσματα σήματος τα οποία εν συνεχεία διαμορφώνονται σύμφωνα με τη διαδικασία διαμόρφωση που έχει επιλεγεί (QPSK, M-QAM, κ.λ.π

Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας παράγονται N ακολουθίες συμβόλων με κυμαινόμενο βαθμό ανεξαρτησίας μεταξύ τους, ακολουθίες πλήρως ασυσχέτιστες μεταξύ τους έως τελείως συσχετισμένες, κάθε μια από τις οποίες οδηγείται σε ένα στοιχείο της στοιχειοκεραίας του πομπού. Αν ο πομπός γνωρίζει το κανάλι τότε κάθε μια από τις ακολουθίες αυτές πολλαπλασιάζεται και με ένα γραμμικό συντελεστή που προκύπτει ύστερα από επεξεργασία της πληροφορίας που έχει ο πομπός για το κανάλι. Κάθε μια από τις ακολουθίες, ξεχωριστά, υπόκειται σε άνω μετατροπή συχνότητας, φιλτράρισμα και ενίσχυση και τελικά εκπέμπεται στο ασύρματο μέσο. (Συκάς, 1998)

1.5.3. Διαφορές των ευφύων κεραιών με τα συστήματα MIMO

Τα MIMO συστήματα στηρίχτηκαν αρχικά στην τεχνολογία που αναπτύχθηκε για τις έξυπνες κεραιές, αποτελούν όμως σήμερα ένα καινούριο πεδίο μελέτης που διαφοροποιείται σε αρκετά κρίσιμα σημεία.

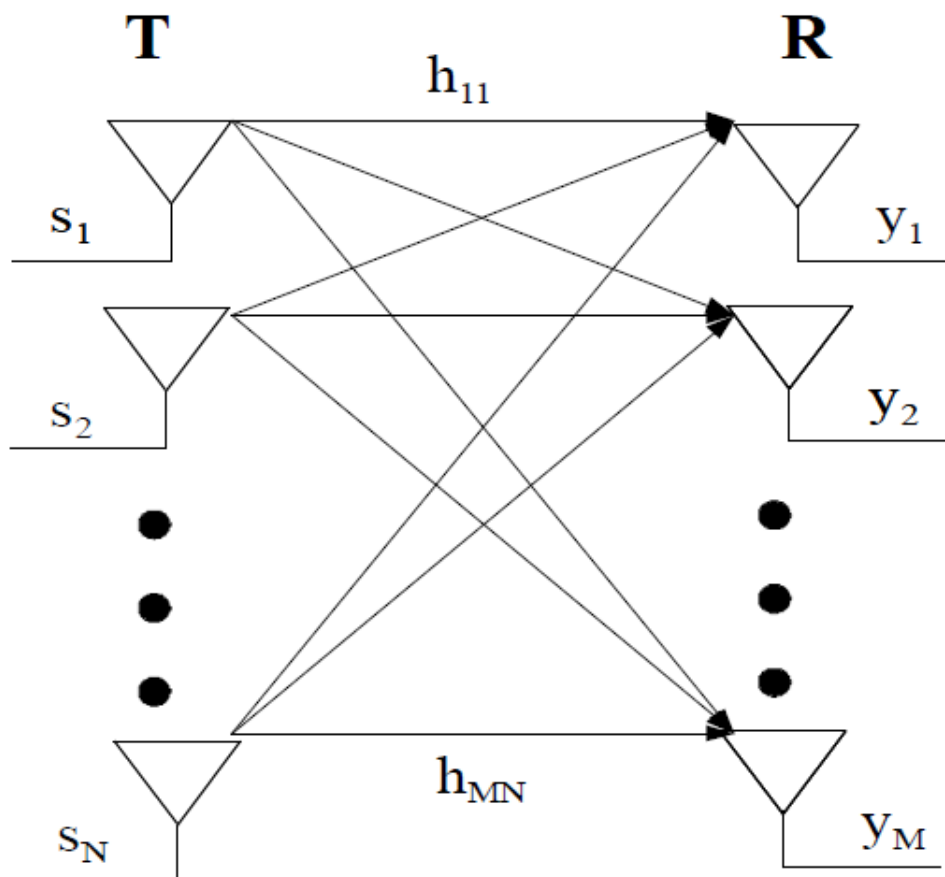
- Η σχεδίαση των συστημάτων ευφύων κεραιών απαιτεί κεραία πολλαπλών στοιχείων και γενικά πολύπλοκα συστήματα επεξεργασίας μόνο στη μεριά του σταθμού βάσης, περιορίζοντας στο ελάχιστο την πολυπλοκότητα του κινητού τερματικού. Τα MIMO συστήματα εν αντιθέσει, προϋποθέτουν στοιχειοκεραίες και στα δύο άκρα, καθώς και αλγόριθμους επεξεργασίας σε software και hardware.
- Οι αλγόριθμοι που έχουν σχεδιαστεί για τα συστήματα ευφύων κεραιών, σκοπό έχουν συνήθως να εξαλείψουν φαινόμενα όπως την πολύοδη διάδοση (multipath fading) και το delay spread. Αντίθετα τα συστήματα MIMO εξαρτούν την επιτυχημένη λειτουργία τους στην έντονη παρουσία αυτών των φαινομένων. Εκμεταλλεύονται δηλαδή φαινόμενα όπως το multipath fading και το delay spread, τα οποία είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία ανεξάρτητων μονοπατιών διάδοσης του σήματος. Στηρίζονται έτσι στην ανεξαρτησία τέτοιων καναλιών μεταξύ πομπού και δέκτη.

1.6. Πλεονεκτήματα των συστημάτων MIMO

Τα οφέλη που αποκομίζονται από την εφαρμογή ενός συστήματος MIMO αναδεικνύονται μέσω της σύγκρισης με το ισοδύναμο σύστημα SISO. Τα δύο συστήματα ορίζονται ως ισοδύναμα μεταξύ τους όταν η συνολική ισχύς που αποδίδεται στα σύμβολα προς μετάδοση σε κάθε περίοδο εκπομπής είναι ίδια για τα δύο συστήματα, δεσμεύουν ισοδύναμο εύρος ζώνης ραδιοσυχνοτήτων και λειτουργούν στο ίδιο περιβάλλον διάδοσης.

Επιπλέον, γίνεται η παραδοχή ότι η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου του δέκτη είναι μηδενική. Αυτό σημαίνει ότι οι βαθμίδες επεξεργασίας του δεν προσθέτουν επιπλέον θόρυβο στο σήμα λήψης. Επομένως, η επίδραση των κυκλωμάτων του δέκτη στο σηματοθορυβικό λόγο (Signal-to-Noise Ratio, SNR) δεν λαμβάνεται υπόψη.

Για την ευκολότερη ανάλυση των συστημάτων MIMO παρατίθεται το Σχήμα 1.9. όπου εικονίζονται όλες οι διαδρομές των σημάτων από τις N κεραιές εκπομπής προς τις M κεραιές λήψης. Ως διαδρομή ij μεταξύ μιας κεραιάς εκπομπής j και μιας κεραιάς λήψης i ορίζεται η νοητή πορεία που ακολουθεί κατά τη διάδοσή του το κύμα που εκπέμπεται από την κεραιά εκπομπής j και λαμβάνεται από την κεραιά λήψης i .



Σχήμα 1.9. : Σύστημα MIMO διαστάσεων $N \times M$

Τα οφέλη που αποκομίζονται από την εφαρμογή των συστημάτων MIMO έναντι των αντίστοιχων SISO αποτιμώνται μέσω των ακόλουθων μέτρων

- Κέρδος Διάταξης (Array Gain, AG)
 - Κέρδος Διαφορισμού ή Διαφορικό Κέρδος (Diversity Gain, DG)
 - Κέρδος Χωρικής Πολυπλεξίας (Spatial Multiplexing Gain, SMG)
- και αναλύονται εκτενώς στις επόμενες ενότητες.

1.6.1. Κέρδος Διάταξης

Στα σύγχρονα ψηφιακά συστήματα αποτελεί συνήθη τεχνική η προσάρτηση πλεονάζουσας πληροφορίας στον αρχικό συρμό δεδομένων (bitstream) με στόχο τη συσχέτιση των συμβόλων ώστε να μειωθεί η δυσχερής επίδραση του διαύλου στο συνολικό σήμα. Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής αποτιμάται μέσω του κέρδους κωδικοποίησης (Coding Gain, CG), το οποίο αναφέρεται στη μείωση του σηματοθορυβικού λόγου που απαιτείται για την επίτευξη της επιθυμητής πιθανότητας λανθασμένου ψηφίου (Bit Error Probability, BEP) στο δέκτη. Ωστόσο, τα συστήματα MIMO εκμεταλλεύονται την ανάπτυξη των σχημάτων χωροχρονικής κωδικοποίησης (Space-Time Coding, STC) για την περαιτέρω μείωση του απαιτούμενου σηματοθορυβικού λόγου. Το κέρδος διάταξης επιτυγχάνεται αξιοποιώντας τη διάταξη MIMO με κατάλληλη κατανομή των συμβόλων τόσο στις περισσότερες της μίας κεραίες εκπομπής όσο και σε περισσότερες χρονικές περιόδους ώστε να καταστεί η πληροφορία περισσότερο ανθεκτική σε ενδεχόμενες διαλείψεις που εισάγει ο δίαυλος. Πλέον, για την επίτευξη της ίδιας πιθανότητας λάθους, ο σηματοθορυβικός λόγος που απαιτείται για ένα σύστημα MIMO είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο του συστήματος SISO, καταλήγοντας στη μαθηματική διατύπωση του κέρδους διάταξης

$$AG = \frac{SNR_{SISO}}{SNR_{MIMO}},$$

Στην παραπάνω σχέση παρουσιάζεται ο σηματοθορυβικός λόγος του συστήματος SISO (MIMO) θεωρώντας ότι τα δύο συστήματα επιτυγχάνουν τον ίδιο βαθμό αξιοπιστίας όσον αφορά την πιθανότητα λανθασμένου συμβόλου.

Για την επίτευξη κέρδους διάταξης σε ένα σύστημα MIMO απαιτείται η γνώση των χαρακτηριστικών του διαύλου στο δέκτη ή και στον πομπό που έχουν σχέση με τις αποσβέσεις και τις διαλείψεις που ο δίαυλος εισάγει στα διαδιδόμενα κύματα. Ωστόσο, η απόκτηση γνώσης του διαύλου στον πομπό προϋποθέτει την ύπαρξη ζεύξης επιστροφής (reverse link), κάτι που καθιστά το σύστημα αρκετά πολύπλοκο. (Wennström, 2002)

1.6.2. Κέρδος Διαφορισμού

Ένα βασικό πρόβλημα που εμφανίζουν ορισμένοι τύποι τηλεπικοινωνιακών διαύλων είναι οι διαλείψεις. Οι διαλείψεις αναφέρονται στις τυχαίες μεταβολές της ισχύος των διαδιδόμενων κυμάτων, γεγονός που συνεπάγεται τη μεταβολή του πλάτους και της φάσης του σήματος λήψης. Ενώ στα συστήματα SISO οι διαλείψεις δυσχεραίνουν την ορθή αποκωδικοποίηση στο δέκτη, η τεχνολογία MIMO χρησιμοποιεί τις N·M εναλλακτικές διαδρομές που, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, προσφέρει ο δίαυλος για την αντιστάθμιση των διαλείψεων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται διαφορικό κέρδος για το σύστημα μέσω του κατάλληλου συνδυασμού των διαφορετικών αντιγράφων του σήματος που λαμβάνονται από τις κεραιές λήψης. Ωστόσο, η επίτευξη διαφορικού κέρδους εξαρτάται από το βαθμό ανεξαρτησίας των N·M διαδρομών. Υπό τον όρο ανεξάρτητες διαδρομές υποδηλώνεται η ύπαρξη διαφορετικής έκτασης διαλείψεων σε κάθε διαδρομή ώστε τα διάφορα σήματα λήψης να είναι μεταξύ τους ασυσχέτιστα. Για το σκοπό αυτό πρέπει οι κεραιές εκπομπής, όπως και οι κεραιές λήψης, να απέχουν αρκετά μεταξύ τους. Οι αποστάσεις αυτές είναι συνήθως 10λ για τις κεραιές εκπομπής και λ/2 για τις κεραιές λήψης υποθέτοντας την ύπαρξη πολλών σκεδαστών κοντά στις κεραιές λήψης [Κων08]. Το μέγιστο διαφορικό κέρδος επιτυγχάνεται όταν όλες οι δυνατές διαδρομές μεταξύ πομπού και δέκτη είναι πλήρως ανεξάρτητες και είναι ίσο με το γινόμενο των κεραιών N·M.

Από τα ανωτέρω γίνεται φανερό ότι το μέγεθος του διαφορικού κέρδους εξαρτάται από τον τρόπο συνδυασμού των διαφορετικών εκδοχών του σήματος στο δέκτη καθώς και από τον τύπο του διαύλου. Όσο περισσότερο ανεξάρτητες είναι οι εκδοχές του σήματος που λαμβάνει ο δέκτης τόσο μεγαλύτερο είναι το κέρδος διαφορισμού που επιτυγχάνεται. Έτσι, αυξάνεται ο σηματοθορυβικός λόγος στο δέκτη και μειώνεται η πιθανότητα λάθους κατά την αποκωδικοποίηση της πληροφορίας, εφόσον τα δυο μεγέθη συνδέονται μέσω της σχέσης:

$$BEP = D(SNR),$$

όπου είναι φθίνουσα συνάρτηση που εξαρτάται από το σχήμα διαμόρφωσης που έχει επιλεγεί.

Επιπλέον, η διαφορικότητα εμφανίζεται σε περιβάλλοντα τα οποία είναι πλούσια σε σκεδαστές (rich scattering). Αυτό οφείλεται στο γεγονός της ανεξαρτητοποίησης των εναλλακτικών διαδρομών λόγω της ύπαρξης σκεδαστών, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Συνεπώς, διαφορικό κέρδος επιτυγχάνεται σε αστικά περιβάλλοντα όπου είναι πιθανή η επιτυχής αποσυσχέτιση των σημάτων, ενώ σε ανοικτά περιβάλλοντα τα συστήματα MIMO έχουν ως στόχο την επίτευξη κέρδους διάταξης. Είναι φανερό ότι ο σχεδιαστής του συστήματος πρέπει να λάβει υπόψη του όλα τα χαρακτηριστικά του διαύλου ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη κάθε φορά τεχνολογία.

1.6.3. Σύγκριση Κέρδους Διαφορισμού και Κέρδους Διάταξης

Η επίτευξη των κερδών διαφορισμού και διάταξης οδηγεί σε μείωση του απαιτούμενου σηματοθορυβικού λόγου λήψης για την επίτευξη συγκεκριμένης πιθανότητας λάθους. Ωστόσο, τα δύο κέρδη επιδρούν με διαφορετικό τρόπο στο ποσοστό λανθασμένων συμβόλων (Symbol Error Ratio, SER) του δέκτη. Συγκεκριμένα:

$$\begin{aligned} SER(SNR) &= D(SNR + AG) \\ SER(SNR) &= D(F_{DG}(SNR)), \end{aligned}$$

όπου SNR είναι η προηγούμενη φθίνουσα συνάρτηση κατάλληλα τροποποιημένη ώστε να υπολογίζει το SER και είναι F_{dg} αύξουσα συνάρτηση για τον υπολογισμό της επίδρασης του διαφορικού κέρδους στην κλίση της καμπύλης.

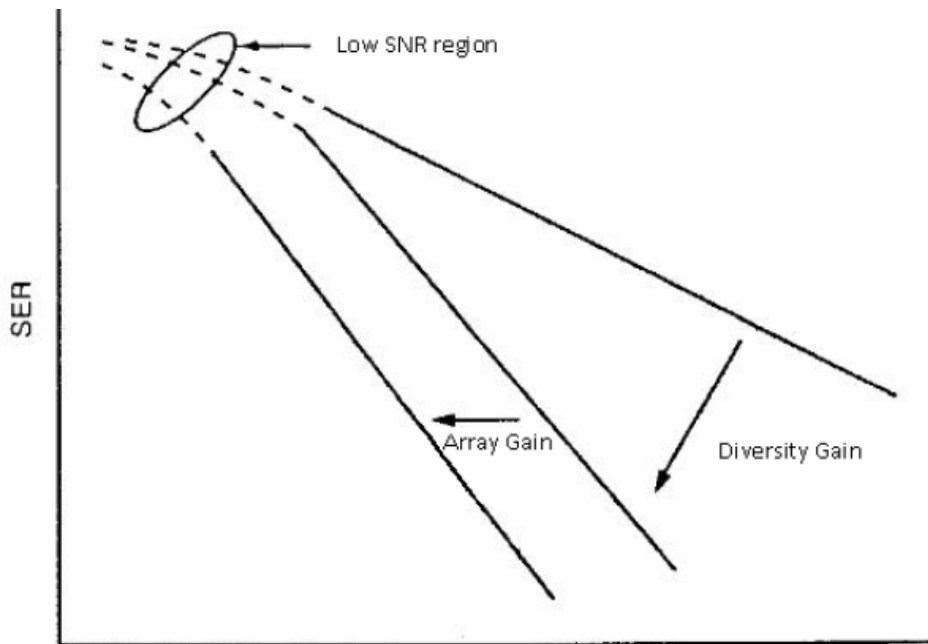
Η (2.3.β) καταδεικνύει το γεγονός ότι αύξηση του SNR προκαλεί αύξηση του διαφορικού κέρδους με συνέπεια την περαιτέρω μείωση του SER. Αντίθετα, από τη (2.3.α) συμπεραίνεται ότι το κέρδος διάταξης είναι ανεξάρτητο του SNR προκαλώντας παράλληλη ολίσθηση στην καμπύλη

SER(SNR) προς τα αριστερά. Τα ανωτέρω συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν από το Σχήμα 2.2, όπου απεικονίζεται η επίδραση των δύο κερδών στο SER(SNR). (Wennström,2002)

1.6.4. Κέρδος Χωρικής Πολυπλεξίας

Τα συστήματα MIMO προσφέρουν τη δυνατότητα αύξησης του ρυθμού μετάδοσης

δεδομένων αποστέλλοντας διαφορετικά σύμβολα ταυτόχρονα από τις περισσότερες της μίας κεραιές εκπομπής. Η αύξηση της χωρητικότητας στα συστήματα αυτά για το ίδιο εύρος ζώνης και την ίδια συνολική ισχύ εκπομπής σε σχέση με τα ομόλογα συστήματα SISO αποτιμάται μέσω του κέρδους χωρικής πολυπλεξίας (Spatial Multiplexing Gain, SMG). Για να επιτευχθεί το SMG πρέπει οι διαδρομές του σήματος να είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, όπως απαιτείται και για την επίτευξη διαφορικού κέρδους. Μάλιστα, όσο λιγότερο εξαρτημένες είναι μεταξύ τους οι $N \cdot M$ διαδρομές τόσο μεγαλύτερο είναι το κέρδος χωρικής πολυπλεξίας που επιτυγχάνεται. Το μέγιστο SMG είναι ίσο με το πλήθος των διαφορετικών ζευγών των κεραιών εκπομπής-λήψης, δηλαδή είναι ίσο με $\min(N,M)$. Ωστόσο, ακόμη και στην περίπτωση κατά την οποία παρατηρείται μερική συσχέτιση, επιτυγχάνεται κέρδος χωρικής πολυπλεξίας κάποιου βαθμού, αλλά όχι το μέγιστο.



Σχήμα 2.2: Επίδραση των κερδών διαφορισμού και διάταξης στο ποσοστό λανθασμένων συμβόλων $SER(SNR)$

1.6.5. Κέρδος Χωρικής Πολυπλεξίας

Τα συστήματα MIMO προσφέρουν τη δυνατότητα αύξησης του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων αποστέλλοντας διαφορετικά σύμβολα ταυτόχρονα από τις περισσότερες της μίας κεραιές εκπομπής. Η αύξηση της χωρητικότητας στα συστήματα αυτά για το ίδιο εύρος ζώνης και την ίδια συνολική ισχύ εκπομπής σε σχέση με τα ομόλογα συστήματα SISO αποτιμάται μέσω του κέρδους χωρικής πολυπλεξίας (Spatial Multiplexing Gain, SMG). Για να επιτευχθεί το SMG πρέπει οι διαδρομές του σήματος να είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, όπως απαιτείται και για την επίτευξη διαφορικού κέρδους. Μάλιστα, όσο λιγότερο εξαρτημένες είναι μεταξύ τους οι $N \cdot M$ διαδρομές τόσο μεγαλύτερο είναι το κέρδος χωρικής πολυπλεξίας που επιτυγχάνεται. Το μέγιστο SMG είναι ίσο με το πλήθος των διαφορετικών ζευγών των κεραιών εκπομπής-λήψης, δηλαδή είναι ίσο με $\min(N, M)$. Ωστόσο, ακόμη και στην περίπτωση κατά την οποία παρατηρείται μερική συσχέτιση, επιτυγχάνεται κέρδος χωρικής πολυπλεξίας κάποιου βαθμού, αλλά όχι το μέγιστο.

1.7. Τα συστήματα MIMO στο εμπόριο

Οι ασύρματες επικοινωνίες άρχισαν να γίνονται εμπορικά γνωστές στον αναπτυγμένο κόσμο στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Έκτοτε, η ανάπτυξή τους υπήρξε ραγδαία. Η κυψελωτή τηλεφωνία, η οποία λόγω της υποστήριξης της κινητικότητας των χρηστών εξαπλώθηκε τάχιστα, έφθασε να αριθμεί πάνω από 5 δισεκατομμύρια χρήστες μέχρι τα μέσα του 2010. Ωστόσο, τα κυψελωτά συστήματα δεν υπήρξαν τα μοναδικά ασύρματα συστήματα με μεγάλη διείσδυση στους καταναλωτές. Στις αρχές της δεκαετίας του 2000 οι ασύρματες προσωπικές επικοινωνίες ξεκίνησαν τη ραγδαία εξάπλωσή τους η οποία συνεχίζεται μέχρι και σήμερα. Έτσι, εξελιγμένα κινητά τηλέφωνα, φορητοί υπολογιστές, προσωπικοί ψηφιακοί βοηθοί (Personal Digital Assistants, PDAs) και πλήθος άλλων ασύρματων συσκευών αποτελούν μέρος της καθημερινότητας δισεκατομμυρίων ανθρώπων. Γίνεται, λοιπόν, κατανοητό ότι οι ασύρματες επικοινωνίες θα αποτελέσουν τις επόμενες δεκαετίες τομέα έντονου ενδιαφέροντος και μεγάλης ανάπτυξης. (Zajic, 2008)

Υπάρχουν τρεις κύριες περιοχές εφαρμογής των ασύρματων κινητών επικοινωνιών οι οποίες εμφανίζουν αξιοσημείωτη εξέλιξη και, συνεπώς, παρουσιάζουν μεγάλο σχεδιαστικό και ερευνητικό ενδιαφέρον

α) Η ασύρματη πρόσβαση σε δίκτυα για προσωπικές επικοινωνίες χαμηλών απαιτήσεων κινητικότητας

β) Τα κυψελωτά δίκτυα για επικοινωνίες υψηλών απαιτήσεων κινητικότητας

γ) Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα

Στον εμπορικό χώρο, η Iospan Wireless Inc. εμφάνισε το πρώτο εμπορικό σύστημα που χρησιμοποίησε την τεχνολογία mimo-OFDMA για περιβάλλοντα χωρίς άμεση οπτική επαφή. Η τεχνολογία Iospan υποστήριζε την ποικιλία κωδικοποίησης και την χωρική πολυπλεξία. Το σύστημα σχεδιάζεται για ένα κυψελοειδές σχέδιο με έναν παράγοντα επαναχρησιμοποίησης ίσο με δύο και παραδίδει μια μέγιστη φασματική αποδοτικότητα 12 b/s/Hz. Τα υπάρχοντα chipsets προσφέρουν 13-Mb/s σε ένα κανάλι 2 MHz.

Ενώ μελλοντικές καταβολές θα υποστηρίξουν 45 Mb/s σε ένα κανάλι 7 MHz. Το σύστημα στοχεύει στις σταθερές και στις χαμηλής κίνησης εφαρμογές με τα μεγέθη των κυττάρων να περιορίζονται στα 4 μίλια.

Στις κινητές επικοινωνίες, υπάρχει μια προσπάθεια κάτω από τη ITU να ενσωματωθούν οι τεχνικές MIMO στο κανάλι downlink μεγάλων πακέτων με σύνδεση (HSDPA), το οποίο είναι μέρος των καθολικών κινητών πρότυπων συστημάτων τηλεπικοινωνίας (UMTS). Η Lument Technologies ανήγγειλε πρόσφατα ένα τσιπ για MIMO εμπλουτισμένο με UMTS/HSDPA, αλλά δεν έχουν ανακοινώσει καμία περαιτέρω λεπτομέρεια. Οι προκαταρκτικές προσπάθειες είναι επίσης εν εξελίξει για να καθορίσουν μια επικάλυψη MIMO με τα IEEE 802.11 πρότυπα σε WLANs κάτω από την πρόσφατα διαμορφωμένη ασύρματη ομάδα επόμενης γενιάς (WNG). Με εξαίρεση το προϊόν της Iospan, οι άλλες προσπάθειες στην τεχνολογία MIMO αναμένονται να πάρουν τρία έως τέσσερα έτη για να φθάσουν σε θέση επέκτασης. Διάφορες επιχειρήσεις (η Beceem Communications, η Samsung, η Runicom Technologies κ.α.) ανέπτυξαν mimo- OFDMA λύσεις για IEEE 802.16e WIMAX ευρυζωνικά κινητά πρότυπα. Επίσης το 2006, διάφορες επιχειρήσεις (η Broadcom, η Intel.) είχαν τοποθετήσει μια λύση mimo-OFDM βασισμένη σε πρότυπα IEEE 802.11n για WiFi. Όλα τα επερχόμενα 4G συστήματα θα υιοθετήσουν επίσης την τεχνολογία MIMO.

Διάφορες ερευνητικές ομάδες έχουν αποδείξει πρωτότυπα πάνω από 1 Gbit/s. Στη IEEE διεθνή VTC το 2007 διάσκεψη (30 Σεπτεμβρίου έως τις 3 Οκτωβρίου 2007, ξενοδοχείο Harborplace, Βαλτιμόρη), περίπου 130 έγγραφα βασισμένα σε MIMO συστήματα, ή σε χωρική διαδικασία παρουσιάστηκαν μεταξύ 420 ολοκληρωμένων εγγράφων για υψηλής ποιότητας ασύρματη επικοινωνία. Αυτά τα περίπου 130 έγγραφα MIMO μεταχειρίζονται όχι μόνο την διαδικασία των κεραιών αλλά και τις διάφορες ασύρματες τεχνολογίες πέρα από τις διαμορφώσεις MIMO. Επίσης μέρος των εγγράφων περιελάμβαναν και πολλαπλών χρηστών συστήματα MIMO. Οι πολλαπλών χρηστών τεχνικές θεωρούν τους πολλαπλούς ενεργούς χρήστες ως βασική μονάδα των πολλαπλών στοιχείων επεξεργασίας ενώ τα πολλαπλά στοιχεία κεραιών εξετάζονται για τους ίδιους πόρους στην πολλαπλή κεραία MIMO.

Ορισμένοι κατασκευαστές βάζουν ήδη στην αγορά δρομολογητές WI-FI στους οποίους ενσωματώνουν την τεχνολογία MIMO. Μεταξύ αυτών η Belkin, με το δρομολογητή f5d8230-4, Trendnet, με access point tew-610APB, η D-Link με το δρομολογητή Di-634M, η Netgear με τον

δρομολογητή της WPNT834, και η Linksys με το δρομολογητή της WRT54GC.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΙΜΟ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σημαντικό αίτημα για την επιτυχή λειτουργία των συστημάτων είναι η δυνατότητα παροχής αξιόπιστων και όσο το δυνατόν ταχύτερων υπηρεσιών. Για Την επίτευξη του στόχου αυτό απαιτείται η αντιμετώπιση της επίδρασης του ασύρματου καναλιού στην ισχύ του μεταδιδόμενου σήματος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η επίδραση του καναλιού εξαρτάται από τη μορφολογία του περιβάλλοντος στο οποίο λειτουργεί το ασύρματο δίκτυο και της ικανής μεταβαλλόμενη και του δεκτή, η ακριβής γνώση της δεν είναι εφικτή. Για το λόγο αυτό, στην πράξη, η επίδραση του καναλιού μοντελοποιείται με χρήση στοχαστικών μοντέλων που χαρακτηρίζουν την επιρροή του καναλιού στην ισχύ του σήματος που φτάνει στον δεκτή. Με την οικεία των μοντέλων αυτήν εκφράζονται οι στοχαστικής ιδιότητες των αυξομειώσεων της ισχύος που προκαλεί το ασύρματο κανάλι στο εκπεμπόμενο σήμα.

Το αρνητικό με τα συστήματα ΜΙΜΟ ,για τα οποία έχει γίνει αναφορά στο προηγούμενο κεφάλαιο έγκειται στο γεγονός ότι, παρότι βέλτιστος, η μεγάλη πολυπλοκότητα του αποκωδικοποιητή μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum-likelihood, ML) τον καθιστά απαγορευτικό για χρήση σε πρακτικά συστήματα πολλαπλών κεραιών, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για μεγάλους αστερισμούς σήματος ι/και πολλής κεραιές εκπομπής και λήψης. Έτσι, παρουσιάζεται η ανάγκη για αποκωδικοποιητές υψηλής επίδοσης αλλά με χαμηλή πολυπλοκότητα.

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται οι απαραίτητοι όροι και αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ΜΙΜΟ. Επίσης, παρουσιάζεται ο

αλγόριθμος «σφαιρικού αποκωδικοποιητή» για την εύρεση του μικρότερου διανύσματος ανάμεσα στα διανύσματα ενός πλέγματος (lattice) και η πολυπλοκότητα του είναι πολυώνυμο της διάστασης του πλέγματος. Από τότε, ο σφαιρικός αποκωδικοποιητής παρουσιάστηκε ως η σχεδόν-βέλτιστη μέθοδος ανίχνευσης σε CDMA (code-division multiple-access) συστήματα και σε συστήματα που χρησιμοποιούν χώρο-χρονικούς κώδικες (space-time codes) κακής και σε συστήματα πολλαπλών κεραιών χωρίς κωδικοποίηση για παράδειγμα στην αρχιτεκτονική V-BLAST (Vertical Bell Labs Layered Space Time architecture).

Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, το βασικό μειονέκτημα του σφαιρικού αποκωδικοποιητή είναι ότι η επίδοση και η πολυπλοκότητα του αλγόριθμου εξαρτώνται άμεσα από την επιλογή της αρχικής ακτίνας της σφαίρας, ο ρόλος της οποίας θα αναπτυχτεί στη συνέχεια.

2.1 ΔΕΝΤΡΑ ΚΑΙ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ (TREE SEARCH)

2.1.1.Εισαγωγικές Έννοιες - Ορισμοί

Δέντρο είναι ένα σύνολο κόμβων (ίδιου τύπου) και ακμών που συνδέουν τους κόμβους, με βάση κάποια σχέση που δημιουργεί την ιεραρχική δομή των κόμβων. Ένας από τους κόμβους αποτελεί και την ρίζα του δέντρου. Η δομή του δέντρου αναδρομικά ορίζεται ως εξής:

Ένας κόμβος αποτελεί από μόνος του ένα δέντρο. Μάλιστα αυτός ο κόμβος αποτελεί και την ρίζα του δέντρου. Εάν n είναι ένας κόμβος και T_1, T_2, \dots, T_k είναι δέντρα με ρίζες n_1, n_2, \dots, n_k , αντίστοιχα, τότε μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα νέο δέντρο με κόμβο γονέα τον n των κόμβων n_1, n_2, \dots, n_k .

Έτσι, ο κόμβος n αποτελεί την ρίζα του νέου δέντρου, τα T_1, T_2, \dots, T_k τα υπο-δέντρα της ρίζας και οι κόμβοι n_1, n_2, \dots, n_k τα παιδιά του κόμβου n . 1. (Αφράτη, 1999).

Κενό είναι το δέντρο που δεν περιέχει καθόλου κόμβους και καμία ακμή.

Εσωτερικοί καλούνται οι κόμβοι στους οποίους μπορούν και να καταλήγουν αλλά και να ξεκινούν ακμές. Στην ρίζα δεν καταλήγουν ακμές. Οι κόμβοι στους οποίους μόνο καταλήγουν ακμές ονομάζονται φύλλα (ή και τερματικοί κόμβοι). Τα υποδέντρα σχηματίζονται αρκεί να θεωρήσουμε σαν ρίζα οποιονδήποτε κόμβο του δέντρου.

Εάν n_1, n_2, \dots, n_k είναι μια σειρά κόμβων ενός δέντρου τέτοια ώστε ο κόμβος n_i να είναι ο γονέας του n_{i+1} για $1 \leq i < k$ τότε η ακολουθία αυτή ονομάζεται διαδρομή (path) από τον n_1 κόμβο προς τον κόμβο n_k .

Μήκος (length) μίας διαδρομής ονομάζεται το σύνολο των περιεχομένων ακμών (που ισούται με το πλήθος των περιεχομένων κόμβων μείον ένα).

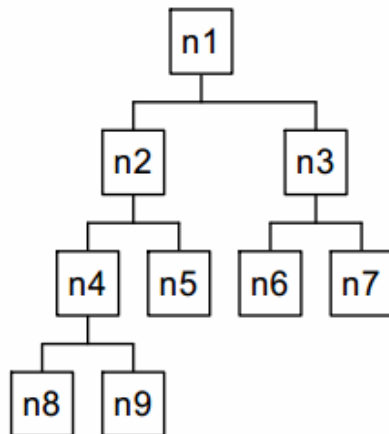
Ύψος (height) κόμβου ενός δέντρου είναι η μεγαλύτερη διαδρομή από τον κόμβο προς κάποιο φύλλο. Ύψος του δέντρου είναι το ύψος της ρίζας του. Τα φύλλα ενός δέντρου έχουν ύψος μηδέν.

Επίπεδο (level) ενός κόμβου είναι το μήκος της μοναδικής διαδρομής από την ρίζα προς αυτόν τον κόμβο. Η ρίζα κάθε δέντρου βρίσκεται στο μηδενικό επίπεδο. Ένα κενό δέντρο έχει ύψος -1 .

Βαθμός (degree) ενός κόμβου είναι το πλήθος των παιδιών του. Ειδικές κατηγορίες δέντρων αποτελούν τα δυαδικά δέντρα, τα τριαδικά δέντρα.

Διαδρομή από n_2 προς n_9 είναι η ακολουθία n_2, n_4, n_9 .

- Το μήκος της διαδρομής αυτής είναι 2.
- Φύλλα είναι τα n_8, n_9, n_5, n_6, n_7 .
- Το ύψος του δέντρου είναι 3 ενώ ύψος του κόμβου n_2 είναι 2 και του n_9 μηδέν.
- Ο βαθμός του κόμβου n_9 είναι μηδέν ενώ του κόμβου n_2 είναι 2.
- Επίπεδο του κόμβου n_2 είναι ένα και του n_9 είναι τρία.



Σχήμα 1: Δυαδικό δέντρο

2.1.2. Δυαδικά Δέντρα Αναζήτησης

Δυαδικό Δέντρο Αναζήτησης (binary search trees) είναι ένα δυαδικό δέντρο με κόμβους διατεταγμένους με τέτοιο τρόπο ώστε η τιμή του στοιχείου του κάθε κόμβου να είναι μεγαλύτερη από τις τιμές όλων των στοιχείων των κόμβων του αριστερού του υπό-δέντρου και μικρότερη από αυτές των στοιχείων του δεξιού του υπό-δέντρου.

Τέτοιο δέντρο αποτελεί το δέντρο του σχήματος 1. Βασικό πλεονέκτημα αυτής της δομής είναι ότι συνδυάζει γρήγορες αναζητήσεις ενώ παράλληλα επιτρέπει την εύκολη εισαγωγή και διαγραφή στοιχείων.

2.1.3. Αλγόριθμος Αναζήτησης:

Σύγκριση του στοιχείου της ρίζας με το υπό αναζήτηση στοιχείο. Εάν είναι ίσα τότε ο αλγόριθμος τελειώνει (επιτυχής αναζήτηση).

□ Εάν το υπό αναζήτηση στοιχείο είναι μεγαλύτερο τότε συνεχίζουμε με το δεξιό υπό-δέντρο αλλιώς με το αριστερό (θέτοντας σαν ρίζα την ρίζα του αριστερού ή δεξιού υπό-δέντρου αντίστοιχα). Το προηγούμενο βήμα επαναλαμβάνεται μέχρι ή να βρεθεί το στοιχείο ή την συνάντηση κενού υπό-δέντρου (ανεπιτυχής αναζήτηση).

2.2. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ ΣΤΑ ΔΕΝΤΡΑ

Οι αλγόριθμοι αναζήτησης σε δέντρα συνήθως κατηγοριοποιούνται (σύμφωνα με τις διάφορες στρατηγικές στις εξής κατηγορίες:

1. Breadth first (BF) (Πρώτα κατά πλάτος)

Μπορεί να καθορισθεί σταθερή πολυπλοκότητα.

2. Depth search (DF) (Πρώτα κατά βάθος)

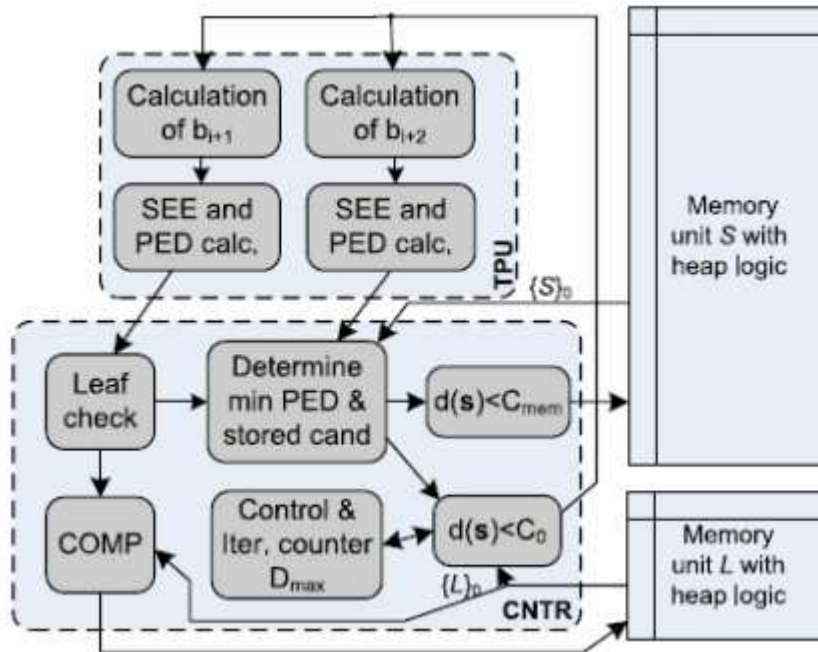
Είναι αποδοτικότερος του αλγορίθμου «πρώτα κατά πλάτος» , από άποψη του αριθμού των κόμβων του δέντρου και της πολυπλοκότητας.

3. Metric-first (MF): Είναι βέλτιστος , από την σκοπιά των επισκεπτόμενων κόμβων του δέντρου και της μεταβλητότητας της πολυπλοκότητας. Οι επισκεπτόμενοι κόμβοι θα πρέπει να διατηρούνται σε σειρά προτεραιότητας ώστε να εξασφαλίζεται η βελτιστοποίηση. Απαιτείται οι κόμβοι να αποθηκεύονται στην μνήμη. (Markus, 2010)

2.2.1. Modified METRIC-FIRST METHOD

Βασίζεται πάνω στον γνωστό αλγόριθμο Dijkstra's algorithm

Παρακάτω παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του αλγορίθμου Metric-First:



Σχήμα 2 : Η αρχιτεκτονική του αλγορίθμου MMF-LSD

2.2.2. Αλγόριθμος Breadth-First

Είναι ένας από τους αλγόριθμους που δεν παρουσιάζει μεγάλη πολυπλοκότητα. Ξεκινώντας από έναν συγκεκριμένο δικτυακό τόπο ακολουθεί τους δεσμούς υπερκειμένου που συναντά σε κάθε τόπο. Επομένως, οι σελίδες προσπελούνται με τη σειρά με την οποία ανακαλύπτονται από τον πράκτορα αναζήτησης.

Η στρατηγική που ακολουθεί ο αλγόριθμος Breadth-First είναι αρκετά αποτελεσματική καθώς ανακαλύπτει σελίδες υψηλής-ποιότητας από τις πρώτες κιόλας προσπελάσεις. Έχει αποδειχθεί όμως, ότι η μέση ποιότητα των σελίδων μειώνεται καθώς αυξάνει η διάρκεια της αναζήτησης. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η αναζήτηση που στηρίζεται στον αλγόριθμο Breadth-First είναι αρκετά αποδοτική διότι οι πιο σημαντικές ιστοσελίδες ανακαλύπτονται από την αρχή, ανεξάρτητα από τον δικτυακό τόπο από τον οποίο ξεκινά ο πράκτορας αναζήτησης.

Ο αλγόριθμος αναζήτησης πρώτα σε πλάτος (*Breadth First Search - BFS*) εξετάζει πρώτα τις καταστάσεις που βρίσκονται στο ίδιο βάθος και μόνον όταν τις εξετάσει όλες συνεχίζει στην επέκταση καταστάσεων στο αμέσως επόμενο επίπεδο. Η αναζήτηση μοιάζει να προχωρά κατά κύματα, όπου το πρώτο κύμα είναι οι καταστάσεις του πρώτου επιπέδου του δένδρου, το δεύτερο κύμα οι καταστάσεις του δεύτερου επιπέδου. (Najork, 2001)

Περιγραφικά ο αλγόριθμος είναι ο εξής:

- 1. Βάλε την αρχική κατάσταση στο μέτωπο της αναζήτησης.**
- 2. Αν το μέτωπο της αναζήτησης είναι κενό τότε σταμάτησε.**
- 3. Βγάλε την πρώτη κατάσταση από το μέτωπο της αναζήτησης.**
- 4. Αν είναι η κατάσταση μέλος του κλειστού συνόλου τότε πήγαινε στο βήμα 2.**
- 5. Αν η κατάσταση είναι μία τελική τότε ανέφερε τη λύση.**
- 6. Αν θέλεις και άλλες λύσεις πήγαινε στο βήμα 2. Αλλιώς σταμάτησε.**
- 7. Εφάρμοσε τους τελεστές μεταφοράς για να βρεις τις καταστάσεις-παιδιά.**
- 8. Βάλε τις καταστάσεις-παιδιά στο τέλος του μετώπου της αναζήτησης.**
- 9. Βάλε την κατάσταση-γονέα στο κλειστό σύνολο.**
- 10. Πήγαινε στο βήμα 2.**

Η διαφορά του αλγορίθμου BFS (*Breadth First Search*) από τον αλγόριθμο DFS (*Depth First Search*) εντοπίζεται στην περιγραφή του καθενός. Και συγκεκριμένα σε μία μόνο λέξη, "τέλος" αντί "αρχή". Εδώ το μέτωπο της αναζήτησης είναι μια δομή ουράς (*Queue FIFO*, δηλαδή *First In First Out*) και όχι στοίβας, ποτέ δεν επεκτείνεται μία κατάσταση αν δεν επεκταθούν πρώτα όλες οι καταστάσεις που βρίσκονται σε μικρότερο βάθος, γιατί απλά οι τελευταίες μπήκαν στο μέτωπο της αναζήτησης νωρίτερα.

Βασικό πλεονέκτημα του αλγορίθμου αναζήτησης πρώτα σε πλάτος (*BFS - Breadth First Search*) είναι ότι βρίσκει πάντα την καλύτερη λύση (μικρότερη σε μήκος). Είναι πλήρης, δηλαδή θα βρει λύση σε κάποιο πρόβλημα, αν τέτοια υπάρχει. Σε μία ακραία περίπτωση, όταν δηλαδή ένα δένδρο αναζήτησης έχει άπειρο πλάτος, (υπάρχουν άπειροι τελεστές που εφαρμόζονται σε μία κατάσταση), τότε ο BFS έχει πρόβλημα στην ανάπτυξη

του δένδρου αναζήτησης. Τέτοιου είδους προβλήματα όμως είναι σπάνια και για αυτό ο BFS (Breadth First Search) θεωρείται δίκαια πλήρης.

2.2.3. Αλγόριθμος Depth first

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο Depth First , ο πράκτορας αναζήτησης προσπελαύνει τον πρώτο δεσμό υπερκειμένου που συναντά σε κάθε σελίδα, συνεχίζοντας διαδοχικά με τον ίδιο τρόπο στην επόμενη και επιστρέφει περιοδικά. Η αναζήτηση που στηρίζεται στον παραπάνω απλό αλγόριθμο είναι αρκετά περιορισμένη αλλά πραγματοποιείται σε βάθος.

Όπως φανερώνει η ονομασία του αλγορίθμου πρώτα σε βάθος (Depth-First Search- DFS), η αναζήτηση επιλέγει προς επέκταση την κατάσταση που βρίσκεται πιο βαθιά στο δένδρο. Στην περίπτωση που υπάρχουν περισσότερες από μία καταστάσεις στο ίδιο βάθος ο DFS επιλέγει τυχαία μία από αυτές και για ευκολία θεωρείται ότι επιλέγεται η αριστερότερη. (Ιστότοπος¹)

Ο αλγόριθμος DFS περιγράφεται ως εξής:

1. **Βάλε την αρχική κατάσταση στο μέτωπο της αναζήτησης.**
2. **Αν το μέτωπο της αναζήτησης είναι κενό τότε σταμάτησε.**
3. **Βγάλε την πρώτη κατάσταση από το μέτωπο της αναζήτησης.**
4. **Αν είναι η κατάσταση μέλος του κλειστού συνόλου τότε πήγαινε στο δεύτερο βήμα.**
5. **Αν η κατάσταση είναι μία από τις τελικές, τότε ανέφερε τη λύση.**
6. **Αν θέλεις και άλλες λύσεις πήγαινε στο βήμα 2. Αλλιώς σταμάτησε.**
7. **Εφάρμοσε τους τελεστές μετάβασης για να βρεις τις καταστάσεις-παιδιά.**
8. **Βάλε τις καταστάσεις-παιδιά στην αρχή του μετώπου της αναζήτησης.**
9. **Βάλε την κατάσταση-γονέα στο κλειστό σύνολο.**
10. **Πήγαινε στο βήμα 2.**

Το μέτωπο της αναζήτησης είναι μια δομή στοίβας (Stack LIFO - Last In First Out), δηλαδή οι νέες καταστάσεις τοποθετούνται πάντα στην αρχή της στοίβας και η αναζήτηση συνεχίζεται με μία από αυτές. Το βασικό μειονέκτημα του αλγορίθμου αναζήτησης πρώτα σε βάθος (Depth - First Search - DFS) είναι ότι δεν εγγυάται ότι η πρώτη λύση που θα βρεθεί είναι η βέλτιστη (μονοπάτι με το μικρότερο μήκος ή με μικρότερο κόστος). Επίσης, αν δεν υπάρχει έλεγχος βρόχων ή αν ο χώρος αναζήτησης είναι μη πεπερασμένος, ο αλγόριθμος DFS μπορεί να μπλεχτεί σε κλαδιά μεγάλου μήκους ή ατέρμονα κλαδιά του δένδρου (κλαδιά με άπειρο μήκος).

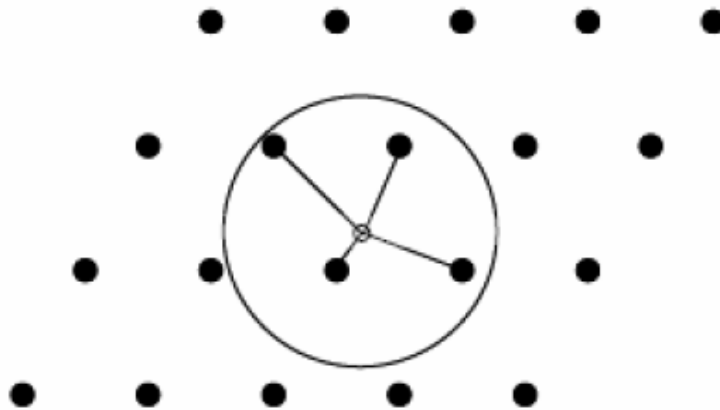
Ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να μη βρει ποτέ μια τελική κατάσταση αν και μπορεί να περάσει από πολύ κοντά της. Συνεπώς, ο DFS εν γένει θεωρείται ατελής. Στις περιπτώσεις όμως που ο χώρος αναζήτησης είναι πεπερασμένος και χρησιμοποιείται

2.3. Αλγόριθμος Σφαιρικού Αποκωδικοποιητή (Sphere Decoder) – (NEAR MAXIMUM LIKELIHOOD)

Ο σφαιρικός αποκωδικοποιητής (sphere decoder) είναι ένας ML αποκωδικοποιητής, δηλαδή χρησιμοποιεί το κριτήριο μέγιστης πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood criterion - ML criterion). Λύνει το πρόβλημα της εύρεσης του κοντινότερου, στο λαμβανόμενο σημείο, σημείου ενός πλέγματος (lattice). Στηρίζεται στον αλγόριθμο Finke – Rohst ο οποίος απαριθμεί όλα τα σημεία ενός πλέγματος μέσα σε μία σφαίρα με κέντρο την αρχή των αξόνων του συστήματος. Προσαρμόζοντας τον κατάλληλα, προκύπτει ο αποκωδικοποιητής που κα αναπτύξουμε στη συνέχεια και ο οποίος δουλεύει με τη χρήση πλέγματος (Albert, 2002)

Η αποδοτικότητα του σφαιρικού αποκωδικοποιητή οφείλεται στο γεγονός ότι η αναζήτηση δε γίνεται ανάμεσα σε όλα τα σημεία του αστερισμού του σήματος, παρά μόνο στα σημεία του πλέγματος, τα οποία βρίσκονται στο εσωτερικό μιας σφαίρας ακτίνας \sqrt{C} με κέντρο το λαμβανόμενο σημείο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1. Στην ανάλυση που κα ακολουθήσει, κα ήταν χρήσιμο να σκεφτούμε το πλέγ \mathbb{Z}^n . Λ ως το αποτέλεσμα ενός γραμμικό μετασχηματισμού του βασικού πλέγματος, ο

οποίος μετασχηματισμός ορίζεται από τον πίνακα $M: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$. Έτσι το μπορεί να κερωθεί ως μία "λοξή" εκδοχή του πλέγματος.



Σχήμα 3 : Σφαίρας ακτίνας \sqrt{c} γύρω το λαμβανόμενο σημείο

Θεωρητική Ανάλυση

Το προς επίλυση πρόβλημα είναι :

$$\min_{x \in \Lambda} \|r - x\|^2 = \min_{w \in r - \Lambda} \|w\|^2$$

Δηλαδή ανακτούμε το μικρότερο διάνυσμα w μετασχηματισμένο πλέγμα $r - \Lambda$ - διαστάσεων Ευκλείδειου χώρου.

Ισχύει :

$$x = Mu, u \in \mathbb{Z}^n \quad r = \rho M, \rho = [\rho_1, \dots, \rho_n] \in \mathbb{R}^n$$

Και

$$\mathbf{w} = \xi M, \xi = [\xi_1, \dots, \xi_n] \in \mathbb{R}^n$$

Θεωρούμε $\mathbf{w} = \sum_{i=1}^n \xi_i \mathbf{v}_i$, όπου τα \mathbf{v}_i είναι τα διανύσματα βάσης και τα $\xi_i = \rho_i - u_i, i = 1, \dots, n$ ορίσουν τους μετασχηματισμένους άξονες συντεταγμένων του νέου πλέγματος. Η σφαίρα ακτίνας \sqrt{c} , αφού το κέντρο της οριστεί να είναι το λαμβανόμενο σημείο, μετατρέπεται σε έλλειψη με κέντρο την αρχή των αξόνων του νέου συστήματος συντεταγμένων που ορίζεται από το c . Οπότε:

$$\|\mathbf{w}\|^2 = Q(\xi) = \xi M M^T \xi^T = \xi G \xi^T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n g_{ij} \xi_i \xi_j \leq C,$$

όπου ο πίνακας $G = M M^T$ Gram. Εφαρμόζοντας την παραγοντοποίηση Cholesky παίρνουμε $G = R^T R$, όπου R ο είναι άνω τριγωνικός πίνακας.

Τότε:

$$Q(\xi) = \xi R^T R \xi^T = \|R \xi\|^2 = \sum_{i=1}^n \left(r_{ii} \xi_i + \sum_{j=i+1}^n r_{ij} \xi_j \right)^2 \leq C.$$

Αντικαθιστώντας:

$$q_{ii} = r_{ii}^2, i = 1, \dots, n \text{ και } q_{ij} = -r_{ij}^2/r_{ii}, i = 1, \dots, n, j = i + 1, \dots, n$$

$$Q(\xi) = \sum_{i=1}^n q_{ii} \left(\xi_i + \sum_{j=i+1}^n q_{ij} \xi_j \right)^2 = \sum_{i=1}^n q_{ii} U_i^2 \leq C,$$

όπου το νέο σύστημα συντεταγμένων που ορίζεται από τα

$$U_i = \xi_i + \sum_{j=i+1}^n q_{ij} \xi_j, i = 1, \dots, n$$

καθορίσει την έλλειψη στην κανονικοποιημένη της μορφή. Ξεκινώντας από το U_n πηγαίνοντας προς τα πίσω, βρίσκουμε τις σχέσεις για τα όρια του ελλειψοειδούς που πρόκυψε από τον κύκλο ακτίνας \sqrt{C} . Αυτά είναι

$$-\sqrt{\frac{C}{q_{nn}}} \leq U_n \leq \sqrt{\frac{C}{q_{nn}}}$$

$$-\sqrt{\frac{C - q_{nn}U_n}{q_{n-1,n-1}}} \leq U_{n-1} \leq \sqrt{\frac{C - q_{nn}U_n}{q_{n-1,n-1}}}$$

⋮

Τα αντίστοιχα όρια για τα U_i και ξ_i , τα οποία πρέπει να είναι ακραίοι αριθμοί, υπολογίζονται αντικαθιστώντας τα με U_i , οπότε

$$\left[-\sqrt{\frac{C}{q_{nn}}} + \rho_n \right] \leq u_n \leq \left[\sqrt{\frac{C}{q_{nn}}} + \rho_n \right]$$

$$\left[-\sqrt{\frac{C - q_{nn}\xi_n^2}{q_{n-1,n-1}}} + \rho_{n-1} + q_{n-1,n} + \xi_n \right] \leq u_{n-1}$$

$$\leq \left[\sqrt{\frac{C - q_{nn}\xi_n^2}{q_{n-1,n-1}}} + \rho_{n-1} + q_{n-1,n} + \xi_n \right]$$

όπου το $\lfloor x \rfloor$ δηλώνει τον μικρότερο ακέραιο που είναι μεγαλύτερος από το x και το $\lceil x \rceil$ τον μεγαλύτερο ακέραιο που είναι μικρότερος από το x . Έτσι, για την i -στη συντεταγμένη του διανύσματος U προκύπτει:

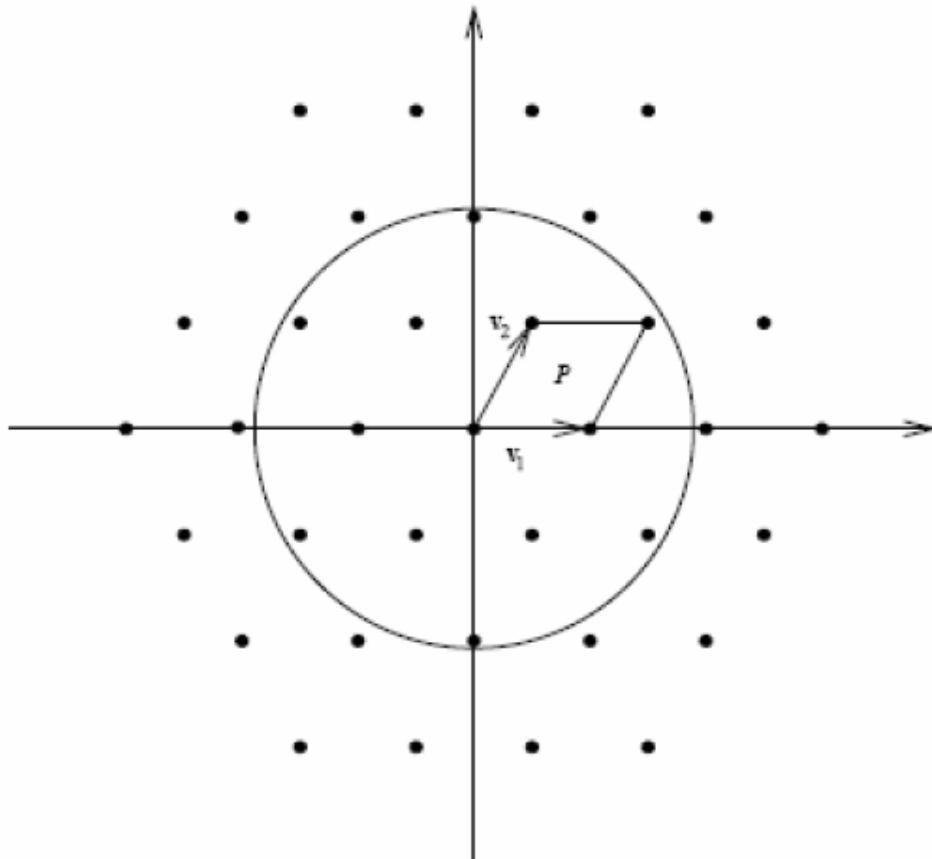
$$\left[-\sqrt{\frac{1}{q_{ii}} \left(C - \sum_{l=i+1}^n q_{ul} \left(\xi_l + \sum_{j=l+1}^n q_{lj} \xi_j \right)^2 \right)} + \rho_i + \sum_{j=i+1}^n q_{ij} \xi_j \right] \leq u_i$$

$$\leq \left[\sqrt{\frac{1}{q_{ii}} \left(C - \sum_{l=i+1}^n q_{ul} \left(\xi_l + \sum_{j=l+1}^n q_{lj} \xi_j \right)^2 \right)} + \rho_i + \sum_{j=i+1}^n q_{ij} \xi_j \right]. \quad (3.8)$$

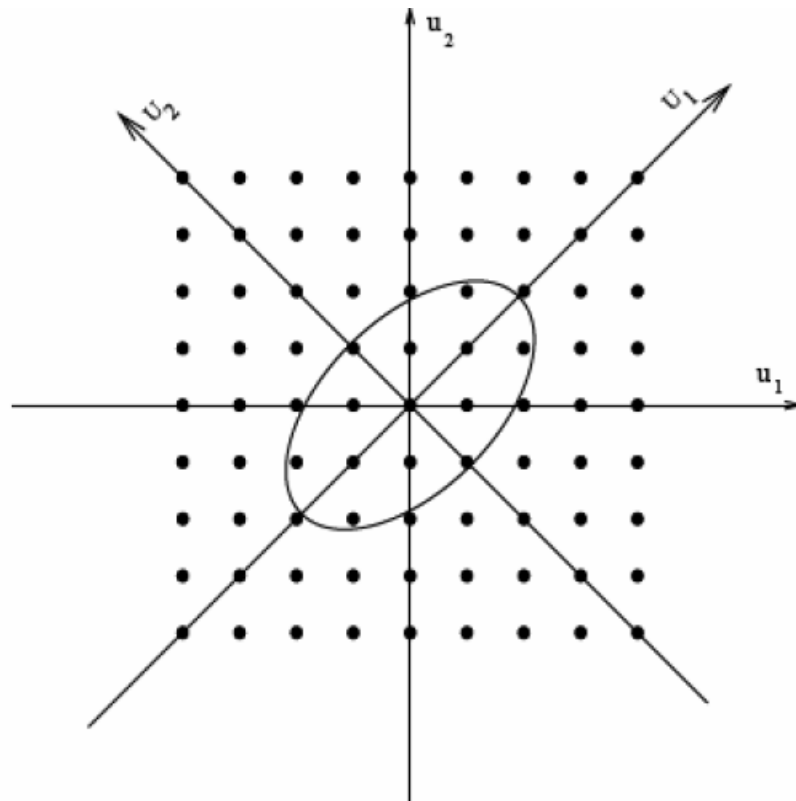
Μία γεωμετρική αναπαράσταση των τριών βασικών βημάτων του αλγόριθμου του σφαιρικού αποκωδικοποιητή, δίνεται στα **σχήματα 4, 5,**

Τα βήματα αυτά είναι :

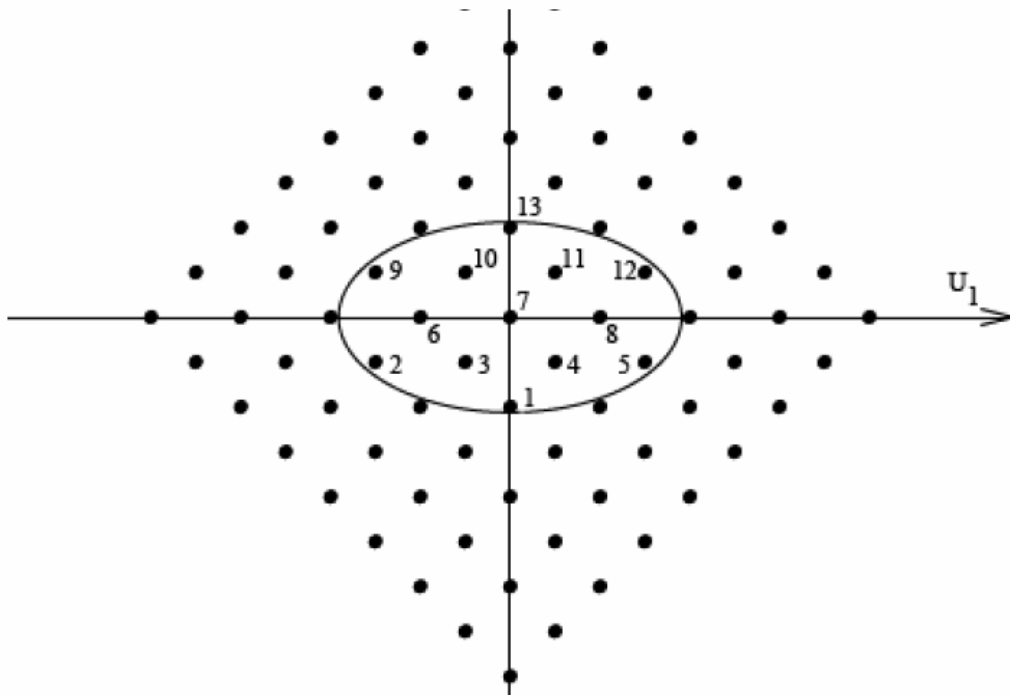
1. Ως κέντρο της σφαίρας ορίζεται το λαμβανόμενο σημείο οπότε η σφαίρα περιέχει τα σημεία του πλέγματος ανάμεσα στα οποία και θα γίνει η αναζήτηση , **σχήμα 4**.
2. Η σφαίρα μετασχηματίζεται σε έλλειψη στο νέο ακραίο πλέγμα (\mathbb{Z}^n πλέγμα), **σχήμα 5**
3. Η στροφή του νέου συστήματος συντεταγμένων, που ορίζεται από τα U_i , επιτρέπει την απαρίθμηση των σημείων του \mathbb{Z}^n πλέγματος. Η αναζήτηση των σημείων μέσα στην έλλειψη γίνεται από κάτω προς τα πάνω και από αριστερά προς τα δεξιά, όπως φαίνεται και στο **σχήμα 6**,



Σχήμα 4: Η σφαίρα, με κέντρο το λαμβανόμενο σημείο, περιλαμβάνει τα σημεία στα οποία θα γίνει η αναζήτηση



Σχήμα 5 : Η σφαίρα μετασχηματίζεται σε έλλειψη στο νέο ακραίο πλέγμα



Σχήμα 6 : Η στροφή του νέου συστήματος συντεταγμένων επιτρέπει

την απαρίθμηση των σημείων του πλέγματος

Ο εντοπισμός των σημείων του πλέγματος μέσα στη σφαίρα γίνεται ανακτώντας τις δυνατές τιμές για κάθε συντεταγμένη τους, δηλαδή για κάθε συντεταγμένη του διανύσματος, ξεκινώντας από τη μεγαλύτερη διάσταση. Κάθε φορά που προχωράμε στην προηγούμενη συντεταγμένη, τα όρια μάζα στα οποία γίνεται η αναζήτηση ανανεώνονται σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις

$$S_{i-1} = S_{i-1}(\xi_i, \dots, \xi_n) = \rho_{i-1} + \sum_{l=i}^n q_{i-1,l} \xi_l$$

$$T_{i-1} = T_{i-1}(\xi_i, \dots, \xi_n) = C - \sum_{l=i}^n q_{ll} \left(\xi_l + \sum_{j=l+1}^n q_{lj} \xi_j \right)^2 = T_i - q_{ii} (S_i - u_i)^2.$$

Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι ο αλγόριθμος δεν ελέγχει διανύσματα με μέτρο μεγαλύτερο από τη δοθείσα ακτίνα της σφαίρας. Κάθε διάνυσμα που ελέγχεται απαιτεί τον υπολογισμό του μέτρου του, το οποίο συνεπάγεται πολλαπλασιασμούς και $n - 1$ προσθέσεις

Η αύξηση του αριθμού των πράξεων που χρειάζονται για να ανανεώνουμε τα όρια, αντισταθμίζεται από τη μεγάλη μείωση του πλήθους των διανυσμάτων που ελέγχονται, ειδικά για πλέγματα μεγάλων διαστάσεων. Ο υπολογισμός της πολυπλοκότητας του αλγόριθμου παρουσιάζεται παρακάτω σύμφωνα με το οποίο το πηλίκο των αριθμητικών πράξεων είναι :

$$O \left(n^2 \times \left(1 + \frac{n-1}{4dC} \right)^{4dC} \right),$$

όπου το είναι το κάτω d^{-1} όριο του πίνακα Gram G .

d ,

Για καθορισμένη ακτίνα και δεδομένο πλέγμα, το οποίο καθορίζει το r , η πολυπλοκότητα είναι πολυωνυμική του n . Η παραπάνω εκτίμηση είναι αρκετά απαισιόδοξη, δεδομένου ότι δε λαμβάνει υπόψη το γεγονός ότι πρόκειται για κανάλι AWGN θορύβου. Στην περίπτωση αυτή, αποδεικνύεται, για ένα μεγάλο εύρος λόγων σήματος προς θόρυβο και διαστάσεων, η πολυπλοκότητα είναι κατά βάση $O(n^2)$.

2.4. Schonorr-Euchner enumeration- SEE-LSD algorithm

The Schnorr-Euchner enumeration (SEE) - LSD είναι ένας αλγόριθμος βασισμένος στην αναζήτηση «πρώτα-κατά-βάθος» (depth-first search), ο οποίος παρουσιάζεται παρακάτω. Είναι μία επέκταση του αλγορίθμου SEE-SD, όπου ο αλγόριθμος συνεχίζει να αναζητά μέχρι να ελεγχθούν όλοι οι προσβάσιμοι κόμβοι, ώστε να διεξαχθεί η λίστα L.

Η τελική υποψηφία λίστα L περιλαμβάνει τις πιο πιθανές επιλογές, παραδείγματος χάριν τους υποψήφιους με το χαμηλότερο ED. Η κύρια διαφορά μεταξύ των αλγορίθμων SEE-LSD και SEE-SD έγκειται στο γεγονός ότι η ακτίνα της σφαίρας C_0 δεν ανανεώνεται παρα μόνο όταν η τελική λίστα γεμίσει και ο C_0 ισούται με τον υποψήφιο ο οποίος έχει το μεγαλύτερο ED, που βρίσκεται στην τελική λίστα L. Η αναζήτηση συνεχίζει μέχρι να ελεγχθούν όλοι οι κόμβοι (Pham, 2004).

Ο σειριακός αλγόριθμος αρχικά ξεκινά από την ρίζα και επεκτείνει τον υποψήφιο. $s = xMT$ MT with the best admissible node determined by the SE enumeration. Ο αλγόριθμος «Schonorr-Euchner enumeration» παρουσιάζεται παρακάτω:

```

1: Initialize set  $\mathcal{L}$ , and set  $C_0 = \infty$ ,  $m = 0$ ,  $n_1 = 1$ ,  $i = M_T$ 
2: Initialize  $\mathcal{N}(s = \mathbf{x}_{M_T}^{M_T}, d(s) = 0)$ 
3: while ( $i \neq M_T$  and  $n_1 \neq |\Omega_r|$ ) do
4:   if  $n_1 = |\Omega_r|$  then
5:     Set  $i = i + 1$ , determine  $n_1$  and continue with  $\mathcal{N}(s = \mathbf{x}_{i+2}^{M_T}, d(s))$ 
6:   else
7:     Determine the  $n_1$ th best node  $x_i$  for  $s_c = (x_i, \mathbf{x}_{i+1}^{M_T})^T$  and calculate  $d(s_c)$ 
8:     if  $d(s_c) < C_0$  then
9:       if  $s_c$  is a leaf node, i.e.,  $i = 1$  then
10:        Store  $\mathcal{N}_F(s_c, d(s_c))$  in  $\{\mathcal{L}\}^m$ 
11:        Set  $m = m + 1$  or, if  $\mathcal{L}$  is full, set  $m$  according to  $\{\mathcal{L}\}^m$  with max ED
        and  $C_0 = \{d(s)\}^m$ 
12:        Continue with  $\mathcal{N}(s = \mathbf{x}_{i+1}^{M_T}, d(s))$ ,  $n_1++$  and  $i = 1$  if  $n_1 + 1 \leq |\Omega_r|$ 
13:      else if  $i \neq 1$  or  $n_1 + 1 = |\Omega_r|$  then
14:        Set  $i = i - 1$  and  $n_1 = 1$ , and continue with  $\mathcal{N}(s_c, d(s_c))$ 
15:      end if
16:    else if  $d(s) \geq C_0$  and  $i \neq M_T - 1$  then
17:      Set  $i = i + 1$ , determine  $n_1$  and continue with  $\mathcal{N}(s = \mathbf{x}_{i+2}^{M_T}, d(s))$ 
18:    else
19:      End the algorithm
20:    end if
21:  end if
22: end while

```

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3- ΑΝΑΛΥΣΗ PAPER:

“Decoding with Expected Length and Threshold Approximates(Delta): A near-ML Scheme for MIMO”

3.1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Υιοθετώντας την μέθοδο αναζήτησης Metric-First, την μέθοδο Schnorr-Euchner Enumeration, και τα branch-length thresholds, η προτεινόμενη τεχνική προσφέρει αποδοτικότητα, η οποία είναι μεγαλύτερη από αυτές των συμβατικών μεθόδων αποκωδικοποίησης near-ML.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, επιβεβαιώνεται ότι το προτεινόμενο σχήμα-μέθοδος έχει μικρότερη υπολογιστική πολυπλοκότητα από άλλους near-ML αποκωδικοποιητές, διατηρώντας όμως την ποιότητα στο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (bit rate error quality) πολύ κοντά στην απόδοση του ML. Επιπροσθέτως, η προτεινόμενη μέθοδος έχει την ικανότητα να επιτρέπει ευελιξία στην εναλλαγή μεταξύ υπολογιστικής πολυπλοκότητας και απόδοσης BER (bit rate error).

3.2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γνωστό ότι τα συστήματα MIMO μπορούν να παρέχουν μεγάλο εύρος αποδοτικότητας σε σύγκριση με τα συστήματα SISO για ασύρματες επικοινωνίες. Τα συστήματα MIMO θεωρούνται μια από τις βασικές τεχνολογίες νέας γενιάς των κινητών επικοινωνιών , διότι δεν απαιτείται επιπλέον ταχύτητα ροής πληροφοριών , το γνωστό bandwidth δηλαδή, ούτε επιπλέον ισχύς μετάδοσης (transmission Power) για να αυξήσουμε την χωρητικότητα του συστήματος.

Όπως και στην περίπτωση των συστημάτων SISO , έτσι και στην περίπτωση των συστημάτων MIMO , έχουν προταθεί πολλοί μέθοδοι αποκωδικοποίησης. Ανάμεσα σε αυτές τις μεθόδους , η αποκωδικοποίηση ML(Maximum Likelihood) παρέχει βέλτιστο ρυθμό μετάδοσης με κόστος όμως αρκετά πολύπλοκων υπολογισμών.

Ο αποκωδικοποιητής σφαίρας(Sphere Decoder) , ο οποίος έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, έχει παρουσιαστεί ως ένας από τους πιο ενδιαφέροντες μέθοδος μείωσης των εκτενών υπολογισμών που απαιτεί ένας ML αποκωδικοποιητής.

Ο κωδικοποιητής BSIDE (Breadth_First Signal Decoder) έχει προταθεί και έχει αποδειχθεί πως έχει λιγότερη πολυπλοκότητα από τον αλγόριθμο sphere decoder. Πραγματοποιήθηκαν αρκετές έρευνες , οι οποίες επιχείρησαν να σχεδιάσουν ML αποκωδικοποιητές με μειωμένη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Αν και επιτυχώς τα κατάφεραν, παρόλα αυτά , η υπολογιστική πολυπλοκότητα παραμένει υψηλή σε σχέση με τα πρακτικά συστήματα.

Σε αρκετές έρευνες, έχουν παρουσιαστεί επίσης μερικοί near-ML αποκωδικοποιητές με σχετικά λίγη απώλεια ως αναφορά την απόδοση του BER (bit error rate). Αυτοί οι αποκωδικοποιητές στοχεύουν στην μείωση υπολογιστικής πολυπλοκότητας για τα MIMO συστήματα. Οι περισσότεροι από τους παραπάνω κωδικοποιητές χρησιμοποιούν αποσύνθεση QR (QR Decomposition) του καναλιού της μήτρας και παρομοιάζουν (προσομοιώνουν) το πρόβλημα της αποκωδικοποίησης, ως πρόβλημα αναζήτησης ενός τέμνοντος σημείου(lattice point) με το μικρότερο κόμβο, υιοθετώντας μέθοδοι ή αλγόριθμοι όπως breadth-first(πρώτα-κατά-πλάτος), deapth-First(πρώτα-κατά-βάθος), και την μέθοδο metric-First πάνω σε ένα δέντρο αναζήτησης.

Ανάμεσα στους ποικίλους near ML αποκωδικοποιητές, η μέθοδος Schnorr Echnerr και ο αυξητικός αλγόριθμος IRA(Radii Algorithm) έχουν προταθεί για την εξάλειψη της εκθετικής αύξησης της υπολογιστικής πολυπλοκότητας της αναζήτησης deapth-First, όταν αυξάνει ο αριθμός των επιπέδων. Ο αλγόριθμος SE2 και ο αλγόριθμος IRA , οι οποίοι είναι παραλλαγή του αλγορίθμου SD , χρησιμοποιούν μοναδικές μεθόδους για να καθορίσουν το μονοπάτι και επαναλαμβάνουν την αναζήτηση στο δέντρο πίσω και μπροστά ώστε να βρουνε τον κόμβο με την μικρότερη τιμή

(μετρική). Ο αλγόριθμος SE2, μειώνει την υπολογιστική πολυπλοκότητα βασισμένος στην απαρίθμηση Shnorr-Echnuner (SE) με μία μετρική fano-like και μία πρόσφατη τεχνική. Από την άλλη, ο αλγόριθμος IRA, μειώνει την υπολογιστική πολυπλοκότητα με το να προσπελαύνει το χώρο αναζήτησης στατιστικά. Με αυτό τον τρόπο προσφέρει μείωση στον αριθμό υπολογισμών όταν ο αριθμός κεραιών είναι μεγάλος.

Αν και ο Αλγόριθμος SE2 και ο αλγόριθμος IRA επιτυγχάνουν near-ML απόδοση με χαμηλή πολυπλοκότητα, ο SE2 απαιτεί να γίνει εκτίμηση του SNR(signal-to-noise ratio, και ο IRA απαιτεί να ξανά-ξεκινήσει η αναζήτηση με αυξημένη ακτίνα σε περίπτωση που δεν είναι εφικτή η ανίχνευση σημείου.

Όσο αναφορά τις μεθόδους αποκωδικοποίησης που βασίζονται σε μεθόδους αναζήτησης breadth-first(πρώτα- κατά- πλάτος), η τεχνική QRD-M βασίζεται στον κλασικό αλγόριθμο M-algorithm και παρουσιάζει αρκετά χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα, αναζητώντας στο δέντρο μόνο με κατεύθυνση προς τα εμπρός, ξεκινώντας από τη ρίζα του δέντρου. Για να αποτρέψει την πλήρη σάρωση του δέντρου, η τεχνική QRD-M διατηρεί μόνο M κόμβους με την μικρότερη τιμή της μετρικής σε κάθε επίπεδο. Ο αποτελεσματικός QRD-M καταφέρνει μια σημαντική μείωση στην υπολογιστική πολυπλοκότητα με το να βγάζει εκτός κάποιον κόμβο που έχει τιμή μετρικής μεγαλύτερη από το καθορισμένο όριο. Όμως, απαιτεί σε κάθε επίπεδο να υπολογιστούν η τιμή DFE(Decision feedback equalizer) και η Ευκλείδεια απόσταση του.

Βασισμένος στην αναζήτηση Metric-First , η μέθοδος QRD-Stack που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο της στοίβας, επιτυγχάνει χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα με το να διατηρεί σχετικά λίγους κόμβους για αναζήτηση.

Στην εργασία προς ανάλυση προτείνεται μια near-ML τεχνική αποκωδικοποίησης, η οποία ονομάζεται: *"Decoding with Expected Length and Threshold Approximates(DELTA): A near-ML Scheme for MIMO"*. Αυτή η τεχνική είναι καινοτόμος και ενσωματώνει την μέθοδο αναζήτησης metric-First, την απαρίθμηση SE, και το branch length threshold σε ένα πλαίσιο για την συστηματική αποκωδικοποίηση των συστημάτων MIMO. Επίσης προτείνεται μία καινοτόμος μέθοδος για την εύρεση του branch length threshold . Το όριο ή αλλιώς μονοπάτι(threshold) είναι η μέτρηση του αναμενόμενου μήκους που ξεκινά από τον κόμβο-γονέα και

τελειώνει στον καλύτερο κόμβο του πρώτου επιπέδου. Με την παραπάνω καινοτόμο τεχνική το threshold μπορεί να βρεθεί από τον πίνακα (μήτρα) των καναλιών.

Ο DELTA ο οποίος όπως αναφέρθηκε χρησιμοποιεί την μέθοδο αναζήτησης metric-First και υιοθετώντας το branch length threshold και την απαρίθμηση SE, κάνει αναζήτηση στο δέντρο με τέτοιο μοναδικό τρόπο που δεν έχει γίνει στο παρελθόν.

Πιο συγκεκριμένα το σχήμα DELTA:

1. Βρίσκει στο δέντρο έναν κόμβο με την μικρότερη τιμή μετρικής
2. Αποφασίζει εάν ο κόμβος αξίζει να προσπελαστεί.
3. Συνδέει κάθε φορά ένα «κλαδί» μεταξύ του κόμβου και του κόμβου-γονέα.

Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγει το περιττό backtracking και τις περιττές συνδέσεις των κόμβων κατά τη διάρκεια της αναζήτησης, επιτυγχάνοντας τελικώς μειωμένη υπολογιστική πολυπλοκότητα σε σύγκριση με άλλους near-ML αποκωδικοποιητές. Επίσης, επιτρέπει ευελιξία στην εναλλαγή μεταξύ υπολογιστικής πολυπλοκότητας ή απόδοσης του BER(Bit error rate).

3.3. QR Αποκωδικοποιητής (QR decomposition)

Αρκετές τεχνικές περιλαμβάνουν αντιστροφή πινάκων με συνέπεια το μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Μια διαφορετική προσέγγιση η οποία επίσης προϋποθέτει γνώση του καναλιού από το δέκτη είναι η τεχνική SQRD η οποία μειώνει κατά πολύ την πολυπλοκότητα και αποτελεί μια επέκταση της τεχνικής της αποσύνθεσης QR.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε το παρακάτω κανάλι MIMO στο οποίο τα σύμβολα έχουν διαμορφωθεί με οποιοδήποτε σχήμα από τα BPSK, M-QAM,

M-PSK και θεωρούμε CSI στον δέκτη. Με την τεχνική QR αποσυνθέτουμε τον πίνακα H σε δυο πίνακες Q,R έτσι ώστε να ισχύει $H=QR$ όπου ο Q είναι ένας $M \times N$ μοναδιαίος πίνακας και ο R είναι ένας $N \times N$ άνω τριγωνικός πίνακας.

Οπότε:

$$(h_1 \dots h_N) = (q_1 \dots q_N) \begin{pmatrix} r_{1,1} & \dots & r_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & r_{N,N} \end{pmatrix}$$

Πολλαπλασιάζοντας λοιπόν την εξίσωση του καναλιού από τα αριστερά με Q^H προκύπτει $c = Q^H r = R s + Q^H w$ και επειδή ο Q είναι μοναδιαίος αφήνει το θόρυβο όπως είναι. Το 'ωφέλιμο' σήμα για τη ροή δεδομένων k μπορεί να γραφεί ως εξής

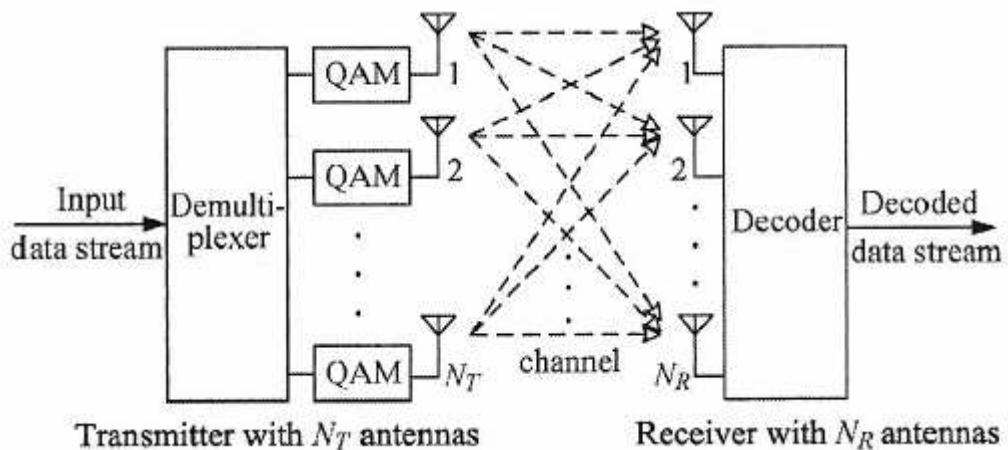
$$r_k = R_{k,k} s_k + w_k + \sum_{i=k+1}^N R_{k,i} s_i$$

όπου ο τελευταίος παράγοντας αποτελεί την παρεμβολή των υπόλοιπων ροών στο σήμα. Καθότι ο R είναι άνω τριγωνικός το k-οστό στοιχείο είναι ανεξάρτητο από τα k-1 σήματα οπότε και η εκτίμηση των σημάτων γίνεται από το τέλος έτσι ώστε το σήμα μας να είναι τελείως ελεύθερο από παρεμβολές. Καθώς γίνεται ο υπολογισμός των σημάτων από το τέλος προς την αρχή τροποποιούμε το σήμα αφαιρώντας τα ήδη εκτιμημένα σήματα από το τρέχον το οποίο πλέον μπορεί να υπολογιστεί χωρίς παρεμβολή.

Ο βελτιστοποιημένος αλγόριθμος SQRD αποτελεί επέκταση του αλγορίθμου GramSchmidt ο οποίος υπολογίζει τον πίνακα Q κατά στήλες από αριστερά προς τα δεξιά με αρχική τιμή $Q=H$ και τον πίνακα R κατά σειρές από πάνω προς τα κάτω. Σε κάθε βήμα γίνονται υπολογισμοί και αναδιατάξεις των στοιχείων του R και του Q ώστε να εκμεταλλευτούμε το μμονοπάτι με την μεγαλύτερη ενέργεια για να υπολογίζουμε το 1ο σήμα, μεγιστοποιώντας κατ' αυτό τον τρόπο την πιθανότητα ορθότητας ώστε να μην υπάρξει αναπαραγωγή του λάθους κατά τη διάρκεια της ακύρωσης των σημάτων.

3.4. ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ενός συστήματος MIMO με μετάδοση N_T και N_R Κεραίες λήψης. Υποθέτουμε ότι η ροή πληροφορίας αποπολυπλέκεται σε N_T υπο-κανάλια και στην συνέχεια στέλνεται ταυτόχρονα από τις N_T κεραίες μετάδοσης στις N_R κεραίες λήψης πάνω σε ασύρματο κανάλι επικοινωνίας. Υποθέτουμε επίσης πως ένας μετατροπέας QAM(Quadrature Amplitude Modulation) χρησιμοποιείται από όλα τα υποκανάλια.



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα συστήματος MIMO

Έτσι, συμβολίζοντας με y_j το πολύπλοκο σήμα που λαμβάνεται και με j τη την κεραία λήψης, το μοντέλο του διανύσματος του σήματος λήψης

$$\underline{\tilde{y}} = [\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_{N_R}]^T$$

Μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\underline{\tilde{y}} = \underline{\tilde{H}} \underline{\tilde{s}} + \underline{\tilde{v}}$$

Όπου:

Το $\underline{\mathbf{T}}$ αντιπροσωπεύει την αντιμετάθεση του διανύσματος.

Το \underline{H} είναι η μήτρα καναλιών $N_R \times N_T$ ανεξάρτητα και κανονικώς κατανομημένα με τυχαίες Gaussian μεταβλητές με μέσο που ισούται με μηδέν.

Το $\underline{\tilde{s}} = [\tilde{s}_1, \tilde{s}_2, \dots, \tilde{s}_{N_T}]^T$ είναι το διάνυσμα του σήματος μετάδοσης.

Το $\underline{\tilde{v}} = [\tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \dots, \tilde{v}_{N_R}]^T$ είναι το διάνυσμα των "complex additive Gaussian τυχαίων μεταβλητών" με μέσο που ισούται με μηδέν και διακύμανση ίση με σ^2

Υποθέτουμε ότι η εκτίμηση της μήτρας των καναλιών έχει ολοκληρωθεί πριν την αποκωδικοποίηση της λήψης.

Συμβολίζοντας με $R(-)$ και $J(-)$, τα πραγματικά και Τα φανταστικά μέρη αντίστοιχα, η σχέση (1) μπορεί να μετασχηματιστεί σε πραγματική αναπαράσταση ως εξής:

$$\begin{aligned}
\underline{y} &= \begin{pmatrix} \Re(\underline{\tilde{y}}) \\ \Im(\underline{\tilde{y}}) \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} \Re(\tilde{H}) & -\Im(\tilde{H}) \\ \Im(\tilde{H}) & \Re(\tilde{H}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Re(\underline{\tilde{s}}) \\ \Im(\underline{\tilde{s}}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Re(\underline{\tilde{v}}) \\ \Im(\underline{\tilde{v}}) \end{pmatrix} \\
&= H\underline{s} + \underline{v}.
\end{aligned} \tag{2}$$

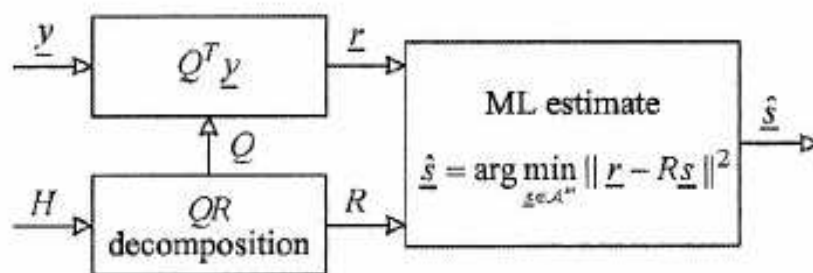
Όπου:

- $\underline{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ είναι το πραγματικό διάνυσμα του σήματος λήψης
- $\underline{s} = [s_1, s_2, \dots, s_m]^T$, είναι το πραγματικό διάνυσμα του σήματος μετάδοσης.
- $\underline{v} = [v_1, v_2, \dots, v_n]^T$, είναι το διάνυσμα του πραγματικού i.i.d. (additive Gaussian noise) με μέσο που ισούται με μηδέν και διακύμανση $\sigma^2/2$, όπου

$$m = 2N_T$$

$$n = 2N_R.$$

Για απλότητα θεωρούμε πως $n=m$, χωρίς να υπάρχει καμία απώλεια.



3.2 Διάγραμμα του ML αποκωδικοποιητή για συστήματα MIMO

Αρχικά αποσυνθέτουμε την μήτρα καναλιών H , όπου Q είναι μία μήτρα $m \times n$ τέτοια ώστε:

$$Q^T Q = I$$

Και $R = [r_{i,j}]$ είναι ένας άνω τριγωνικός πίνακας $m \times m$. Πολλαπλασιάζοντας την σχέση (2) με Q^T , παίρνουμε τα εξής:

$$\underline{r} = R\underline{s} + \underline{w} \quad (6)$$

Όπου:

$$\begin{aligned} \underline{r} &= Q^T \underline{y} \\ &= [r_1, r_2, \dots, r_m]^T \end{aligned} \quad (7)$$

Και $\underline{w} = Q^T \underline{v}$. Οι στατιστικές ιδιότητες του όρου w (θόρυβος) στην παραπάνω σχέση (6) είναι ίδιες με αυτές του v στην σχέση (2), λόγω της μαθηματικής σχέσης (5).

Υποθέτοντας ότι

$$\mathcal{A} = \left\{ -\frac{\sqrt{L}-1}{2}, -\frac{\sqrt{L}-3}{2}, \dots, \frac{\sqrt{L}-3}{2}, \frac{\sqrt{L}-1}{2} \right\} \quad (8)$$

Με $L=4,16,\dots$, το σύνολο $\{R_s\}$ των διανυσμάτων της σχέσης (6) το οποίο είναι υποσύνολο του απείρου του lattice:

$$\Lambda(R) = \{R\underline{s} : \underline{s} \in \mathcal{A}_\infty^m\} \quad (9)$$

Παραγόμενο από το R, όπου:

$$\mathcal{A}_\infty = \left\{ a + \frac{1}{2} : a \in \mathbb{Z} \right\} \quad (10)$$

Είναι ο άπειρος συνδυασμός του A με το Z να συμβολίζει όλους τους ακέραιους. Έτσι το διάνυσμα r που αντιπροσωπεύει τα λαμβανόμενα σήματα μπορεί να θεωρηθεί ως το perturbed lattice σημείο λόγω του θορύβου w. Με αυτό τον τρόπο, δοθέντος διανύσματος r και πίνακα R, η βέλτιστη λύση s υπολογίζεται από την σχέση:

$$\begin{aligned} \hat{\underline{s}} &= \arg \min_{\underline{s} \in \mathcal{A}^m} \|\underline{r} - R\underline{s}\|^2 \\ &= \arg \min_{\underline{s} \in \mathcal{A}^m} \sum_{i=1}^m \left(r_i - \sum_{j=i}^m r_{i,j} s_j \right)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

Όπου το $\| - \|$, συμβολίζει την Ευκλείδεια κανονικοποίηση. Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα του ML αποκωδικοποιητή για συστήματα MIMO.

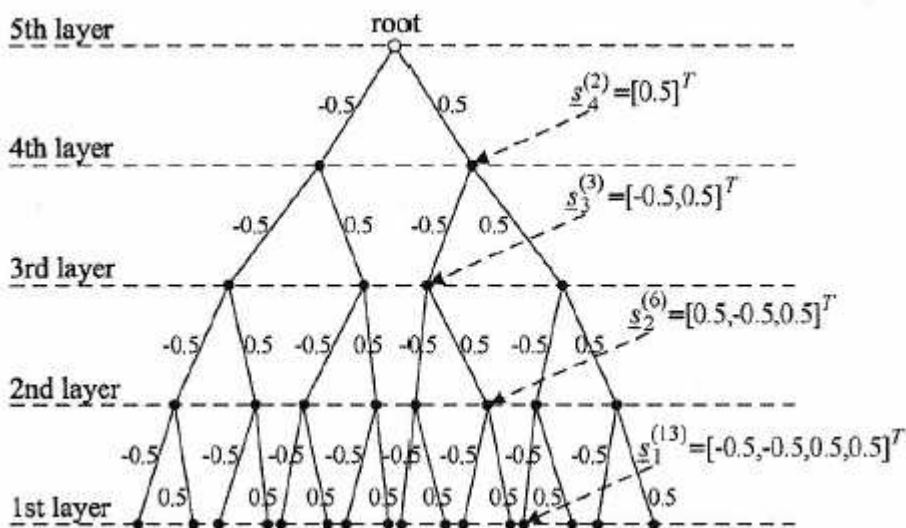
3.5. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΣΧΗΜΑ-ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΟΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ

Εκμεταλλευόμενοι την ιδιότητα του άνω τριγωνικού πίνακα R, η δομή του δέντρου χρησιμοποιείται αρκετά συχνά για να βρούμε το ML ή την λύση near-ML στο σύστημα MIMO που αποκωδικοποιείται.

Ας θεωρήσουμε ένα \sqrt{L} -ary δέντρο με $m+1$ επίπεδα με ρίζα που βρίσκεται στο πιο ψηλό επίπεδο, δηλαδή στο επίπεδο $(m+1)$. Τότε, ένα κλαδί μεταξύ του επιπέδου $(k+1)$ και του επιπέδου k του δέντρου συμβολίζει την πιθανή τιμή (E, A) του k -οστού στοιχείου (s_k) , του πραγματικού διανύσματος s του μεταδιδόμενου σήματος.

$$\underline{s}_k^{(l)} = [s_{k,k}^{(l)}, s_{k+1,k}^{(l)}, \dots, s_{m,k}^{(l)}]^T \quad (12)$$

Για $k=1, 2, \dots, m$ και $l=1, 2, \dots, \sqrt{L}^{m-k+1}$, με ρίζα συμβολισμένη με $\underline{s}_{m+1}^{(1)}$ (για απλότητα). Ένα παράδειγμα ενός δέντρου με $m=4$ και $L=4$ παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3 Παράδειγμα δέντρου όταν $m=4$ και $L=4$

Ας καθορίσουμε την μετρική του κόμβου, ως το άθροισμα του μήκους των κλαδιών του μοναδικού μονοπατιού που συνδέει τον κόμβο με την ρίζα. Πιο συγκεκριμένα ορίζουμε το μήκος $\varphi(\underline{s}_k^{(l)})$ του κλαδιού μεταξύ του κόμβου $\underline{s}_k^{(l)}$ και του κόμβου-γονέα.

$$\begin{aligned}\underline{s}_{k+1}^{(p)} &= \left[s_{k+1,k+1}^{(p)}, s_{k+2,k+1}^{(p)}, \dots, s_{m,k+1}^{(p)} \right]^T \\ &= \left[s_{k+1,k}^{(l)}, s_{k+2,k}^{(l)}, \dots, s_{m,k}^{(l)} \right]^T\end{aligned}\quad (13)$$

$$\begin{aligned}\varphi\left(\underline{s}_k^{(l)}\right) &= \left(r_k - \sum_{j=k}^m r_{k,j} s_{j,k}^{(l)} \right)^2 \\ &= e_k^2\left(\underline{s}_k^{(l)}\right)\end{aligned}\quad (14)$$

Η μετρική $\Phi(\underline{s}_k^{(l)})$ of $\underline{s}_k^{(l)}$ του κόμβου μπορεί να βρεθεί από :

$$\begin{aligned}
\Phi \left(\underline{s}_k^{(l)} \right) &= \sum_{i=k}^m \varphi \left(\underline{s}_i^{(p_i)} \right) \\
&= \sum_{i=k}^m \left(r_i - \sum_{j=i}^m r_{i,j} s_{j,i}^{(p_i)} \right)^2 \\
&= \sum_{i=k}^m \left(r_i - \sum_{j=i}^m r_{i,j} s_{j,k}^{(l)} \right)^2 \\
&= \sum_{i=k}^m e_i^2 \left(\underline{s}_k^{(l)} \right) \tag{15}
\end{aligned}$$

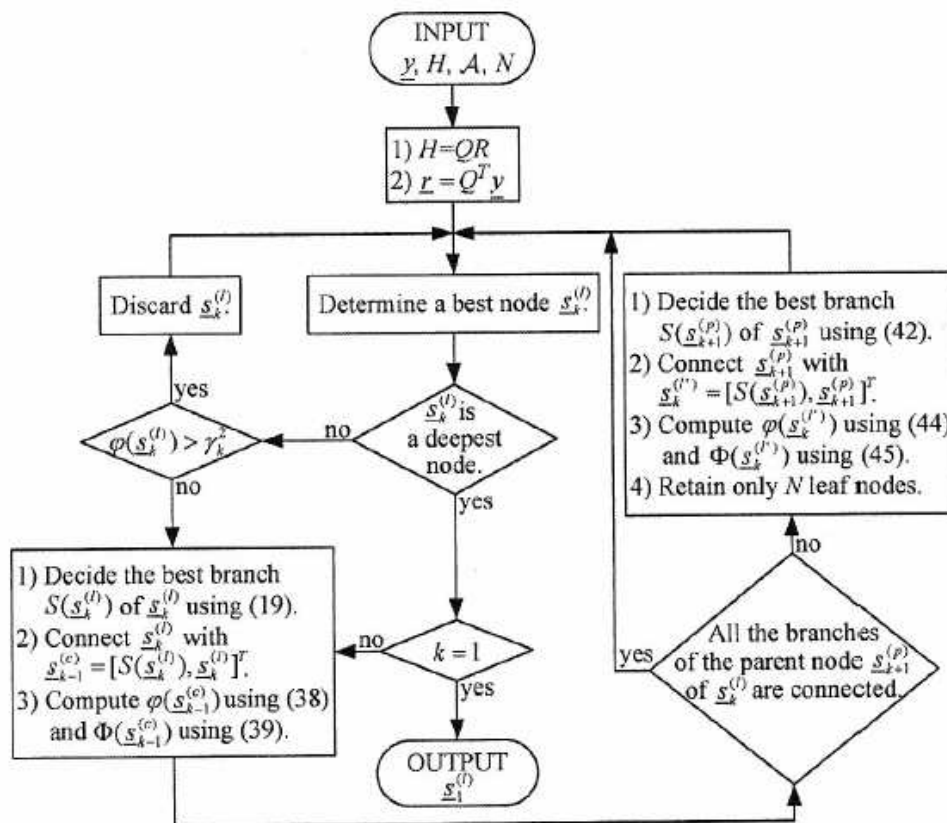
Κάνοντας τις απαραίτητες μετατροπές βρίσκουμε ότι:

$$\begin{aligned}
&\left\{ S \left(\underline{s}_k^{(l)} \right), S \left(\underline{s}_k^{(l)} \right) + 1, S \left(\underline{s}_k^{(l)} \right) - 1, S \left(\underline{s}_k^{(l)} \right) + 2, \right. \\
&\quad \left. S \left(\underline{s}_k^{(l)} \right) - 2, \dots \right\} \cap \mathcal{A} \quad \text{if} \quad S \left(\underline{s}_k^{(l)} \right) \leq \frac{e_{k-1} \left(\underline{s}_k^{(l)} \right)}{r_{k-1,k-1}} \\
&\left\{ S \left(\underline{s}_k^{(l)} \right), S \left(\underline{s}_k^{(l)} \right) - 1, S \left(\underline{s}_k^{(l)} \right) + 1, S \left(\underline{s}_k^{(l)} \right) - 2, \right. \\
&\quad \left. S \left(\underline{s}_k^{(l)} \right) + 2, \dots \right\} \cap \mathcal{A} \quad \text{if} \quad S \left(\underline{s}_k^{(l)} \right) > \frac{e_{k-1} \left(\underline{s}_k^{(l)} \right)}{r_{k-1,k-1}}
\end{aligned}$$

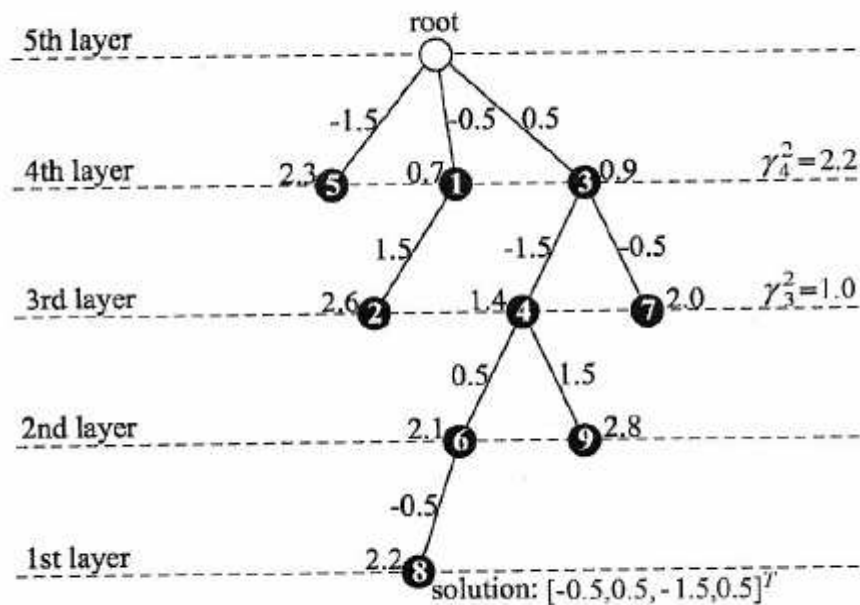
3.6. ΤΕΧΝΙΚΗ DELTA

Το διάγραμμα ροής της προτεινόμενης τεχνικής(DELTA) φαίνεται παρακάτω (σχήμα 3.4) όπου $m=4$, $L=16$ και $N=16$. Στο σχήμα 3.5 , ο αριθμός που

βρίσκεται μέσα στον κόμβο συμβολίζει την σειρά της πληροφορίας του κόμβου.



Σχήμα 3.4 Διάγραμμα ροής του DELTA



Σχήμα 3.5 Παράδειγμα αναζήτησης με τεχνική DELTA

3.7. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους η τεχνική DELTA μπορεί να μειώσει σε σημαντικό βαθμό την υπολογιστική πολυπλοκότητα. Στον πίνακα 1 φαίνονται μερικά από τα χαρακτηριστικά διαφόρων μεθόδων αποκωδικοποίησης.

Επειδή η εκτίμηση υπολογιστικής πολυπλοκότητας του καναλιού και η αποκωδικοποίηση του καναλιού δεν εξαρτάται σε συγκεκριμένη επιλογή αποκωδικοποιητή και η υπολογιστική πολυπλοκότητα των αθροιστών είναι αρκετά μικρότερη σε σύγκριση με αυτή των πολλαπλασιαστών, η σχετική πολυπλοκότητα των αποκωδικοποιητών εκτιμάται από τον πίνακα πολλαπλασιασμών (για λόγους ευκολίας).

Πίνακας 3.1 Μερικά χαρακτηριστικά από διάφορους μεθόδους αποκωδικοποίησης near- ML

	DELTA	efficient QRD-M	QRD-Stack	SE2
search method	metric-first	breadth-first	metric-first	depth-first
estimate of SNR	not required	not required	not required	required
SE enumeration	employed	not employed	not employed	employed
simultaneous consideration of multiple nodes	yes	yes	yes	no
number of branches formed from a best node	0 or 1	\sqrt{L}	\sqrt{L}	0 or 1
metric compared to threshold	branch metric	node metric	(not applicable)	biased node metric

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Σε αυτήν την εργασία έγινε μελέτη και ανάλυση των συστημάτων MIMO. Αναλύθηκαν αρκετές ορολογίες που χρησιμοποιούνται από αυτήν την τεχνολογία και αναλύθηκε μια εργασία στην οποία οι συγγραφείς προτείνουν μια τεχνική αποκωδικοποίησης την οποία ονομάζουν DELTA με την οποία αποδεικνύουν ότι μειώνει αρκετά την υπολογιστική πολυπλοκότητα.

Έχει δειχθεί, στις σχετικές έρευνες, ότι οι διατάξεις (Multiple Input – Multiple Output, MIMO) προσφέρουν σημαντική βελτίωση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος, σε σχέση με τα παραδοσιακά τηλεπικοινωνιακά συστήματα μίας εισόδου – μίας εξόδου (Single Input – Single Output, SISO Systems).

Τα συστήματα πολλαπλών κεραιών μπορούν να οριστούν ως ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα, στο οποίο τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης μπορούν να διαθέτουν πολλαπλές κεραιές. Η βασική ιδέα πίσω από τα συστήματα πολλαπλών κεραιών είναι ότι τα σήματα που μεταδίδονται από τις κεραιές του πομπού και λαμβάνονται από τις κεραιές του δέκτη, συνδυάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιώνεται σημαντικά η ποιότητα της επικοινωνίας, ή διαφορετικά ο ρυθμός σφάλματος δεδομένων (bit error rate BER).

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των συστημάτων πολλαπλών κεραιών αποτελεί η δυνατότητα που να μετατρέπουν το φαινόμενο της πολύδρομης μετάδοσης του σήματος, το οποίο αποτελεί κύριο πρόβλημα για τα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας, σε πλεονέκτημα.

Σίγουρα υπάρχει αρκετός δρόμος μέχρι να τελειοποιηθούν τα συστήματα MIMO. Όμως μπορούμε να πούμε ότι θα αποτελέσουν απαίτηση του μέλλοντος όσον αφορά τις τηλεπικοινωνίες. Το διαθέσιμο φάσμα έχει ήδη κατανεμηθεί στους τηλεπικοινωνιακούς φορείς και στο άμεσο μέλλον αυτό δε θα επαρκεί για την κάλυψη των ολοένα αυξανόμενων εφαρμογών ευρείας ζώνης. Ήδη τα κινητά τρίτης γενιάς υποχρεούνται να διαθέτουν εφαρμογές πρόσβασης στο Internet, video on demand , γεγονός που δηλώνει την απαίτηση για χωρητικότητες της τάξης των Mbps.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Arogyaswami Paulraj, Rohit Nabar and Dhananjay Gore, "Introduction to Space-Time Wireless Communications", Cambridge University Press, 2003.
- [2] Α. Κανάτας, Φ. Κωνσταντίνου, «Συστήματα Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών», Μάρτιος 2001.
- [3] Μ.Ε. Θεολόγου, «Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών», Εκδόσεις ΕΜΠ, Μάρτιος 2002.
- [4] Π. Γ. Κωττής, Π-Δ. Μ. Αράπογλου, "Ασύρματες Επικοινωνίες", Εκδόσεις Τζιόλα, 1η έκδοση, 2011
- [5]: T. Rappaport, Wireless Communications: Principles and Practice, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 2001.

- [6] T. Marzetta, B. Hochwald, "Capacity of a Mobile Multiple-Antenna Communication Link in Rayleigh Flat Fading", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 45, no 1, pp. 139-157, Jan. 1999.
- [7] S. M. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications," *IEEE Journal on Select Areas in Communications*, vol. 16, pp. 1451-1458, October 1998.
- [8] G. -T. Chyi, J. G. Proakis and C. M. Keller, "On the symbol error probability of maximum-selection diversity reception schemes over a Rayleigh fading, september 2002.
- [9] E. A. Neasmith and N. C. Beaulieu, "New results on selection diversity", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, no. 5, pp. 695-704, May 1998.
- [10] A. Sendonaris, E. Erkip and B. Aazhang, "User cooperation diversity – Part I: System description," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 11 pp. 1927-1938, Nov. 2003
- [11] G. L. Stüber, *Principles of Mobile Communication*, 2nd ed. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 2001
- [12] David Gesbert, Da-shan Shiou, Peter J. Smith, Ayman Naguib, "From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems", *IEEE Journal on selected areas in Commun.*, Vol. 21, NO. 3, April 2003.
- [13] V. Kühn, "Wireless Communications over MIMO Channels," Wiley, 2006.
- [14] M. Patzold, B. O. Hogstad, and N. Youssef, "Modeling, Analysis, and Simulation of MIMO Mobile-to-Mobile Fading Channels", *IEEE Trans On Wireless Communications*, Vol. 7, no. 2, Feb 2008.

- [15] Ε.Δ. Συκάς, Μ.Ε. Θεολόγου, «Συστήματα Επικοινωνίας», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Νοέμβριος 1998 .
- [16] M. Wennström, "On MIMO System and Adaptive Arrays for Wireless Communications: Analysis and Practical Aspects", thesis, Uppsala 2002. URL: publications.uu.se/uu/fulltext/nbn_se_uu_diva-2604.pdf
- [17] A. G. Zajic and G. L. Stuber, "Statistical Properties of Wideband MIMO Mobile-to-Mobile Channels," Proc. of IEEE WCNC'08, Las Vegas, NE, April 2008.
- [18] Αφράτη, και Γ. Παπαγεωργίου, «Αλγόριθμοι: Μέθοδοι Σχεδίασης Και Ανάλυση Πολυπλοκότητας», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1993.
- [19] GIGA seminar 11.01.2010 Markus Myllylä and Johanna Ketonen-university of Oulu. http://www.cwc oulu.fi/public-cwc-giga-2010/1520_Myllyla.pdf
- [20] M.Najork, J.L.Wiener, "Breadth-first search crawling yields high quality pages", In Proc. 10 the Intl. World Wide Web Conference, Hong Kong, China, May 2001 .
- [21] Albert M. Chan and Inkyu Lee, "A new reduced-complexity sphere decoder for multiple antenna systems," IEEE pp 460-464, 2002
- [22] [Ιστότοπος1] <http://home.himolde.no/~molka/in350/week9y01.htm> –
- [23] D. Pham, K. Pattipati, P. Willett, and J. Luo, "An improved complex sphere decoder for V-BLAST systems," IEEE Signal Processing Letters,