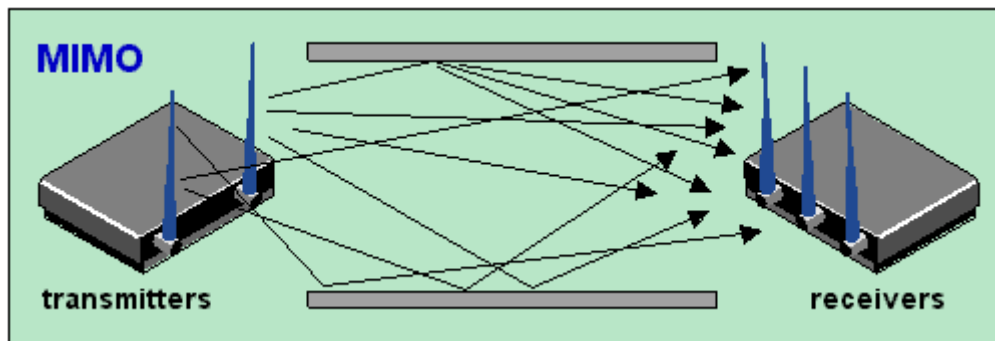


Πτυχιακή Εργασία

«ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΕΡΑΙΩΝ ΜΙΜΟ»



Όνοματεπώνυμο: Παπαζήκα Παρασκευή

Επιβλέπων καθηγητής: Σακκάς Λάμπρος

Άρτα 2014

Η παρούσα εργασία αποτελεί προϊόν αποκλειστικά δικής μου προσπάθειας. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία και γίνεται ρητή αναφορά σε αυτές μέσα στο κείμενο όπου έχουν χρησιμοποιηθεί.

Ημερομηνία:

Όνοματεπώνυμο:

Υπογραφή:

Περίληψη

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά γενικά στα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών, κάνοντας μία σύντομη ιστορική αναδρομή και στη συνέχεια αναλύοντας βασικές έννοιες των ασύρματων επικοινωνιών όπως οι μηχανισμοί που επηρεάζουν τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύουμε τα χαρακτηριστικά των ασύρματων καναλιών και το μεγαλύτερο μειονέκτημα των ασύρματων επικοινωνιών, τις διαλείψεις του σήματος που οφείλονται στις πολλαπλές διαδρομές που ακολουθεί το εκπεμπόμενο σήμα, λόγω σκεδαστών. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στις τεχνικές διαφορισμού που χρησιμοποιούνται για την εξάλειψη του φαινομένου των πολλαπλών διαδρομών. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μελέτη και ανάλυση των συστημάτων επικοινωνιών που χρησιμοποιούν κεραιές με πολλαπλές εισόδους και πολλαπλές εξόδους ή MIMO (multiple input multiple output). Στο τελευταίο κεφάλαιο δίνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατόπιν της θεωρητικής μελέτης του θέματος της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	σελ. 6
1 ^ο Κεφάλαιο: Ασύρματα συστήματα επικοινωνιών	σελ. 7
1.1 Ιστορική αναδρομή	σελ. 7
1.2 Βασικές έννοιες	σελ. 8
1.2.1 Τρόποι μετάδοσης	σελ. 8
1.2.2 Μηχανισμοί διάδοσης	σελ.8
1.2.3 Ζώνες Συχνότητων	σελ. 11
1.2.4 Περιοχές ακτινοβολίας κεραιών	σελ.12
1.2.5 Διάγραμμα ακτινοβολίας	σελ. 13
1.2.6 Είδη κεραιών	σελ. 13
1.2.7 Κατευθυντικότητα	σελ. 15
1.3 Τεχνικές διαμόρφωσης	σελ. 15
1.3.1 Αναλογική Διαμόρφωση συχνότητας και διαμόρφωση πλάτους	σελ. 16
1.3.2 Ψηφιακές διαμορφώσεις	σελ. 19
2 ^ο Κεφάλαιο: Ασύρματο κανάλι	σελ. 22
2.1 Διαλείψεις σήματος	σελ. 22
2.2 Παράμετροι καναλιών με πολλαπλές διαδρομές	σελ. 23
2.2.1 Παράμετροι χρονικής διασποράς	σελ. 24
2.2.2 Εύρος ζώνης συνοχής	σελ. 25
2.2.3 Εξάπλωση Doppler και χρόνος συνοχής	σελ. 27
3 ^ο Κεφάλαιο: Τεχνικές Διαφορισμού	σελ. 28
3.1 Διαφορισμός Χώρου ή Κεραίας (Space or Antenna Diversity)	σελ. 29
3.1.1 Διαφορική λήψη χώρου	σελ. 29
3.1.2 Διαφορική Εκπομπή	σελ. 31
3.2 Διαφορισμός χρόνου	σελ. 32
3.3 Διαφορισμός συχνότητας	σελ. 32
3.4 Διαφορισμός πολλαπλών οδεύσεων (Multipath Diversity)	σελ. 33
3.5 Διαφορισμός Συνεργασίας (Cooperative Diversity)	σελ. 33
3.6 Διαφορισμός πόλωσης	σελ. 34
3.7 Διαφορισμός Γωνίας (angle diversity)	σελ. 34
3.6 Συστήματα με πολλαπλές κεραιές εκπομπής/λήψης	σελ. 35
4 ^ο Κεφάλαιο: Συστήματα MIMO	σελ. 37

4.1 Πλεονεκτήματα του MIMO	σελ. 39
4.1.1 Κέρδος στοιχειοκεραίας (Array gain)	σελ. 39
4.1.2 Κέρδος χωρικού διαφορισμού (Spatial diversity gain)	σελ. 39
4.1.3 Κέρδος χωρικής πολυπλεξίας (Spatial Multiplexing Gain)	σελ. 40
4.1.4 Μείωση και αποφυγή παρεμβολών (Interference reduction and avoidance)	σελ.41
4.2 Χωρητικότητα συστημάτων	σελ. 41
4.2.1 Θεώρημα Shannon σε SISO συστήματα	σελ. 41
4.2.2 Χωρητικότητα MIMO συστημάτων	σελ. 43
4.3 Ανάλυση MIMO συστημάτων	σελ. 45
4.4 Μαθηματικό μοντέλο MIMO καναλιού	σελ. 47
4.5 Μοντελοποίηση MIMO καναλιών	σελ. 49
4.5.1 Φυσικά μοντέλα	σελ. 50
4.5.1.1 Ντετερμινιστικά μοντέλα	σελ. 51
4.5.1.2 Γεωμετρικά στοχαστικά μοντέλα	σελ. 52
4.5.1.3 Μοντέλα διαύλων MIMO στα πλαίσια ευρωπαϊκής δράσης και σε οργανισμούς προτυποποίησης	σελ. 53
4.6 Τα συστήματα MIMO στο εμπόριο	σελ. 54
5 ^ο Κεφάλαιο: Συμπεράσματα	σελ. 56
Πίνακας εικόνων	σελ. 57
Πίνακας εξισώσεων	σελ. 58
Βιβλιογραφία	σελ. 59

Εισαγωγή

Οι σύγχρονες αντιλήψεις στο τομέα των τηλεπικοινωνιών έχουν σαν αποτέλεσμα να αυξάνεται η ανάγκη μεταφοράς μεγάλου όγκου δεδομένων με πολύ υψηλές ταχύτητες. Ταυτόχρονα, η αύξηση των παρεχόμενων υπηρεσιών και η βελτίωση της ποιότητάς τους παραμένουν οι βασικοί παράγοντες στη σχεδίαση σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Η επόμενη γενιά ασύρματων δικτύων και κινητής τηλεφωνίας είναι απαραίτητο να χαρακτηρίζεται από υπηρεσίες αυξημένης ποιότητας και αξιοπιστίας και διευρυμένης ραδιοκάλυψης. Επιπλέον, η αντίστοιχη αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων δεν θα πρέπει να συνδυαστεί με την ανάλογη διεύρυνση του εύρους ζώνης. Η απαίτηση αυτή επιβάλλει την όσο το δυνατόν αποδοτικότερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης και της διαθέσιμης ισχύος.

Τα «κλασσικά» ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα καταφέρνουν να καλύψουν ως ένα βαθμό τις παραπάνω ανάγκες κυρίως με την ανάπτυξη «έξυπνων» αλγορίθμων και τεχνικών κωδικοποίησης. Ωστόσο δεν συμβάλλουν ικανοποιητικά στη μείωση του χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης. Σε αυτό υπερτερούν τα ασύρματα συστήματα πολλαπλών εισόδων – πολλαπλών εξόδων (MIMO: Multiple-Input Multiple-Output), που θα αναλύσουμε στη συνέχεια της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Συγκεκριμένα, τα συστήματα αυτά προτάθηκαν τα τελευταία χρόνια και έγιναν αντικείμενο μελέτης και έρευνας εξαιτίας της δυνατότητας τους να διαχειρίζονται το διαθέσιμο εύρος ζώνης πιο αποδοτικά. Οι τάσεις της αγοράς δείχνουν να αποδέχονται τα συστήματα αυτά, τα οποία αν και βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο δείχνουν ότι μπορούν να προσφέρουν ευρυζωνικότητα και υψηλή ποιότητα υπηρεσιών.

1^ο Κεφάλαιο: Ασύρματα συστήματα επικοινωνιών

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί εισαγωγή στις βασικές έννοιες των σύγχρονων ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στις ψηφιακές τεχνικές καθώς και στις αρχές που ισχύουν για την διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Επίσης παρουσιάζονται τεχνικές που χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες ασύρματες επικοινωνίες.

1.1 Ιστορική αναδρομή

Η θεωρητική θεμελίωση της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας έγινε από τον Maxwell, ο οποίος ενοποίησε τη θεωρία του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού μέσω των ομώνυμων εξισώσεων, προβλέποντας την ηλεκτρομαγνητική φύση του φωτός καθώς και το ότι φως και ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται με κυματικές διαταραχές της ίδιας ταχύτητας [28].

Για πρώτη φορά το 1897, ο Marconi υλοποίησε ένα σύστημα ασύρματης μετάδοσης, τον τηλεγράφο, βασιζόμενος στη θεωρία του Maxwell. Οι πρώτες μεταδόσεις τηλεγραφικών μηνυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις πραγματοποιήθηκαν από το Marconi στις αρχές του εικοστού αιώνα, ενώ η ασύρματη μετάδοση φωνής σε μεγάλες αποστάσεις συνδυάστηκε με την εφεύρεση των λυχνίων ενίσχυσης και των ταλαντωτών κατά τη δεκαετία 1905-1915 [28].

Από την εποχή του Marconi μέχρι το 1940 η τεχνολογία των κεραιών επικεντρώθηκε στην κατηγορία των κεραιών σύρματος και σε συχνότητες μέχρι UHF. Από το 1940 άρχισαν να χρησιμοποιούνται και άλλοι τύποι κεραιών, όπως ανοικτών κυματοδηγών, χοανοκεραιών, κεραιών με ανακλαστήρα κ.λπ. Η γρήγορη ανάπτυξη της ηλεκτρονικής και της πληροφορικής σε συνδυασμό με την αντίστοιχη αύξηση του όγκου της πληροφορίας που διακινείται παγκοσμίως έχουν επιφέρει και αναμένεται να δώσουν ακόμη μεγαλύτερη ώθηση στο αντικείμενο των κεραιών και των ασύρματων ζεύξεων τόσο στην εισαγωγή νέων μεθόδων ανάλυσης σύνθετων κεραιών όσο και στην ανάπτυξη συστημάτων έξυπνων κεραιών [28].

1.2 Βασικές έννοιες

Στην ανάπτυξη νέων τεχνικών δικτύωσης οδήγησε η ζήτηση για ευρέως διαδεδομένες προσωπικές επικοινωνίες, που εξυπηρετούν κινητούς χρήστες φωνής και δεδομένων που κινούνται μέσα σε κτίρια, πόλεις ή χώρες [28].

1.2.1 Τρόποι μετάδοσης

Η μετάδοση των σημάτων στις τηλεπικοινωνίες γίνεται με δύο τρόπους, είτε με χρήση καλωδίων που λέγεται ενσύρματα είτε ασύρματα, δηλαδή πομπός και δέκτης δεν χρησιμοποιούν σύρματα για την μεταξύ τους επικοινωνία. Με τα ενσύρματα μέσα, όπως είναι οι γραμμές μεταφοράς, οι κυματοδηγοί, οι οπτικές ίνες, χρησιμοποιούνται κυρίως για να συνδέονται σημεία που είναι σταθερά. Όμως η ενσύρματη διάδοση έχει κάποια μειονεκτήματα, όπως η εκθετική απόσβεση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος καθώς αυξάνεται η απόσταση από την πηγή. Άλλο ένα μειονέκτημα είναι το μεγάλο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας ενός ενσύρματου δικτύου επικοινωνιών [28].

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι η αρχή για την ασύρματη μετάδοση και χρησιμοποιεί κεραιές για την εκπομπή και τη λήψη των σημάτων. Τα πλεονεκτήματα της ασύρματης μετάδοσης είναι η αλγεβρική απόσβεση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος καθώς αυξάνεται η απόσταση από την πηγή, το σχετικά μικρό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας των ασύρματων δικτύων και η δυνατότητα κινητών επικοινωνιών [28].

Στις ασύρματες επικοινωνίες χρησιμοποιούνται κεραιές διαφόρων τύπων, όπως διπολικές κεραιές, βροχοκεραίες, κεραιές τύπου Yagi, παραβολικά κάτοπτρα που χρησιμοποιούνται σε συνηθισμένες εφαρμογές, ενώ πιο σύνθετες χρησιμοποιούνται σε εξειδικευμένες εφαρμογές όπως ραντάρ, συστήματα πλοήγησης διαστημόπλοιων και πιο σύγχρονα κεραιές πολλαπλής εισόδου- πολλαπλής εξόδου (MIMO) για τηλεπικοινωνιακά δίκτυα υψηλών ταχυτήτων [28].

1.2.2 Μηχανισμοί διάδοσης

Πόσο καλά και αποδοτικά θα λειτουργήσει ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα, δεν εξαρτάται μόνο από τον τύπο των κεραιών που χρησιμοποιούνται αλλά και από φαινόμενα που επηρεάζουν τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Στη συνέχεια θα αναλυθούν κάποιοι από τους βασικούς μηχανισμούς που επηρεάζουν τη μετάδοση.

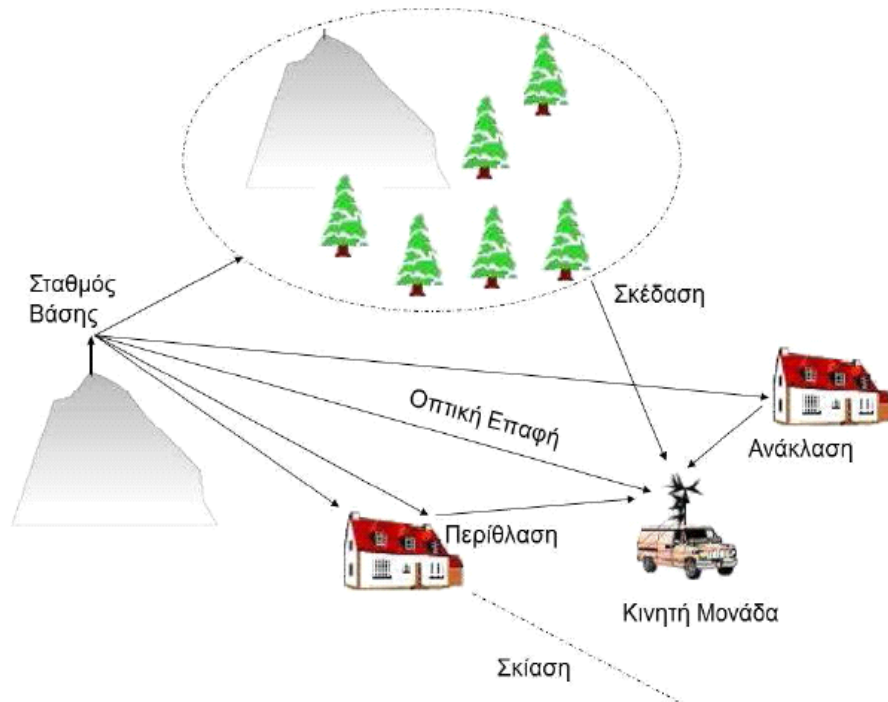
Στην ασύρματη μετάδοση το κανάλι είναι συνήθως η ατμόσφαιρα, δηλαδή ο ελεύθερος χώρος. Κατά την μετάδοση χρησιμοποιούμε ηλεκτρομαγνητικά κύματα τα οποία είναι κατάλληλα διαμορφωμένα ώστε να πετύχουμε βέλτιστη διάδοση μέσα στο κανάλι, χρησιμοποιώντας περιοχές συχνοτήτων που παρουσιάζουν την ελάχιστη απορρόφηση από την ατμόσφαιρα της γης. Σε οποιοδήποτε κανάλι μετάδοσης του σήματος, το κύριο χαρακτηριστικό του είναι ότι το μεταδιδόμενο σήμα αλλοιώνεται κατά τυχαίο τρόπο από μία ποικιλία μηχανισμών που επενεργούν σ' αυτό [27].

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται ευθύγραμμα και στις μεγάλες συχνότητες (>GHz) μπορούν να μοντελοποιηθούν σαν ακτίνες (τεχνική ray tracing). Συνεπώς, αλληλεπιδρώντας με το περιβάλλον, δημιουργούνται φαινόμενα ανάκλασης (reflection), διάθλασης (diffraction), σκέδασης (scattering) και ραδιοσκιάς (shadowing) που δυσκολεύουν την επικοινωνία του πομπού με τον δέκτη. Συχνά στις κινητές επικοινωνίες το εκπεμπόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα δεν φθάνει απευθείας στον δέκτη λόγω εμποδίων τα οποία διακόπτουν την οπτική επαφή (line-of-sight path) πομπού – δέκτη [27].

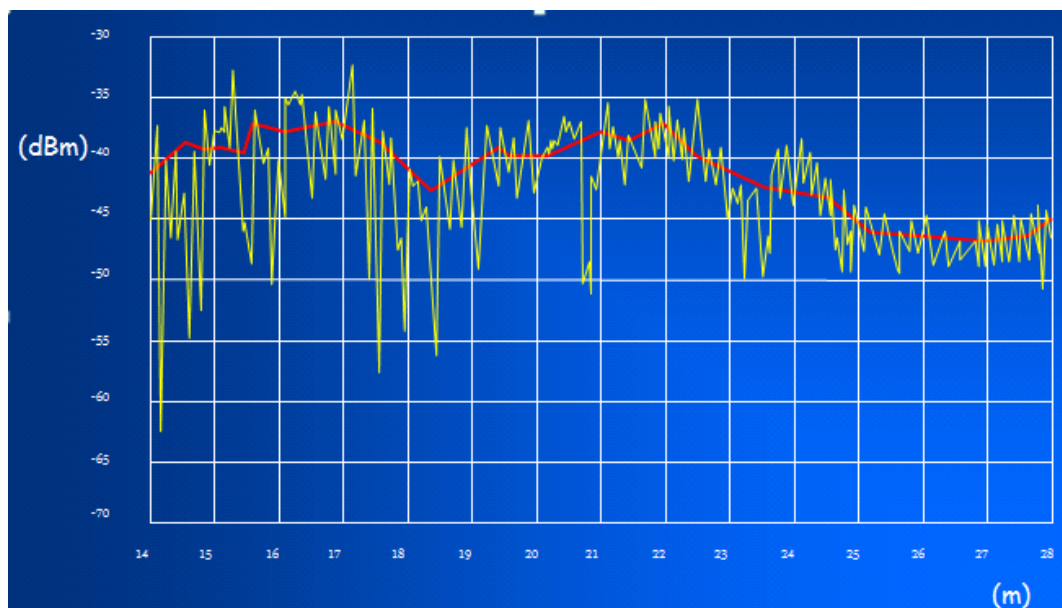
Στην πράξη, το λαμβανόμενο σήμα είναι αποτέλεσμα της υπέρθεσης (superposition) κυμάτων, που προέρχονται από όλες τις κατευθύνσεις, λόγω ανακλάσεων, διαθλάσεων και σκέδασης πάνω σε κτήρια, δέντρα, στοιχεία του γεωγραφικού ανάγλυφου (βουνά, λίμνες κλπ) και άλλα εμπόδια. Κατά συνέπεια, η ισχύς των εκπεμπόμενων σημάτων λαμβάνεται στο δέκτη μέσα από μια πολλαπλότητα διαδρομών διαφορετικής έντασης. Επίσης οι χρόνοι άφιξης των σημάτων από τις διάφορες διαδρομές είναι ανάλογοι προς τα μήκη των διαδρομών που διανύθηκαν. Έτσι εξαιτίας των πολλαπλών διαδρομών τις οποίες ακολουθεί το σήμα μέχρι να φτάσει στον δέκτη, το λαμβανόμενο σήμα απαρτίζεται από πολλαπλά αντίγραφα του αρχικά μεταδιδόμενου σήματος. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως πολυόδευση (multipath propagation) [27].

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 στην εικόνα 1. Η πολυόδευση του σήματος (multipath propagation), αποτελεί τη βασική αιτία εμφάνισης διαλείψεων στον δέκτη [27].



Εικόνα 1 Πολυόδευση σε ασύρματο κανάλι



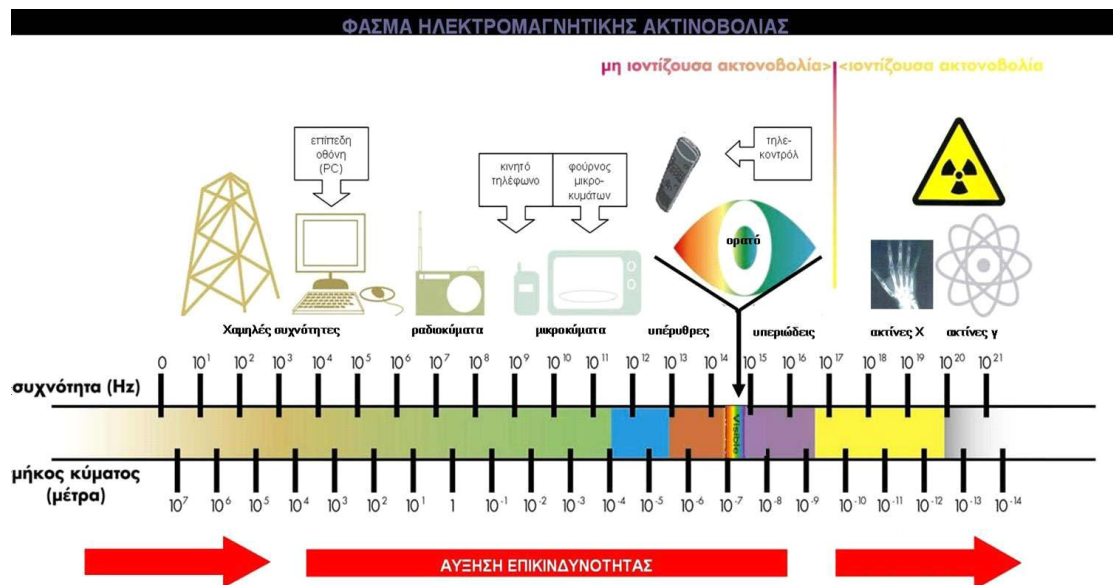
Εικόνα 2 Το τερματικό κινείται και το σήμα του επηρεάζεται από τους μηχανισμούς διάδοσης

Τέλος τα διάφορα μετεωρολογικά φαινόμενα και κυρίως η βροχή για συχνότητες μεγαλύτερες από 10 GHz, επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την

αξιοπιστία και τη διαθεσιμότητα των ασύρματων ζεύξεων. Οι ατμοσφαιρικές διαταραχές δημιουργούν κέντρα σκέδασης και ακτινοβολίας στην τροπόσφαιρα, ενώ η ιονόσφαιρα σε ευρεία ζώνη συχνοτήτων συμπεριφέρεται ως αγωγίμο σώμα απορροφώντας και ανακλώντας τα ραδιοκύματα. Επίσης η ηλιακή δραστηριότητα και το γήινο μαγνητικό πεδίο επιδρούν σε ορισμένες περιπτώσεις δραστικά στη διάδοση των ραδιοκυμάτων [28].

1.2.3 Ζώνες Συχνοτήτων

Στις τηλεπικοινωνίες χρησιμοποιούνται διάφορες συχνότητες για να εξυπηρετήσουν τις υπηρεσίες και τις εφαρμογές που εξυπηρετούν. Παρακάτω στην εικόνα 3 φαίνονται σε ποιες συχνότητες λειτουργεί η κάθε υπηρεσία.



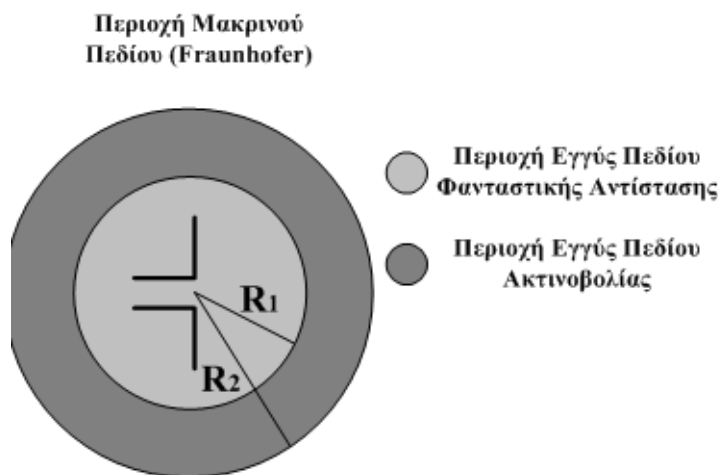
Εικόνα 3 Ζώνες συχνοτήτων

1.2.4 Περιοχές ακτινοβολίας κεραιών

Ο χώρος που περιβάλλει μία κεραία χωρίζεται σε τρεις περιοχές, την κοντινή περιοχή, την περιοχή Fresnel και την μακρινή περιοχή. Σε αυτές τις τρεις περιοχές η το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο της κεραίας συμπεριφέρεται με διαφορετικό τρόπο. Στην κοντινή περιοχή η κεραία δεν ακτινοβολεί και αυτή η απόσταση καθορίζεται από την ακτίνα $R_1 = 0.62 \cdot (D^3 / \lambda)^{1/2}$, όπου D είναι η μέγιστη διάσταση της κεραίας και λ το μήκος κύματος ($c = \lambda \cdot f$) και συνδέεται με τη συχνότητα λειτουργίας της κεραίας [28].

Η επόμενη περιοχή ονομάζεται ζώνη Fresnel και είναι ενδιάμεσα της κοντινής και της μακρινής περιοχής. Σε αυτή την περιοχή η κεραία παρουσιάζει χαρακτηριστικά ακτινοβολίας αλλά οι εγκάρσιες συνιστώσες διατηρούν ακτινική εξάρτηση. Αυτή η περιοχή περιορίζεται από την ακτίνα $R_2 = 2 \cdot D^2 / \lambda$ [28].

Τέλος υπάρχει η μακρινή περιοχή όπου χαρακτηριστικό είναι ότι οι εγκάρσιες συνιστώσες είναι ανεξάρτητες από την ακτινική συνιστώσα. Η περιοχή αυτή εκτείνεται πέρα από την ακτίνα R_2 και ουσιαστικά η κεραία ακτινοβολεί μόνο σε αυτή την περιοχή [28].



Εικόνα 4 Περιοχές ακτινοβολίας

1.2.5 Διάγραμμα ακτινοβολίας

Διάγραμμα ακτινοβολίας είναι η γραφική παράσταση που παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο ακτινοβολεί μια κεραία καθώς μεταβάλλεται το σημείο παρατήρησης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Στις πιο πολλές περιπτώσεις το διάγραμμα ακτινοβολίας προσδιορίζεται για την μακρινή περιοχή της κεραίας. Από

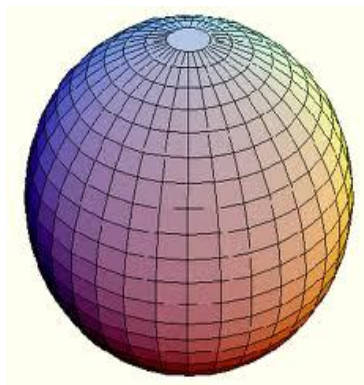
το διάγραμμα ακτινοβολίας μπορούμε να δύο μεγέθη, την ένταση ακτινοβολίας και την ένταση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου [26].

Από το διάγραμμα ακτινοβολίας μπορούμε να ερμηνεύσουμε την συμπεριφορά της κεραίας από τους λοβούς ακτινοβολίας. Λοβός ακτινοβολίας ονομάζεται το τμήμα του διαγράμματος που οριοθετείται από περιοχές πολύ ασθενούς, συνήθως μηδενικής έντασης ακτινοβολίας. Κύριος λοβός ονομάζεται αυτός που περιέχει τη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας. Δευτερεύων λοβός είναι κάθε λοβός ακτινοβολίας που δεν είναι κύριος. Επίσης υπάρχουν και οι πλευρικοί λοβοί οι οποίοι δεν περιέχουν τη διεύθυνση ενδιαφέροντος της κεραίας, ενώ οπίσθιος λοβός είναι αυτός που βρίσκεται στην αντίθετη διεύθυνση από τον κύριο λοβό [26].

1.2.6 Είδη κεραιών

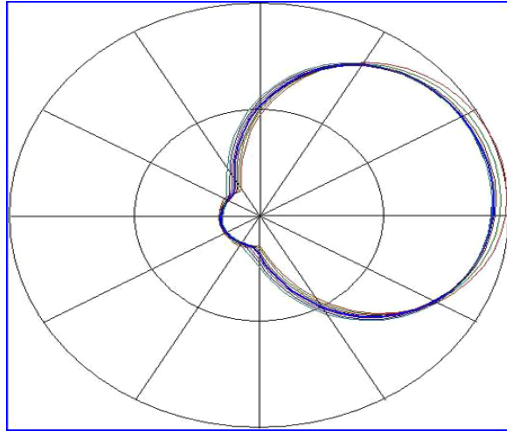
Υπάρχουν τρία βασικά είδη κεραιών σύμφωνα με τα διαγράμματα ακτινοβολίας τους:

- η ιστροπική κεραία, η οποία θεωρείται ιδανική και εκπέμπει χωρίς απώλειες την ίδια ισχύ προς όλες τις κατευθύνσεις (στην πραγματικότητα δεν μπορεί να κατασκευαστεί τέτοια κεραία).



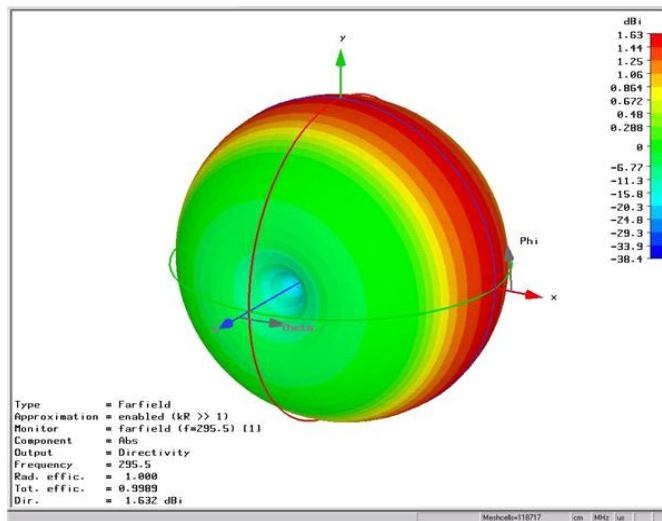
Εικόνα 5 Διάγραμμα ακτινοβολίας ιστροπικής κεραίας

- η κατευθυντική κεραία, η οποία λαμβάνει ή εκπέμπει με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα σε ορισμένες κατευθύνσεις.



Εικόνα 6 Διάγραμμα ακτινοβολίας κατευθυντικής κεραίας

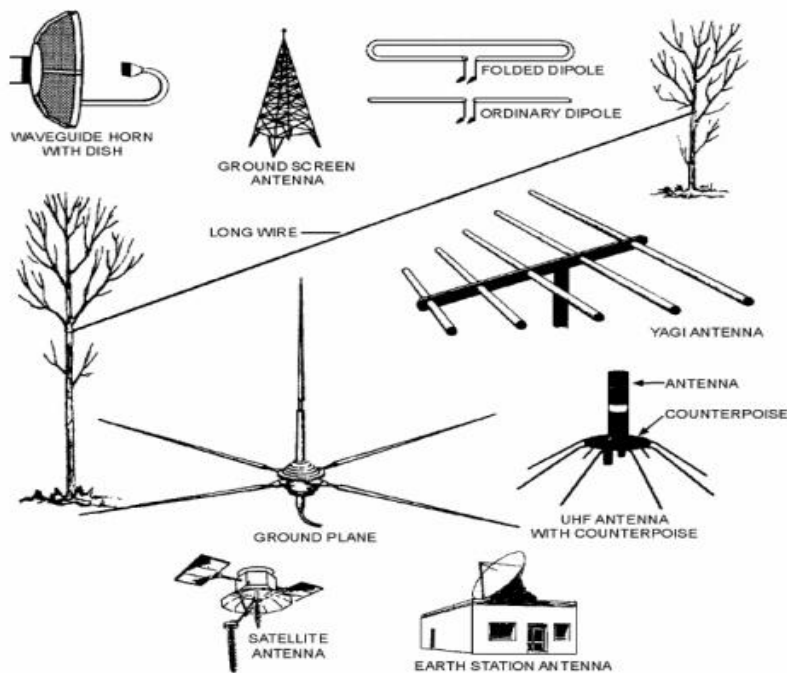
- η ομοιοκατευθυντική κεραία, η οποία σε ένα επίπεδο είναι κατευθυντική, αλλά δεν εκπέμπει καθόλου σε οποιοδήποτε κάθετο επίπεδο σε αυτό.



Εικόνα 7 Διάγραμμα ακτινοβολίας ομοιοκατευθυντικής κεραίας

1.2.7 Κατευθυντικότητα

Σε μία «πραγματική» κεραία και σε δεδομένη απόσταση από αυτή, η πυκνότητα εκπεμπόμενης ισχύος σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση είναι διαφορετική με τη πυκνότητα εκπεμπόμενης ισχύος σε άλλες κατευθύνσεις. Επομένως τώρα μπορούμε να ορίσουμε την έννοια της κατευθυντικότητας, ως την κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας [26].



Εικόνα 8 Διάφορες κεραίες

1.3 Τεχνικές διαμόρφωσης

Διαμόρφωση είναι η διαδικασία κωδικοποίησης πληροφοριών από μία πηγή μηνύματος με τρόπο κατάλληλο για μετάδοση. Γενικά εμπλέκει την μετάφραση ενός σήματος μηνύματος βασικής ζώνης σε ένα ζωνοπερατό σήμα με συχνότητες, που είναι πολύ υψηλές σε σύγκριση με την συχνότητα βασικής ζώνης. Το ζωνοπερατό σήμα λέγεται διαμορφωμένο σήμα και το μήνυμα βασικής ζώνης ονομάζεται διαμορφώνον σήμα. Η διαμόρφωση μπορεί να γίνει με μεταβολή του πλάτους, της φάσης ή της συχνότητας ενός υψίσυχνου φέροντος σύμφωνα με το πλάτος του σήματος πληροφορίας. Αποδιαμόρφωση είναι η διαδικασία απόσπασης του μηνύματος βασικής ζώνης από το φέρον, έτσι ώστε να μπορεί να υποστεί επεξεργασία και να ερμηνευτεί από τον επιθυμητό δέκτη [26].

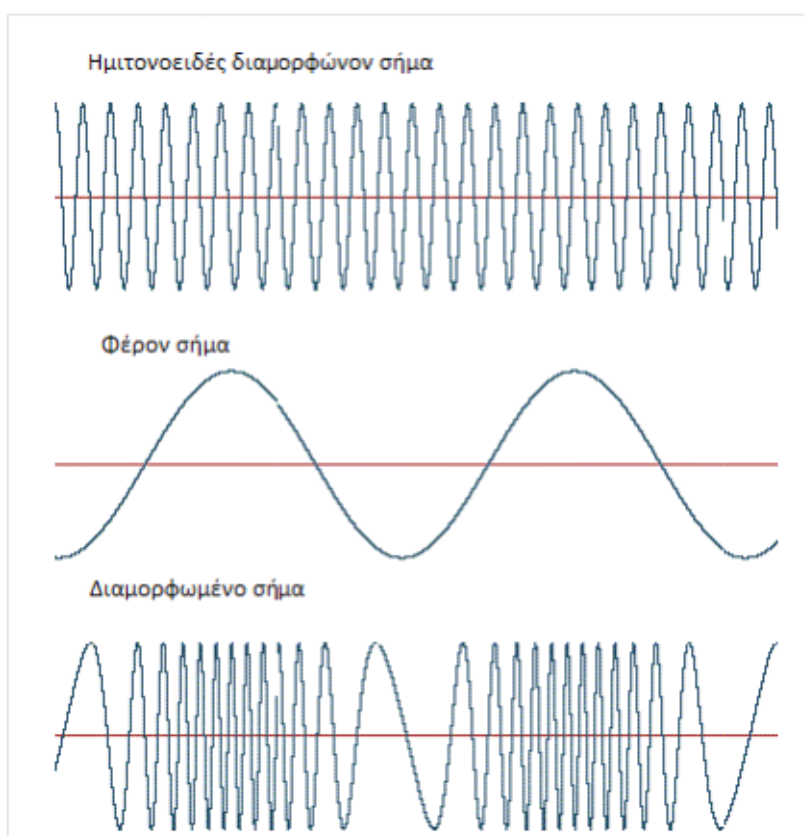
Καθώς η ψηφιακή διαμόρφωση προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα και ήδη χρησιμοποιείται για να αντικαταστήσει τα συμβατικά αναλογικά συστήματα, θα δώσουμε μεγαλύτερη έμφαση στις ψηφιακές διαμορφώσεις. Ωστόσο επειδή ακόμα τα αναλογικά συστήματα χρησιμοποιούνται θα αναφερθούμε εν συντομία και σε αυτά [26].

Στις ασύρματες επικοινωνίες υπάρχει μία μεγάλη ποικιλία τεχνικών διαμόρφωσης και η έρευνα συνεχίζει να είναι σε εξέλιξη. Αυτό συμβαίνει γιατί στις

ασύρματες επικοινωνίες είναι πολύ συχνές οι συνθήκες εχθρικών διαλείψεων και πολλαπλών διαδρομών στο κανάλι, επομένως είναι σημαντική η δημιουργία ενός σχήματος διαμόρφωσης του καναλιού το οποίο θα είναι ανθεκτικό στις εξασθενήσεις [26].

1.3.1 Αναλογική Διαμόρφωση συχνότητας και διαμόρφωση πλάτους

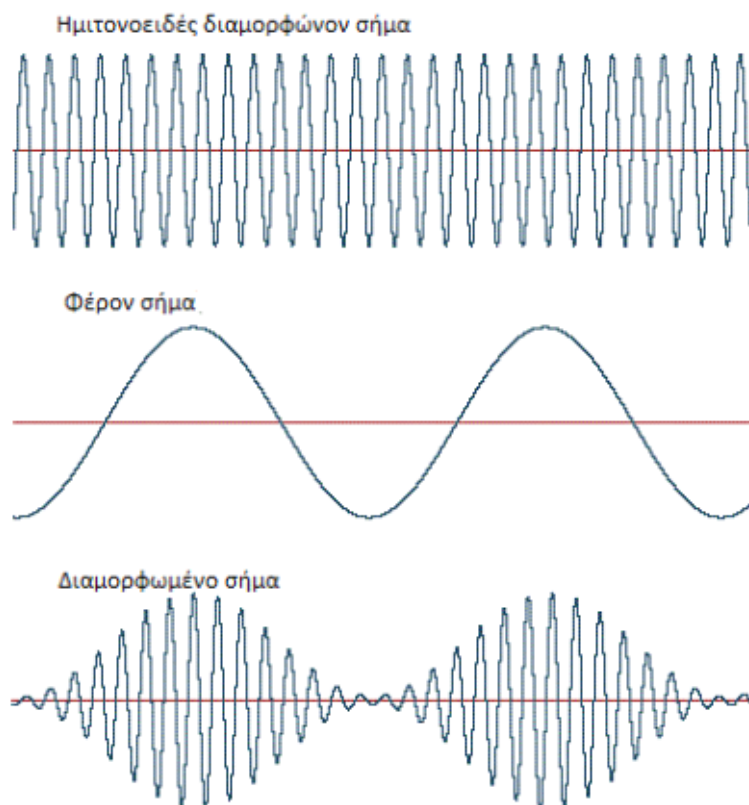
Η πιο συνηθισμένη τεχνική διαμόρφωσης, που χρησιμοποιείται σε ασύρματα συστήματα είναι η διαμόρφωση συχνότητας, την οποία διαφορετικά ονομάζουμε ς FM (frequency modulation). Σε αυτή το πλάτος του διαμορφωμένου φέροντος διατηρείται σταθερό, ενώ η συχνότητά του μεταβάλλεται ακολουθώντας τη μορφή του σήμα που μεταφέρει το μήνυμα. Με αυτό τον τρόπο τα σήματα FM έχουν όλες τις πληροφορίες τους στην φάση ή την συχνότητα του φέροντος. Αυτό συνεπάγεται μια μη γραμμική και πολύ γρήγορη βελτίωση στην ποιότητα λήψης [30].



Εικόνα 9 Διαμόρφωση συχνότητας

Η άλλη διαμόρφωση που υπάρχει για τα αναλογικά σήματα, ονομάζεται διαμόρφωση πλάτους και σε αυτή την περίπτωση μεταβάλλεται το πλάτος του φέροντος σύμφωνα με το σήμα πληροφορίας. Στα συστήματα που χρησιμοποιούν

διαμόρφωση πλάτους ή αλλιώς AM (amplitude modulation), υπάρχει μια γραμμική σχέση ανάμεσα στην ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος και την ισχύ του, αφού τα σήματα AM προσθέτουν τα σχετικά πλάτη του διαμορφώνοντος σήματος στο φέρον. Επομένως τα σήματα AM έχουν όλες τις πληροφορίες τους στο πλάτος του φέροντος. Η FM έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με την AM και γι αυτό επιλέγεται συχνότερα για τα συστήματα των ασύρματων επικοινωνιών.



Εικόνα 10 Διαμόρφωση πλάτους

Το πλεονέκτημα των AM σημάτων είναι ότι μπορούν εύκολα να παραχθούν σε μία συσκευή AM πομπού και να ληφθεί από απλούς δέκτες χωρίς ιδιαίτερα περίπλοκα χαρακτηριστικά. Επίσης, μπορεί εύκολα να συντονιστεί σε συνηθισμένους δέκτες. Όμως το πιο βασικό της μειονέκτημα είναι η σπατάλη ενέργειας που πραγματοποιείται. Συγκεκριμένα τα δύο τρίτα της ισχύος ενός AM σήματος συσσωρεύονται στο φέρον σήμα, το οποίο δεν περιλαμβάνει καμία πληροφορία. Οι πλευρικές ζώνες συχνοτήτων εκμεταλλεύονται το ένα τρίτο της ισχύος ενώ περιέχουν την ίδια ακριβώς πληροφορία. Δηλαδή, μόλις το ένα έκτο της συνολικής ισχύος του AM πομπού χρησιμοποιείται με πιο χρήσιμο και παραγωγικό σκοπό.

Επίσης η AM διαμόρφωση είναι αρκετά ευαίσθητη στον ηλεκτρονικό θόρυβο σε σχέση με την διαμόρφωση FM. Ωστόσο το AM σήμα υπερτερεί στις χαμηλές συχνότητες και γι' αυτό τον λόγο χρησιμοποιείται ακόμα σε ζώνες μακρών και μεσαίων κυμάτων. Τα κύρια χαρακτηριστικά που ορίζουν την διαμόρφωση FM επικρατέστερη από την AM είναι η ακουστική ποιότητα του σήματος και η πλήρης απουσία θορύβου. Επίσης, σημαντικό πλεονέκτημα της διαμόρφωσης FM θεωρείται και η δυνατότητα της αυτόματης ρύθμισης. Αυτή η δυνατότητα έχει ως αποτέλεσμα ένα καθαρό σήμα στην έξοδο του δέκτη, δηλαδή έστω ότι φθάνουν δύο σήματα στον δέκτη, η διαμόρφωση FM έχει την δυνατότητα να επιλέγει το σήμα με την ισχυρότερη ένταση. Το βασικότερο, ίσως, μειονέκτημα της FM διαμόρφωσης είναι το εύρος συχνότητας που απαιτεί, καθώς η απόκλιση από τον έναν ραδιοφωνικό σταθμό στον άλλον πρέπει να είναι μεγάλη. Αυτή η απόκλιση έχει βέβαια σαν αποτέλεσμα την καθαρότερη λήψη σήματος στον δέκτη. Επιπλέον σε ένα σύστημα FM υπάρχει η δυνατότητα ο δείκτης διαμόρφωσης, συνεπώς και η κατάληψη εύρους ζώνης, να μπορεί να κυμαίνεται ανάμεσα σε διάφορες τιμές, προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη επίδοση σήματος προς θόρυβο. Ο σημαντικότερος λόγος που επιλέγονται πιο συχνά στις ασύρματες επικοινωνίες τα συστήματα FM, συγκριτικά με την τεχνική AM, είναι η δυνατότητά τους να ανταλλάσσουν εύρος ζώνης για να αλλάξουν το σηματοθορυβικό λόγο [30].

1.3.2 Ψηφιακές διαμορφώσεις

Τα σύγχρονα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών χρησιμοποιούν τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης διότι η συνεχής πρόοδος της τεχνολογίας έχει καταστήσει αυτές τις τεχνικές πιο αποτελεσματικές αλλά και πιο οικονομικές σε σχέση με τις αναλογικές.

Οι ψηφιακές διαμορφώσεις εμφανίζουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με την αναλογικές. Μερικά από αυτά είναι η μεγαλύτερη ανοχή στο θόρυβο των ψηφιακών συστημάτων, ευκολότερη πολύπλεξη των διαφόρων μορφών πληροφοριών και η παροχή μεγαλύτερης ασφάλειας για τη μετάδοση των δεδομένων. Επίσης οι ψηφιακές μεταδόσεις διευκολύνουν τους ψηφιακούς κωδικούς ελέγχου σφαλμάτων, που ανιχνεύουν ή και διορθώνουν σφάλματα στη μετάδοση και υποστηρίζουν πολύπλοκες τεχνικές επεξεργασίας όπως κωδικοποίηση πηγής, κρυπτογράφηση και εξισορρόπηση για να βελτιώσουν τη συνολική επίδοση της επικοινωνιακής ζεύξης. Νέοι

επεξεργαστές προγραμματιζόμενοι, ψηφιακού σήματος πολλαπλών σκοπών έχουν καταστήσει δυνατή την υλοποίηση ψηφιακών διαμορφωτών και αποδιαμορφωτών εξ' ολοκλήρου σε λογισμικό. Αντί να υπάρχει μια συγκεκριμένη σχεδίαση modem (διαμορφωτής - αποδιαμορφωτής) ως υλικό που χρησιμοποιεί παγιωμένες τεχνικές, οι συγχωνευμένες υλοποιήσεις σε λογισμικό επιτρέπουν τώρα μεταβολές και βελτιώσεις χωρίς να χρειάζεται η εκ νέου σχεδίαση ή αντικατάσταση του modem [26].

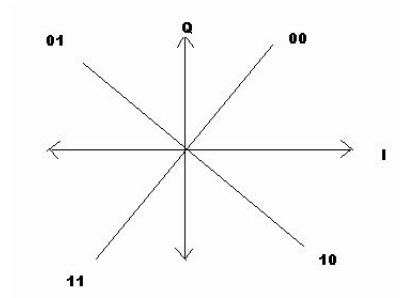
Το διαμορφώνον σήμα, στα ψηφιακά συστήματα ασύρματων επικοινωνιών, μπορεί να αναπαρασταθεί ως μια χρονική ακολουθία συμβόλων ή παλμών, όπου το κάθε σύμβολο έχει M πεπερασμένες καταστάσεις. Κάθε σύμβολο αναπαριστά n bit πληροφοριών. Πλέον στα σύγχρονα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών χρησιμοποιούνται πολλές ψηφιακές τεχνικές και αναμένονται και άλλες, ωστόσο πολλές από αυτές τις τεχνικές έχουν λεπτές διαφορές μεταξύ τους και κάθε μία ανήκει σε μία οικογένεια σχετικών μεθόδων διαμόρφωσης [26].

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες με τους οποίους γίνεται η επιλογή της κατάλληλης διαμόρφωσης. Η επιλογή του επιθυμητού σχήματος διαμόρφωσης γίνεται με σκοπό να πετύχουμε χαμηλούς ρυθμούς σφαλμάτων σε bit με χαμηλό σηματοθορυβικό λόγο. Σε αυτή την περίπτωση το σύστημα θα λειτουργεί καλύτερα σε συνθήκες πολλαπλής διαδρομής και διαλείψεων, θα καταλαμβάνει ελάχιστο εύρος ζώνης και θα είναι πιο εύκολο και οικονομικότερο να υλοποιηθεί [26].

Οι δύο βασικότεροι παράγοντες για να επιλέξουμε το κατάλληλο σχήμα διαμόρφωσης είναι πρώτον η φασματική αποδοτικότητα, δηλαδή για τις συνθήκες που έχουμε κάθε φορά ποια είναι η κατάλληλη διαμόρφωση που χρησιμοποιεί με τον καλύτερο τρόπο το διαθέσιμο εύρος ζώνης και δεύτερον η αποδοτικότητα ισχύος που περιγράφει τη δυνατότητα μιας τεχνικής διαμόρφωσης να διατηρεί την πιστότητα του ψηφιακού μηνύματος σε χαμηλά επίπεδα ισχύος [26].

Όπως συμβαίνει με τις αναλογικές διαμορφώσεις, όμοια και στις ψηφιακές συναντάμε ψηφιακή διαμόρφωση πλάτους (ASK-Amplitude Shift Keying), ψηφιακή διαμόρφωση συχνότητας (FSK-Frequency Shift Keying) και ψηφιακή διαμόρφωση φάσης (PSK-Phase Shift Keying). Σε αυτές τις διαμορφώσεις, υπάρχουν αρκετές υποκατηγορίες, ανάλογα με τον αριθμό των συμβόλων που θα επεξεργαστεί κάθε σύστημα, επομένως προκύπτουν για παράδειγμα η BPSK δυαδική διαμόρφωση φάσης όπου μεταφέρονται ταυτόχρονα δύο bit σε κάθε σύμβολο, η QPSK που είναι διαμόρφωση μετατόπισης φάσης με ορθογωνισμό και η MSK (Minimum Shift

Keying) διαμόρφωση ελάχιστης μετατόπισης που είναι ειδικός τύπος διαμόρφωσης συχνότητας [26].



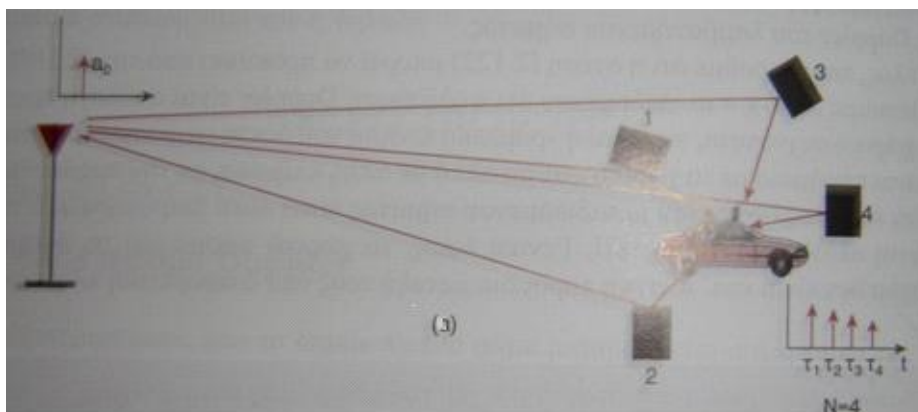
Εικόνα 11 QPSK

2^ο Κεφάλαιο: Ασύρματο κανάλι

Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω ενός ασύρματου καναλιού είναι πολύπλοκη διαδικασία η οποία χαρακτηρίζεται από ένα πλήθος φαινομένων όπως η πολυόδευση, η σκίαση από διάφορα αντικείμενα κα. Μια ακριβής μαθηματική περιγραφή αυτής της διαδικασίας, μας είναι είτε άγνωστη ή πολύ σύνθετη. Για αυτό το λόγο, έχουν γίνει μεγάλες προσπάθειες 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. Ο κύριος στόχος σε αυτό το κεφάλαιο είναι να περιγράψουμε εν συντομία τα βασικά χαρακτηριστικά ενός οποιουδήποτε ασυρμάτου καναλιού [28].

2.1 Διαλείψεις σήματος

Το βασικότερο φαινόμενο στις ασύρματες επικοινωνίες είναι οι διαλείψεις. Έστω ότι θεωρούμε ακίνητο δέκτη σε ένα περιβάλλον με πολυδιαδρομική διάδοση και φτάνουν στον δέκτη διαδοχικές εκδόσεις του εκπεμπόμενου σήματος από πολλαπλούς μηχανισμούς διάδοσης. Κάθε συνιστώσα καταφτάνει στον δέκτη με διαφορετική χρονική καθυστέρηση και κάθε μία συνιστώσα έχει σχετική ολίσθηση φάσης. Αυτές στη συνέχεια προσθέτονται ή αφαιρούνται ανάλογα με τη χρονική στιγμή που έχουν φτάσει στον δέκτη. Αν ο δέκτης κινείται τότε αυτό το φαινόμενο είναι ακόμα πιο έντονο [28].



Εικόνα 12 Πολλαπλές διαδρομές

Υπάρχουν δύο ειδών διαλείψεις, οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας και οι διαλείψεις μικρής κλίμακας. Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας εμπεριέχουν δύο βασικά χαρακτηριστικά της ραδιομετάδοσης τις απώλειες διαδρομής, δηλαδή μεταβολή της εξασθένησης με την απόσταση, και τη σκίαση δηλαδή την τυχαία μεταβολή της εξασθένησης για συγκεκριμένη απόσταση. Οι διαλείψεις αυτής της κατηγορίας εκφράζουν τη μέση εξασθένηση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος εξαιτίας της κίνησης σε μεγάλες περιοχές. Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας περιγράφουν τη μεταβολή των χαρακτηριστικών του σήματος, όπως πλάτος και φάση, για μετατοπίσεις του κινητού σταθμού της τάξης του $\lambda/2$. Οι διαλείψεις αυτής της κατηγορίας οφείλονται στη χρονική διασπορά του σήματος λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης και στη χρονική μεταβολή του διαύλου λόγω μετακίνησης του δέκτη, αλλά και των σκεδαστών που συμμετέχουν στη διάδοση [28].

Στην ιδανική περίπτωση μιας επικοινωνίας πομπού και δέκτη στον ελεύθερο χώρο (χωρίς εμπόδια ή ανακλώσες επιφάνειες), οι απώλειες διάδοσης λόγω απόστασης χαρακτηρίζονται από το νόμο του Friis σύμφωνα με τη σχέση:

Εξίσωση 1 Νόμος Friis

$$\frac{P_r}{P_t} = G_r * G_t * \left(\frac{\lambda}{4 * \pi * d} \right)^2$$

2.2 Παράμετροι καναλιών με πολλαπλές διαδρομές

Για τον προσδιορισμό των επιδράσεων των βραχύχρονων διαλείψεων, μας ενδιαφέρει να γνωρίζουμε τη δομή των πολλαπλών διαδρομών των καναλιών σε ένα ασύρματο σύστημα επικοινωνιών. Έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές μέθοδοι για τη μελέτη της συμπεριφοράς των ραδιοκαναλιών. Αυτές οι μετρήσεις πραγματοποιούνται είτε στο πεδίο του χρόνου στέλνοντας άμεσα παλμούς RF, είτε στο πεδίο της συχνότητας σαρώνοντας την κατάλληλη περιοχή συχνοτήτων. Παρακάτω θα αναφέρουμε τις παραμέτρους οι οποίες χαρακτηρίζουν την συμπεριφορά του καναλιού τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας [27].

2.2.1 Παράμετροι χρονικής διασποράς

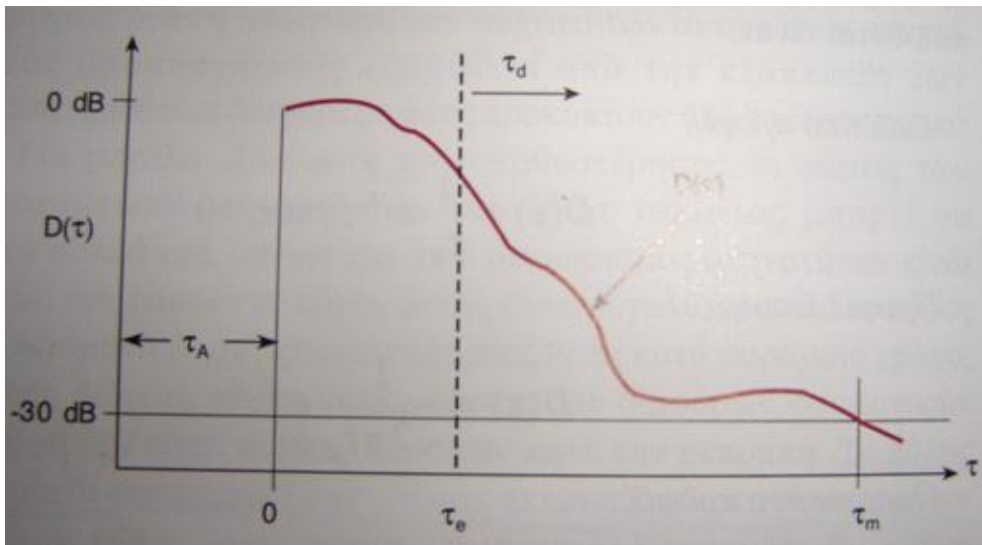
Για να μπορέσει να υπολογιστεί η διασπορά καθυστέρησης εκπέμπεται ένας κρουστικός παλμός. Λόγω των πολλαπλών διαδρομών αυτός ο παλμός καταφθάνει στον δέκτη σαν μια σειρά κρουστικών παλμών με διαφορετικές εξασθενήσεις και καθυστερήσεις, επομένως η συνολική χρονική διασπορά μεγαλώνει σε μεγάλο βαθμό [27].

Όταν αυξάνει ο αριθμός των σκεδαστών οι παλμοί που λαμβάνονται γίνονται πλέον ένας συνεχής παλμός και ονομάζεται διασπορά καθυστέρησης. Γενικά ισχύει ότι ένας κρουστικός παλμός που διανύει μικρή απόσταση θα φθάσει στον δέκτη με μικρή καθυστέρηση. Ωστόσο στις ασύρματες επικοινωνίες οι ανθρώπινες κατασκευές είναι από διάφορα υλικά από τα οποία άλλα προκαλούν ανακλάσεις και άλλα απορροφούν την ακτινοβολία. Επομένως ο κρουστικός παλμός που φθάνει πρώτος μπορεί να μην είναι ο ισχυρότερος. Ανάλογα με τη θέση που έχει ο δέκτης, ένα ψηλό κτίριο με υαλοπίνακες μπορεί να προκαλέσει ισχυρό ανακλώμενο σήμα, ακόμα κι αν βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση [27].

Ο αναμενόμενος βαθμός διασποράς καθυστέρησης καθορίζεται μέσω της μέτρησης του προφίλ καθυστέρησης ισχύος του καναλιού. Τα προφίλ καθυστέρησης ισχύος μετριοούνται με διάφορες τεχνικές και παριστάνονται γραφικά ως διαγράμματα της σχετικής λαμβανόμενης ισχύος σε συνάρτηση της επιπρόσθετης καθυστέρησης ως προς μία σταθερή χρονική αναφορά. Το προφίλ καθυστέρησης ισχύος δίνει μια ένδειξη για τη διασπορά ή την κατανομή της μεταδιδόμενης ισχύος πάνω από τις διάφορες διαδρομές [27].

- Καθυστέρηση πρώτης άφιξης (τ_A): είναι η καθυστέρηση της πρώτης διαδρομής άφιξης που μετρείται στον δέκτη. Αυτή η καθυστέρηση είναι συνήθως η καθυστέρηση της ελάχιστης διαδρομής από τον πομπό στον δέκτη και χρησιμοποιείται ως αναφορά για τις υπόλοιπες μετρήσεις. Οποιαδήποτε καθυστέρηση προς τα δεξιά αυτής λέγεται επιπρόσθετη καθυστέρηση.
- Μέση επιπρόσθετη καθυστέρηση (τ_e): είναι η μέση καθυστέρηση που μετρείται σε σχέση με την καθυστέρηση πρώτης άφιξης.
- RMS εξάπλωση καθυστέρησης (τ_d): ο όρος αυτός χρησιμοποιείται συνήθως ως μέτρο της εξάπλωσης καθυστέρησης και είναι η τυπική απόκλιση από τη μέση επιπρόσθετη καθυστέρηση.

- Μέγιστη επιπρόσθετη καθυστέρηση (τ_m): μετριέται με αναφορά κάποια συγκεκριμένη στάθμη ισχύος.



Εικόνα 13 Προφίλ καθυστέρησης ισχύος

Για να μπορούν να συγκριθούν διάφοροι δίαυλοι με πολλαπλές διαδρομές και για την ανάπτυξη γενικών κανόνων σχεδίασης ασύρματων συστημάτων, χρησιμοποιούνται παράμετροι που ποσοτικοποιούν χονδρικά τα κανάλια με πολλαπλές διαδρομές. Μερικά βασικά προφίλ καθυστέρησης ισχύος που χρησιμοποιούνται είναι [27]:

- Εκθετικό προφίλ:
$$D(\tau) = \frac{1}{\tau_d} e^{-\frac{\tau}{\tau_d}}$$

Εξίσωση 2 Εκθετικό προφίλ

, όταν $\tau_d > 0$

- Προφίλ Gauss:
$$D(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\tau_d}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\tau}{\tau_d}\right)^2}$$

Εξίσωση 3 Προφίλ Gauss

- Ομοιόμορφο προφίλ:
$$D(\tau) = \frac{\tau_d}{2}$$

Εξίσωση 4 ομοιόμορφο προφίλ

όταν $0 \leq \tau \leq \tau_d$

2.2.2 Εύρος ζώνης συνοχής

Η ύπαρξη διαφορετικών χρονοκαθυστερήσεων στα διάφορα σήματα συντελεί ώστε οι στατιστικές ιδιότητες δύο σημάτων διαφορετικών συχνοτήτων να γίνονται στην ουσία ανεξάρτητες, όταν η απόσταση των συχνοτήτων αυτών είναι αρκετά μεγάλη. Ο βαθμός αποσυσχέτισης εξαρτάται από την εξάπλωση των χρονοκαθυστερήσεων, καθώς οι διαφορές φάσης προκύπτουν από τα διαφορετικά μήκη διαδρομών. Για μεγάλη εξάπλωση χρονοκαθυστέρησης, οι φάσεις των εισερχόμενων φασματικών συνιστωσών του ίδιου σήματος μπορεί να μεταβάλλονται κατά πολλά rad ακόμη κι αν ο διαχωρισμός συχνοτήτων είναι πολύ μικρός [27].

Σήματα των οποίων το εύρος ζώνης είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης στο οποίο οι φασματικές συνιστώσες επηρεάζονται κατά παρόμοιο τρόπο, παραμορφώνονται, διότι τα πλάτη και οι φάσεις των διαφόρων φασματικών συνιστωσών στη λήψη δεν είναι οι ίδιες που ήταν κατά την εκπομπή. Το εύρος ζώνης μέσα στο οποίο οι φασματικές συνιστώσες επηρεάζονται κατά παρόμοιο τρόπο είναι γνωστό ως εύρος ζώνης συνοχής και συμβολίζεται B_c [27].

Ενώ η εξάπλωση χρονοκαθυστέρησης είναι ένα φυσικό φαινόμενο το οποίο προέρχεται από τις πολλαπλές διαδρομές διάδοσης που οφείλονται σε ανακλάσεις και σκεδάσεις, το εύρος ζώνης συνοχής είναι μια οριζόμενη σχέση που παράγεται από την RMS εξάπλωση καθυστέρησης τ_d . Το εύρος ζώνης συνοχής είναι ένα στατιστικό μέτρο που χαρακτηρίζει την περιοχή συχνοτήτων μέσα στην οποία το κανάλι επιτρέπει να διέλθουν όλες οι φασματικές συνιστώσες που έχουν περίπου ίσο κέρδος και γραμμική φάση. Το εύρος ζώνης συνοχής είναι η περιοχή συχνοτήτων μέσα στην οποία δύο συνιστώσες συχνότητας εμφανίζουν μεγάλη πιθανότητα συσχέτισης πλάτους [27].

Όταν δύο συχνότητες απέχουν περισσότερο από το εύρος ζώνης συνοχής αυτές επηρεάζονται κατά εντελώς διαφορετικό τρόπο από το κανάλι. Αν η συνάρτηση συσχέτισης δύο σημάτων με συχνότητες f_1 και f_2 είναι πάνω από 0.9 τότε ισχύει η

σχέση: $B_c = \frac{1}{50\tau_d}$. Εάν ο ορισμός δεν είναι τόσο αυστηρός και η συνάρτηση συσχέτισης στο πεδίο συχνότητας έχει τιμή μεγαλύτερη από 0.5 τότε το εύρος ζώνης

συνοχής δίνεται από τη σχέση: $B_c = \frac{1}{5\tau_d}$ [27].

Το εύρος ζώνης συνοχής είναι διαφορετικό σε ημιαστικές και αστικές περιοχές, γιατί οι τιμές για την RMS καθυστέρηση σε αυτές τις περιοχές είναι διαφορετικές,

λόγω της διαφορετικής μορφολογίας που εμφανίζουν οι περιοχές αυτές στο ασύρματο περιβάλλον. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα κτίρια και οι υπόλοιπες ανθρώπινες κατασκευές είναι διαφορετικές [27].

2.2.3 Εξάπλωση Doppler και χρόνος συνοχής

Η εξάπλωση χρονοκαθυστέρησης και το εύρος ζώνης συνοχής περιγράφουν την ιδιότητα του καναλιού να εμφανίζει χρονική διασπορά σε κάποια γεωγραφική περιοχή και δίνουν την εικόνα του καναλιού στο πεδίο της συχνότητας. Οι παράμετροι αυτοί, όμως, δεν δίνουν καμία πληροφορία για τη μεταβολή του καναλιού στο πεδίο του χρόνου, η οποία οφείλεται είτε στη σχετική κίνηση μεταξύ του δέκτη και του πομπού, είτε στην κίνηση αντικειμένων στο περιβάλλον που λειτουργεί ο υπόψη δίαυλος [27].

Η εξάπλωση Doppler και ο χρόνος συνοχής είναι παράμετροι που περιγράφουν τη συμπεριφορά του καναλιού στο πεδίο του χρόνου και σε μικρή περιοχή γύρω από τον δέκτη. Η εξάπλωση Doppler είναι ένα μέτρο της διεύρυνσης του φάσματος που προκαλείται από τον ρυθμό χρονικής μεταβολής του καναλιού και ορίζεται ως η περιοχή συχνοτήτων στην οποία το λαμβανόμενο σήμα Doppler είναι μη μηδενικό [27].

Η παράμετρος που εκφράζει την εξάπλωση Doppler και χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίζει στο πεδίο του χρόνου, την ιδιότητα του καναλιού να εμφανίζει διασπορά συχνότητας είναι ο χρόνος συνοχής C_T . Ο χρόνος συνοχής και η εξάπλωση

Doppler συνδέονται από τη σχέση: $C_T = \frac{1}{f_m}$ [27].

Ο χρόνος συνοχής είναι μια στατιστική μέτρηση του χρονικού διαστήματος, στο οποίο η κρουστική απόκριση του καναλιού είναι ουσιαστικά αμετάβλητη και ποσοτικοποιεί την ομοιότητα της απόκρισης του καναλιού στις διάφορες χρονικές στιγμές. Με άλλα λόγια ο χρόνος συνοχής είναι το χρονικό διάστημα στο οποίο δύο λαμβανόμενα σήματα έχουν μεγάλη πιθανότητα να εμφανίζουν συσχέτιση πλάτους. Αν το αντίστροφο εύρος ζώνης του σήματος βασικής ζώνης είναι μεγαλύτερο από τον χρόνο συνοχής του καναλιού, τότε ο δίαυλος θα μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του σήματος βασικής ζώνης και θα προκαλεί παραμόρφωση στο λαμβανόμενο σήμα. Αν ο χρόνος συνοχής αναφέρεται ως το χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του οποίου η συνάρτηση χρονικής συσχέτισης έχει τιμή μεγαλύτερη από 0.5, τότε δίνεται από τη

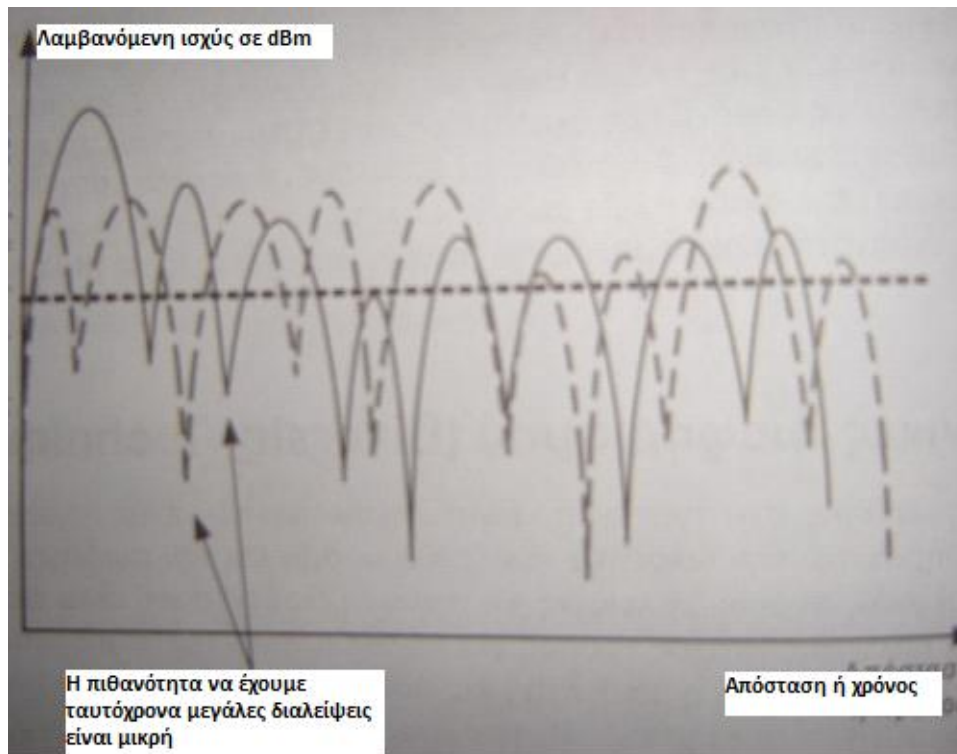
σχέση: $C_T = \frac{9}{16\pi f_m}$. Ο ορισμός του χρόνου συνοχής δείχνει ότι δύο σήματα που φθάνουν με καθυστέρηση μεταξύ τους μεγαλύτερη από C_T , επηρεάζονται κατά διαφορετικό τρόπο από τον δίαυλο [27].

3^ο Κεφάλαιο: Τεχνικές Διαφορισμού

Στα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών, ένας παράγοντας που υποβαθμίζει σημαντικά την ποιότητα των ζεύξεων άρα και την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών είναι οι διαλείψεις. Οι τεχνικές διαφορισμού είναι ένας σχετικά εύκολος αλλά και πολύ αποδοτικός τρόπος για να αντιμετωπιστούν οι επιπτώσεις των διαλείψεων και να βελτιωθεί η ποιότητα μιας ασύρματης ζεύξης. Οι τεχνικές αυτές εκμεταλλεύονται την τυχαία μεταβολή των χαρακτηριστικών του ασύρματου καναλιού [28].

Συγκεκριμένα σε μία τεχνική διαφορισμού, το σύστημα εκπομπής και λήψης χρησιμοποιεί πολλά κανάλια, δηλαδή πολλαπλές εκδοχές του εκπεμπόμενου ή λαμβανόμενου σήματος, που ονομάζονται κλάδοι διαφορισμού και είναι μεταξύ τους ανεξάρτητα ή ασυσχέτιστα σε μεγάλο βαθμό. Επομένως αν ένα κανάλι παρουσιάζει έντονες διαλείψεις ή γενικά δυσμενείς συνθήκες διάδοσης η πιθανότητα να παρουσιάζουν τις ίδιες δυσμενείς συνθήκες, ταυτόχρονα και τα υπόλοιπα κανάλια είναι πολύ χαμηλή. Με τις τεχνικές διαφορισμού μπορεί να επιτευχθεί βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο μέχρι και 20-30 dB [28].

Το ζητούμενο στην υλοποίηση μιας τεχνικής διαφορισμού είναι ο καθορισμός του τρόπου με τον οποίο δημιουργούνται τα ανεξάρτητα κανάλια και ο τρόπος με τον οποίο τα σήματα από τα ανεξάρτητα κανάλια συνδυάζονται, για να βελτιωθεί η ποιότητα της ζεύξης. Ο παράγοντας που διαφοροποιεί τα κανάλια μεταξύ τους δεν είναι απαραίτητα ο φυσικός διαχωρισμός των διαφορετικών διαδρομών που μπορεί να ακολουθούν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα κατά τη διάδοσή τους. Τα κανάλια μπορεί να διαφοροποιούνται ανάλογα με οποιοδήποτε παράγοντα τα καθιστά μεταξύ τους ανεξάρτητα ή ασυσχέτιστα σε μεγάλο βαθμό. Επομένως έχουμε διαφορική εκπομπή / λήψη χώρου όπου έχουμε πολλαπλές κεραίες για εκπομπή και λήψη, διαφορική εκπομπή / λήψη συχνότητας όπου τα διαφορετικά κανάλια αντιστοιχούν σε διαφορετικές ραδιοσυχνότητες, διαφορική εκπομπή / λήψη πόλωσης και άλλες τεχνικές ή συνδυασμούς αυτών. Η επιλογή και ο τρόπος υλοποίησης μιας συγκεκριμένης τεχνικής εξαρτάται από τις παραμέτρους και τις απαιτήσεις του συστήματος όπου πρόκειται να εφαρμοστεί [28].



Εικόνα 14 Διαλείψεις σε ασυσχέτιστους διαύλους

3.1 Διαφορισμός Χώρου ή Κεραίας (Space or Antenna Diversity)

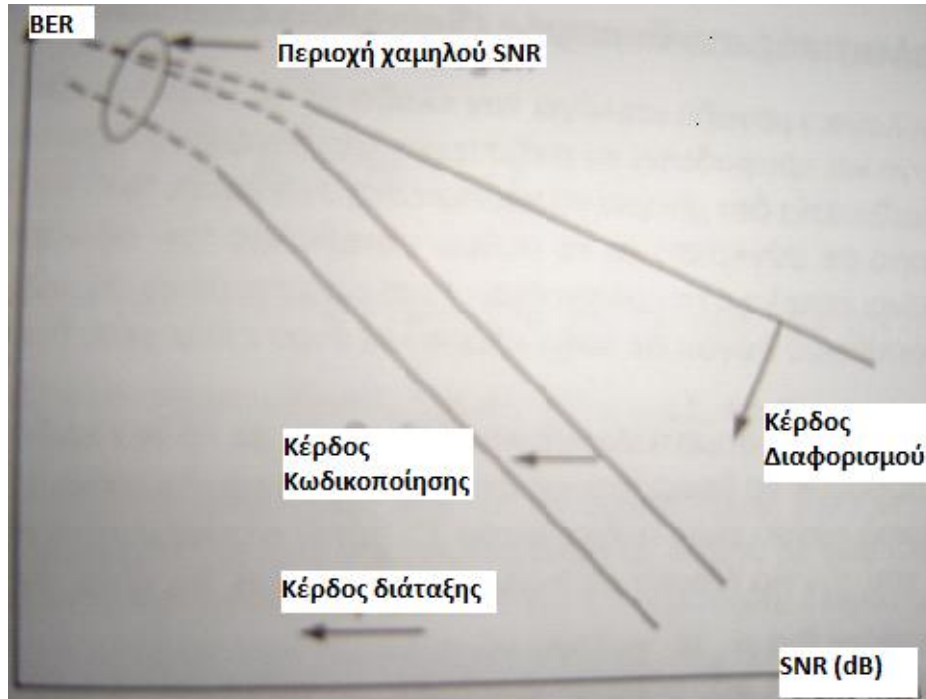
Ο χωρικός διαφορισμός διακρίνεται σε :

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

3.1.1 Διαφορική λήψη χώρου

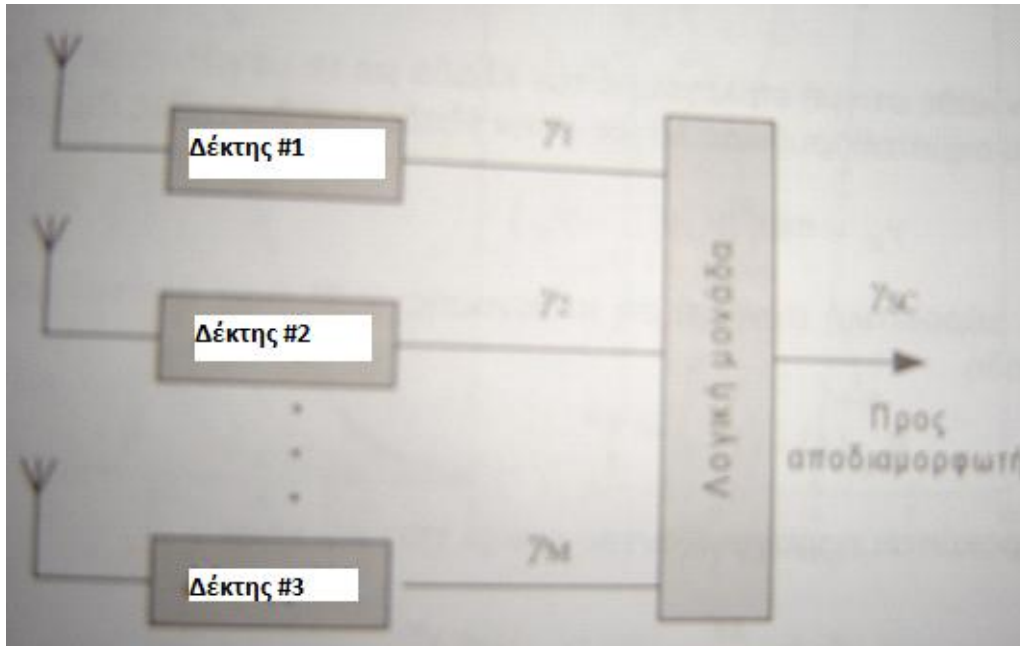
Η τεχνική της διαφορικής λήψης χώρου απαιτεί τη χρήση πολλαπλών κεραιών λήψης, τουλάχιστον δύο, τοποθετημένων σε τέτοια απόσταση μεταξύ τους ώστε οι διάυλοι μέσω των οποίων λαμβάνουν το σήμα να είναι ασυσχέτιστοι. Αν τα κανάλια αυτά είναι ασυσχέτιστα τότε η πιθανότητα να υφίστανται ταυτόχρονα διάλειψη θα είναι μικρή. Έτσι επιτυγχάνεται σημαντική βελτίωση της μέσης τιμής του σηματοθορυβικού λόγου επομένως μειώνεται ο ρυθμός σφαλμάτων, χωρίς να αυξάνεται η εκπεμπόμενη ισχύς. Το όφελος για την ποιότητα της ζεύξης, όταν χρησιμοποιείται διαφορική λήψη χώρου, διακρίνεται: σε κέρδος διάταξης το οποίο οφείλεται στην αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο (signal to noise ratio - SNR), που επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραιές για τη λήψη του σήματος και σε κέρδος διαφορισμού που εκφράζει τη μείωση της πιθανότητας λάθους, που

επιτυγχάνεται όταν χρησιμοποιηθεί διαφορική λήψη. Σχετικά με το διαφορικό κέρδος γίνεται εμφανής η αλλαγή της κλίσης της καμπύλης του ρυθμού σφαλμάτων ως προς το σηματοθορυβικό λόγο [28].



Εικόνα 15 Βελτίωση ρυθμού σφαλμάτων με χρήση διαφορικών τεχνικών

Στην πράξη ακόμα κι αν οι διαλείψεις που υφίστανται οι δίαυλοι έχουν συντελεστή συσχέτισης έως 0.7, η υποβάθμιση του συστήματος σε σχέση με την ιδανική περίπτωση όπου οι δίαυλοι είναι πλήρως ασυσχέτιστοι, είναι της τάξης του 1dB, γεγονός που ενισχύει την επιλογή εφαρμογής των τεχνικών διαφορισμού στα συστήματα κινητών επικοινωνιών. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το γενικό διάγραμμα μια διάταξης διαφορικής λήψης χώρου [28].



Εικόνα 16 Γενική μορφή διάταξης διαφορικής λήψης χώρου

3.1.2 Διαφορική Εκπομπή

Σε πολλές περιπτώσεις είναι πιο πρακτικό ο δέκτης να έχει μόνο μια κεραία λήψης, λόγω περιορισμών στο κόστος και τον όγκο του εξοπλισμού. Στις περιπτώσεις αυτές, μπορεί να χρησιμοποιείται διαφορική εκπομπή, οπότε ο διάυλος έχει πολλαπλές εισόδους, τις κεραίες του πομπού και μία έξοδο, την κεραία του δέκτη, τότε το σύστημα αναφέρεται ως MISO – Multiple Input Single Output, σε αντίθεση με τα συστήματα διαφορικής λήψης που αναφέρεται ως SIMO – Single Input Multiple Output [28].

Ο τρόπος με τον οποίο εκπέμπεται το σήμα από τις πολλαπλές κεραίες του δέκτη, καθορίζεται με μια κωδικοποίηση χώρου- χρόνου (space time coding- STC). Ο απλούστερος και πιο δημοφιλής STC είναι ο κώδικας Alamouti. Σε αυτή την κωδικοποίηση θεωρούμε ένα σύστημα 2×1 δηλαδή με δύο κεραίες εκπομπής και μία κεραία λήψης. Η κωδικοποίηση αυτή ολοκληρώνεται σε δύο βασικές περιόδους. Αν στην πρώτη περίοδο η πρώτη κεραία εκπέμπει το σύμβολο χ_1 και η δεύτερη το σύμβολο χ_2 τότε στην επόμενη χρονική περίοδο η πρώτη κεραία θα εκπέμπει το σύμβολο $-\chi_2^*$ και η δεύτερη κεραία το σύμβολο χ_1^* . Έτσι ενώ στη δεύτερη περίοδο δεν εκπέμπονται νέα σύμβολα, ο ρυθμός μετάδοσης παραμένει αμετάβλητος, αφού σε δύο βασικές περιόδους μετάδοσης έχουν μεταδοθεί δύο σύμβολα [28].

3.2 Διαφορισμός χρόνου

Ένας μηχανισμός που εφαρμόζεται συχνά σε συστήματα ψηφιακής μετάδοσης είναι ο διαφορισμός χρόνου. Σε αυτή την τεχνική το ίδιο ψηφίο (bit) πληροφοριακού σήματος, εκπέμπεται επαναληπτικά σε διαφορετικές χρονοθυρίδες (time slots) οι οποίες απέχουν μεταξύ τους, κάποιο χρονικό διάστημα, ώστε οι διακυμάνσεις στις διαφορετικές αυτές επαναλήψεις να είναι ανεξάρτητες. Σε αυτή την περίπτωση το πλεονέκτημα είναι ότι απαιτείται η χρήση μίας μόνο κεραίας. Ωστόσο το μειονέκτημα αυτής, είναι ότι οι δέκτες που κινούνται αργά, απαιτούν μεγαλύτερη απόσταση χρονοθυρίδων πράγμα που μειώνει την απόδοση του συστήματος [16].

Ο διαφορισμός μπορεί να υλοποιηθεί και μέσω της μετάδοσης του ίδιου σήματος πληροφορίας σε διαφορετικές χρονικές θυρίδες, με χρονική απόσταση μεταξύ τους ίση ή μεγαλύτερη από το χρόνο συνοχής T_c του καναλιού. Δεδομένου, όμως, ότι ο χρόνος συνοχής του καναλιού είναι αντιστρόφως ανάλογος της εξάπλωσης Doppler, η τεχνική αυτή δεν μας συμφέρει σε κανάλια όπου η εξάπλωση Doppler είναι μικρή, καθώς εισάγει μεγάλη καθυστέρηση στη μετάδοση του σήματος και επομένως οδηγεί σε μείωση του ρυθμού μετάδοσης της πληροφορίας. Επίσης, αυτή η τεχνική απαιτεί πολύ καλό συγχρονισμό και μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε σχέση με τον διαφορισμό χώρου [16].

3.3 Διαφορισμός συχνότητας

Ο διαφορισμός συχνότητας μπορεί να εφαρμοσθεί 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 σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι απαιτείται η χρήση μιας μόνο κεραίας. Ωστόσο τα μειονεκτήματα είναι η κατάληψη μεγαλύτερου εύρους ζώνης, το μοίρασμα της εκπεμπόμενης ισχύος στις αντίστοιχες φέρουσες συχνότητες και το υψηλό κόστος υλοποίησης [12].

Σε αυτή την τεχνική, μπορούμε να μεταδώσουμε το σήμα πληροφορίας σε δύο ή περισσότερες φέρουσες συχνότητες ενός OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) σήματος, στο οποίο η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών φερουσών είναι ίση ή μεγαλύτερη από το σύμφωνο εύρος ζώνης B_c του καναλιού, ώστε να εξασφαλιστεί η ανεξαρτησία των αντιγράφων του εκπεμπόμενου σήματος. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για την καταπολέμηση των επιλεκτικών διαλείψεων στη

συχνότητα. 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, οι οποίες λέγονται επιλεκτικές στη συχνότητα, δηλαδή, κάθε φασματική συνιστώσα του σήματος επηρεάζεται με διαφορετικό τρόπο [12].

Η καταπολέμηση αυτών των διαλείψεων, που προκαλούν ενδοσυμβολική παρεμβολή, επιτυγχάνεται με τις τεχνικές OFDM και CDMA (code division multiple access). 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 N φορές και γίνεται μεγαλύτερη από την εξάπλωση καθυστέρησης [12].

3.4 Διαφορισμός πολλαπλών οδεύσεων (Multipath Diversity)

Η τεχνική του διαφορισμού πολλαπλών οδεύσεων εφαρμόζεται σε περίπτωση που οι χρονικές καθυστερήσεις δεν εισάγονται τεχνητά, όπως συμβαίνει στη περίπτωση του διαφορισμού χρόνου, αλλά μέσω των πολλαπλών οδεύσεων. Σε αντίθεση με άλλες τεχνικές διαφορισμού, όπως με τον διαφορισμό χρόνου και συχνότητας, αυτή η μέθοδος δεν απαιτεί επιπρόσθετο εύρος ζώνης για την υλοποίησή 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 [21].

3.5 Διαφορισμός Συνεργασίας (Cooperative Diversity)

Άλλη μία τεχνική διαφορισμού, που λέγεται διαφορισμός 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 [21].

3.6 Διαφορισμός πόλωσης

Μία ιδέα αντικατάστασης δύο απομακρυσμένων κεραιών από μία η οποία δύναται να υποστηρίξει εκπομπή και λήψη με δύο είδη πολώσεων, δηλαδή οριζόντια και κάθετη αποτελεί ο διαφορισμός πόλωσης. Παρ' όλα αυτά, επειδή δεν υπάρχει η δυνατότητα 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 [23].

3.7 Διαφορισμός Γωνίας (angle diversity)

Η τεχνική διαφορισμού γωνίας, πραγματοποιείται κατά την εκπομπή του σήματος από διαφορετικές γωνίες, χρησιμοποιώντας κατευθυντικές κεραιές ώστε ο δέκτης να λαμβάνει ασυσχέτιστα σήματα. Με την τεχνική αυτή περιορίζεται σημαντικά και το φαινόμενο Doppler, όμως μειονέκτημα αυτής είναι ότι δεν εφαρμόζεται αποτελεσματικά σε μη κινητούς δέκτες [23].

Τεχνικές διαφορισμού μπορούν να εφαρμοστούν και στη διάταξη εκπομπής (*transmit diversity*) του σήματος με τη χρήση πολλαπλών κεραιών εκπομπής. Η πλέον δημοφιλής τεχνική είναι η χρήση δύο κεραιών εκπομπής και κατάλληλη επεξεργασία του σήματος που πρόκειται να μεταδοθεί. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι 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 [23].

3.8 Συστήματα με πολλαπλές κεραιές εκπομπής/λήψης

Ο πιο βασικός τρόπος πρόσβασης ραδιοκαναλιού είναι η μονή είσοδος - μονή έξοδος (Single Input Single Output-SISO), στην οποία χρησιμοποιούνται μόνο μία κεραιά εκπομπής και μια κεραιά λήψης.

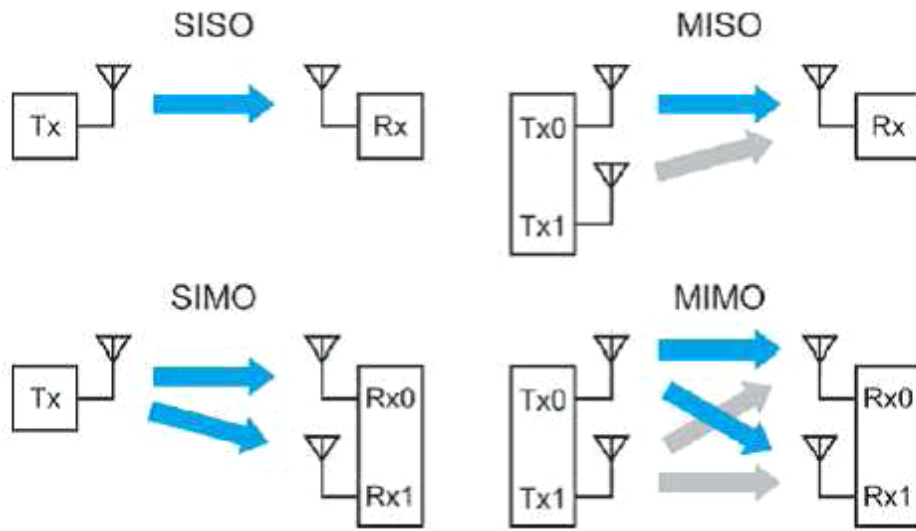
Ένας δεύτερος τρόπος που παρουσιάζεται και στην εικόνα 17, είναι μονής εισόδου-πολλαπλής εξόδου (Single Input Multiple Output-SIMO), η οποία χρησιμοποιεί έναν πομπό και δύο ή περισσότερους δέκτες. Αυτός ο τρόπος πρόσβασης ραδιοκαναλιού είναι ιδιαίτερα κατάλληλος για τις χαμηλές συνθήκες σήματος προς θόρυβο (SNR) στις οποίες ένα θεωρητικό κέρδος 3 dB είναι δυνατόν, όταν χρησιμοποιούνται δύο δέκτες [12].

Ο επόμενος τρόπος, πολλαπλής εισόδου μονής εξόδου (Multiple input single output-MISO) χρησιμοποιεί δύο ή περισσότερους πομπούς και ένα δέκτη. Το σύστημα MISO αναφέρεται πιο συχνά ως εκπεμπόμενη πολυμορφία. Τα ίδια δεδομένα αποστέλλονται από τις δύο κεραιές εκπομπής, αλλά κωδικοποιημένα έτσι ώστε ο δέκτης μπορεί να ταυτοποιεί τον κάθε πομπό. Η εκπεμπόμενη ποικιλομορφία αυξάνει την αξιοπιστία των σημάτων στην εξασθένιση και μπορεί να αυξήσει την απόδοση σε συνθήκες χαμηλού SNR. Το MISO δεν αυξάνει τα ποσοστά στοιχείων, αλλά υποστηρίζει τους ίδιους ρυθμούς δεδομένων με χρήση λιγότερης ισχύος [12].

Ο τελικός τρόπος φαίνεται είναι πλήρης MIMO – Multiple input multiple output, η οποία απαιτεί δύο ή περισσότερους πομπούς και δύο ή περισσότερους δέκτες. Το MIMO αυξάνει τη φασματική χωρητικότητα από τις εκπεμπόμενες πολλαπλές ροές δεδομένων ταυτόχρονα στην ίδια συχνότητα και χρόνο, με πλήρη αξιοποίηση των διαφόρων διαδρομών στο ραδιοκανάλι. Για ένα σύστημα που περιγράφεται ως MIMO, πρέπει να έχει τουλάχιστον τόσους δέκτες όσες ροές δεδομένων υπάρχουν. Ο αριθμός των μεταδιδόμενων ροών δεν πρέπει να συγχέεται με τον αριθμό των κεραιών μετάδοσης [12].

Ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας για τη λειτουργία MIMO είναι ότι οι εκπομπές από κάθε κεραιά πρέπει να είναι μοναδικά αναγνωρίσιμες, έτσι ώστε κάθε δέκτης μπορεί να καθορίσει ποιός συνδυασμός μεταδόσεων έχει παραληφθεί. Αυτή η αναγνώριση συνήθως γίνεται με τα πιλοτικά σήματα, τα οποία χρησιμοποιούν ορθογώνια σχήματα για κάθε κεραιά. Η ποικιλομορφία χώρου του ραδιοκαναλιού σημαίνει ότι το MIMO έχει τη δυνατότητα να αυξήσει τον ρυθμό των δεδομένων [12].

Με τη χρήση διαφορισμού στον πομπό ή στον δέκτη, μπορούμε να βελτιώσουμε την απόδοση του συστήματος κατά ένα παράγοντα που καλείται κέρδος διαφορισμού. Αποδεικνύεται ότι ένας διάυλος MIMO μπορεί να αναλυθεί σε N παράλληλους και ανεξάρτητους διαύλους και με πολυπλεξία των δεδομένων σε αυτούς τους διαύλους, επιτυγχάνουμε αύξηση της χωρητικότητας. Αυτή η βελτίωση ονομάζεται κέρδος πολυπλεξίας [12].

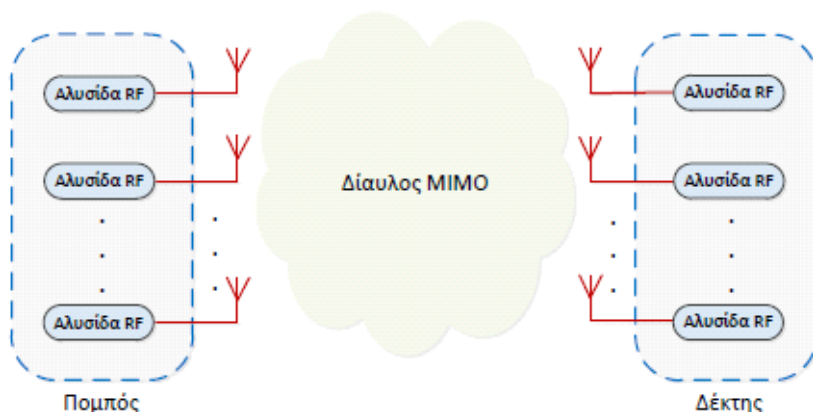


Εικόνα 17 Τρόποι πρόσβασης

Τα συστήματα MIMO είναι αυτά τα οποία αναπτύχθηκαν έτσι ώστε να υποστηρίζουν τεχνικές διαφορισμού, προσφέροντας έτσι περαιτέρω βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος. Μέσω αυτών των τεχνικών, όπως αναφέραμε και παραπάνω, περιορίζεται η υποβάθμιση της ποιότητας της ασύρματης ζεύξης, διότι συμβάλλουν στην καταπολέμηση των διαλείψεων. Ειδικά, η τεχνική του χωρικού διαφορισμού εκμεταλλεύεται την ύπαρξη διαφορετικών, και όσο το δυνατόν ασυσχέτιστων διαδρομών, του σήματος μετάδοσης λόγω του πλήθους των κεραιών στο πομπό ή στο δέκτη ή και στις δύο πλευρές.

4^ο Κεφάλαιο: Συστήματα MIMO

Με τον όρο ασύρματο σύστημα MIMO μπορούμε να χαρακτηρίσουμε ένα «κλασσικό» ασύρματο σύστημα ζεύξης, όπου ο πομπός και ο δέκτης να διαθέτουν πολλαπλές κεραιές. Τα σήματα που εκπέμπονται από τις κεραιές εκπομπής στις κεραιές λήψης, συνδυάζονται έτσι ώστε να είναι δυνατόν να βελτιωθούν οι παράμετροι λειτουργίας του συστήματος, καθιστώντας πιο αποδοτική και ποιοτική την ασύρματη ζεύξη. Αυτά τα συστήματα συνήθως χρησιμοποιούν στοιχειοκεραίες εκπομπής και λήψης για να επιτρέπουν την εκπομπή και λήψη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από ένα ορισμένο αριθμό στοιχείων - κεραιών. Επομένως και στα δύο άκρα του ασύρματου καναλιού υπάρχουν στοιχεία εκπομπής και λήψης τα οποία μπορούν να λειτουργούν στο ίδιο εύρος συχνοτήτων, ταυτόχρονα. Έτσι το σύστημα μπορεί και αναπτύσσει τεχνικές χωρικού διαφορισμού, οι οποίες είναι σε θέση να μειώσουν σε μεγάλο βαθμό της παραμορφώσεις των σημάτων λόγω πολυδιαδρομικής διαδρομής (multipath propagation) [26].

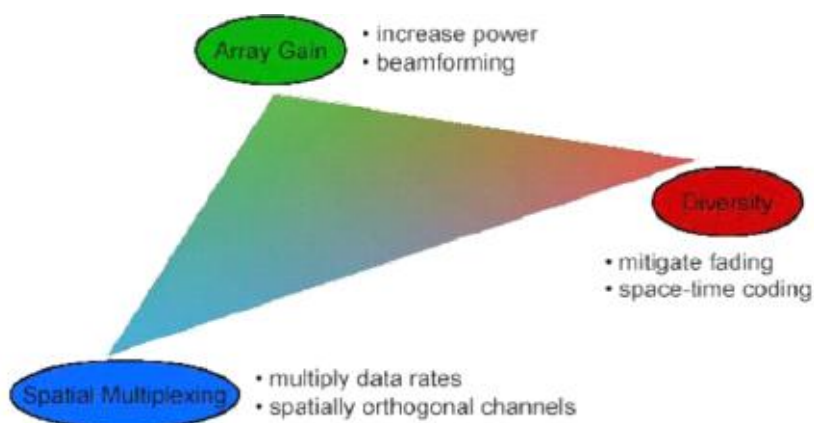


Εικόνα 18 Αρχιτεκτονική συστημάτων MIMO

Σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα, εκπομπής και λήψης, σημείο προς σημείο, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δεν οδεύουν μόνο απευθείας από τη κεραία εκπομπής στη κεραία λήψης. Αντίθετα, μπορεί να υποστούν ανάκλαση, διάθλαση και περίθλαση καθώς συναντούν εμπόδια στη διαδρομή τους. Αυτοί οι μηχανισμοί που επιδρούν στο ηλεκτρομαγνητικό σήμα διάδοσης, συνθέτουν την έννοια της πολυδιαδρομικής διάδοσης, την οποία εκμεταλλεύεται η αρχιτεκτονική των MIMO συστημάτων επικοινωνίας. Δηλαδή σε μία κλασσική ασύρματη ζεύξη αυτό αποτελεί ανεπιθύμητο φαινόμενο, τα συστήματα MIMO εκμεταλλεύονται προς όφελός τους,

την ύπαρξη ασύρματου περιβάλλοντος πλούσιου σε σκεδαστές για να βελτιώσουν την φασματική τους απόδοση. Συνεπώς η «στρατηγική» χρήσης πολλαπλών κεραιών στην εκπομπή και στη λήψη, σε ένα σύστημα ασύρματης ζεύξης, προσφέρει σημαντική βελτίωση στην απόδοση του αναβαθμίζοντας την ποιότητα και την αξιοπιστία των παρεχόμενων υπηρεσιών [26].

Η απολαβή κεραιοσυστοιχίας (Array Gain), συγκεκριμένα, είναι ένα από τα βασικότερα προτερήματα των συστημάτων πολλαπλών εισόδων – εξόδων. Αυτή η έννοια αναφέρεται κυρίως στη μέση αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο στη διάταξη του δέκτη, λόγω της επίδρασης της χρήσης πολλών κεραιών είτε στη πλευρά του δέκτη, είτε του πομπού, είτε και στα δύο άκρα του ασύρματου συστήματος. Αν συνδυαστούν κατάλληλα τα σήματα στη λήψη, ο δέκτης μπορεί να πετύχει αύξηση του λόγου σήματος – προς – θόρυβο, σε σχέση με τη αντίστοιχη τιμή για ένα στοιχείο ακτινοβολίας εκπομπής και λήψης, η οποία είναι ανάλογη του αριθμού των κεραιών στο δέκτη [26].



Εικόνα 19 Αύξηση απόδοσης συστημάτων MIMO

4.1 Πλεονεκτήματα του MIMO

Τα οφέλη της τεχνολογίας MIMO, που συμβάλει στην επίτευξη του σημαντικού κέρδους απόδοσης, είναι το κέρδος της στοιχειοκεραίας, το κέρδος διαφορισμού, το κέρδος της χωρικής πολυπλεξίας και η μείωση παρεμβολής. Τα οφέλη περιγράφονται παρακάτω.

4.1.1 Κέρδος στοιχειοκεραίας (Array gain):

Με την έννοια κέρδος στοιχειοκεραίας (ή κέρδος δημιουργίας λοβών) ονομάζουμε τη μέση αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) που παρατηρείται στον δέκτη εξαιτίας της συνάφειας που προκύπτει από τον συνδυασμό της επίδρασης των πολλαπλών κεραιών του δέκτη ή του πομπού ή και των δύο ταυτόχρονα. Αν θεωρήσουμε ότι το κανάλι είναι γνωστό στην πολλαπλή κεραία εκπομπής, τότε ο πομπός θα επηρεάσει την μετάδοση ανάλογα με τους συντελεστές του καναλιού, έτσι ώστε να υπάρχει συνεπής συνδυασμός στην απλή κεραία λήψης (σε περίπτωση MISO). Το κέρδος της στοιχειοκεραίας σε αυτήν την περίπτωση λέγεται κέρδος στοιχειοκεραίας πομπού. Διαδοχικά, αν χρησιμοποιούμε πομπό απλής κεραίας και δέκτη πολλαπλών κεραιών, ο δέκτης μπορεί να σταθμίσει τα εισερχόμενα σήματα έτσι ώστε να προστεθούν με συνοχή στην έξοδο, επομένως με αυτόν τον τρόπο έχουμε καταφέρει να ενισχυθεί το σήμα. Αυτή είναι η περίπτωση SIMO και αυτό ονομάζεται κέρδος στοιχειοκεραίας του δέκτη. Τα συστήματα πολλαπλών κεραιών απαιτούν τέλεια γνώση των καναλιών είτε στον πομπό είτε το δέκτη είτε και στα δύο για να επιτύχουν αυτό το κέρδος στοιχειοκεραίας και επίσης εξαρτώνται από τον αριθμό των κεραιών εκπομπής και λήψης [2].

4.1.2 Κέρδος χωρικού διαφορισμού (Spatial diversity gain)

Στον δέκτη ενός ασύρματου συστήματος η στάθμη του σήματος μπορεί να αυξομειώνεται ή να εξασθενεί. Η εξασθένιση μπορεί να μετριαστεί από το κέρδος χωρικού διαφορισμού και αυτό πραγματοποιείται με την αποστολή στον δέκτη πολλαπλών αντίγραφων του εκπεμπόμενου σήματος στο χώρο. Μπορούμε να βελτιώσουμε την ποιότητα και την αξιοπιστία του σήματος, με την αποστολή ενός αυξανόμενου αριθμού των ανεξάρτητων αντίγραφων, ο οποίος αναφέρεται ως σειρά ποικιλομορφίας, και υποθέτοντας ότι τουλάχιστον ένα από τα αντίγραφα δεν έχει υποστεί σημαντική εξασθένιση [2].

4.1.3 Κέρδος χωρικής πολυπλεξίας (Spatial Multiplexing Gain)

Η χωρική πολυπλεξία, σε σχέση με άλλες τεχνικές, μπορεί να προσφέρει γραμμική αύξηση στο ρυθμό μετάδοσης για το ίδιο εύρος ζώνης και χωρίς πρόσθετες δαπάνες ισχύος. Ωστόσο αυτό είναι δυνατό να συμβεί μόνο σε κανάλια MIMO [7].

Η ροή δεδομένων είναι χωρισμένη σε δύο ρεύματα δεδομένων μισού-ρυθμού, που διαμορφώνονται και διαβιβάζονται ταυτόχρονα και από τις δύο κεραιές, δηλαδή

αυτή η μέθοδος διαβιβάζει ένα κομμάτι δεδομένων από την πρώτη κεραία, και ένα άλλο κομμάτι από την δεύτερη κεραία ταυτόχρονα. Ο δέκτης, που έχει πλήρη γνώση του καναλιού, ανακτά αυτά τα μεμονωμένα ρεύματα δεδομένων και τα συνδυάζει ώστε να ανακτηθεί η αρχική ροή των δεδομένων. Δεδομένου ότι ο δέκτης έχει τη γνώση του καναλιού παρέχει ποικιλομορφία λήψης, αλλά το σύστημα δεν έχει καμία ποικιλομορφία μετάδοσης δεδομένου ότι τα ρεύματα δεδομένων είναι απολύτως διαφορετικά μεταξύ τους, δεδομένου ότι φέρουν εντελώς διαφορετικά δεδομένα [7].

Με αυτό τον τρόπο η χωρική πολυπλεξία αυξάνει τον ρυθμό μετάδοσης ανάλογα με τον αριθμό των κεραιών που έχουμε στην εκπομπή και στη λήψη, όμως περιλαμβάνει μεγάλη πολυπλοκότητα για τον σχεδιασμό του πομπού και του δέκτη. Με δύο κεραιές εκπομπής και δύο κεραιές λήψης, τα δεδομένα μπορούν να διαβιβασθούν δύο φορές πιο γρήγορα από άλλα συστήματα που χρησιμοποιούν χωρο-χρονικούς κώδικες με μία κεραία λήψης [7].

Σε περίπτωση συστημάτων MIMO-MU, δύο χρήστες διαβιβάζουν ταυτόχρονα τις αντίστοιχες πληροφορίες τους προς τον ίδιο σταθμό βάσης που εξοπλίζεται με δύο κεραιές. Ο σταθμός βάσης μπορεί να χωρίσει και να διαβιβάσει τα δύο σήματα χρησιμοποιώντας χωρικό φιλτράρισμα, έτσι ώστε κάθε χρήστης να μπορεί να αποκωδικοποιήσει το σήμα του σωστά. Αυτό επιτρέπει την αύξηση της χωρητικότητας ανάλογα τον αριθμό κεραιών στο σταθμό βάσης και τον αριθμό των χρηστών [7].

4.1.4 Μείωση και αποφυγή παρεμβολών (Interference reduction and avoidance)

Οι παρεμβολές στα ασύρματα δίκτυα είναι αποτέλεσμα πολλών χρηστών οι οποίοι μοιράζονται το χρόνο και τους πόρους. Αυτές μπορούν να μετριαστούν σε συστήματα MIMO, αξιοποιώντας τη χωρική διάσταση για την αύξηση του διαχωρισμού μεταξύ των χρηστών. Για παράδειγμα, με την παρουσία της παρεμβολής, το κέρδος συστοιχίας αυξάνει την ανοχή στο θόρυβο, καθώς και η παρεμβολή ισχύος, ως εκ τούτου, η βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο συν παρεμβολή (SINR). Επιπλέον, η χωρική διάσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σκοπούς αποφυγής παρεμβολών, δηλαδή, κατευθύνοντας την ενέργεια του σήματος προς τον προβλεπόμενο χρήστη και την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών σε άλλους χρήστες. Σε γενικές γραμμές, μπορεί να μην είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν ταυτόχρονα όλα τα οφέλη που περιγράφεται ανωτέρω λόγω των αντιφατικών

απαιτήσεων για τους βαθμούς χώρου ελευθερίας. Όμως, χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό από τα οφέλη σε ένα ασύρματο δίκτυο θα έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της ικανότητάς, την κάλυψη και την αξιοπιστία [7].

4.2 Χωρητικότητα συστημάτων

4.2.1 Θεώρημα Shannon σε SISO συστήματα

Βάσει του θεωρήματος του Shannon, ως χωρητικότητα ενός καναλιού 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 σε ένα κανάλι επικοινωνίας η ύπαρξη θορύβου, δεν αφορά στην ποιότητα της επικοινωνίας αλλά στην ταχύτητά της. Αυτό που τελικά μας δίνει, είναι ένα άνω όριο της λειτουργίας του τηλεπικοινωνιακού συστήματος [19].

Η χωρητικότητα ενός συγκεκριμένου ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως ο θόρυβος, το πλήθος των χρησιμοποιούμενων κεραιών στον πομπό και στον δέκτη και η επίδραση των συνιστωσών πολλαπλών διαδρομών που δημιουργούνται κατά τη μετάβαση του σήματος από το κανάλι. Κάποιες από τις παραπάνω παραμέτρους είναι καθορισμένες, ενώ άλλες μπορούν να επιλεγθούν κατάλληλα ώστε να βελτιστοποιηθεί η επίδοση του συστήματος [19].

Έστω στην απλή περίπτωση, στην οποία έχουμε μία κεραία εκπομπής και μία κεραία λήψης, υποθέτουμε ότι το εκπεμπόμενο σήμα διαβρώνεται από λευκό, προσθετικό Gaussian θόρυβο (AWGN). Η σχέση που ισχύει σε αυτό το κανάλι είναι:

$$y = s + n,$$

όπου s το σήμα εισόδου στο κανάλι, y το σήμα εξόδου και n το σήμα που περιγράφει τον AWGN. Η τελευταία παράμετρος μοντελοποιείται ως μια μιγαδική τυχαία μεταβλητή, όπου το πραγματικό και το φανταστικό μέρος ακολουθούν Gauss κατανομή με μηδενική μέση τιμή και διακύμανση $\sigma_n^2 = P_n / 2$, όπου P_n είναι η ισχύς του θορύβου ($P_n = N_0 * BW$) και BW το εύρος ζώνης. Αν E_n είναι η ισχύς των συμβόλων εισόδου, ο λόγος ισχύος σήματος προς θόρυβο στον δέκτη είναι:

$$SNR = \frac{E_n}{N_0 * BW}$$

Εξίσωση 5 Σηματοθορυβικός λόγος

Η χωρητικότητα του καναλιού δίνεται από τη σχέση

$$C = BW * \log(1 + SNR)$$

Εξίσωση 6 χωρητικότητα

Αν θεωρήσουμε ότι τα μεταδιδόμενα σύμβολα είναι δυαδικά, η κανονικοποιημένη χωρητικότητα, ως προς το εύρος ζώνης είναι:

$$C = \log_2(1 + SNR)$$

και μετράται σε bits/sec/Hz [19].

Για πολλά χρόνια, τα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών βασίζονταν σε διατάξεις SISO και συνθήκες οπτικής επαφής. Στην προσπάθεια καταπολέμησης των φαινομένων πολυδιαδρομών χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τεχνικές διαφορισμού, τις οποίες αναλύσαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η κατάλληλη χρήση κατευθυντικών κεραιών αυξάνει τον σηματοθορυβικό λόγο σε ένα σύστημα SISO και επομένως βελτιώνει την χωρητικότητα του συστήματος. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της ικανότητας των κατευθυντικών κεραιών να συγκεντρώνουν την ακτινοβολούμενη ισχύ προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση. Υποθέτοντας ότι G_t και G_r είναι τα κέρδη των κεραιών εκπομπής και λήψης αντίστοιχα και θεωρώντας ότι οι διευθύνσεις μέγιστης ακτινοβολίας των δύο κεραιών συμπίπτουν, το SNR θα δίνεται από τη σχέση [19].

$$SNR = G_t * SNR * G_r$$

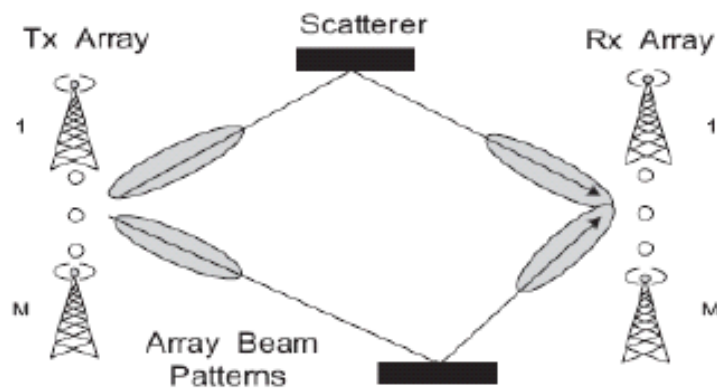
Εξίσωση 7 Σηματοθορυβικός λόγος με κέρδος

Μια άλλη σημαντική παράμετρος για τη βελτίωση της χωρητικότητας ενός ασύρματου καναλιού, όταν το πρόβλημα προσεγγίζεται από τη σκοπιά του

σχεδιασμού της κατάλληλης κεραίας είναι η θερμοκρασία θορύβου της κεραίας. Αν η κατανομή της θερμοκρασίας της κεραίας δεν είναι ομοιόμορφη, τότε έχει αποδειχθεί ότι η χρήση κατευθυντικών κεραιών μπορεί να ελαττώσει την ισχύ του θορύβου, εξαιτίας της χρήσης στενότερης δέσμης ακτινοβολίας [19].

4.2.2 Χωρητικότητα MIMO συστημάτων

Το 1998 οι Foschini και Gans, στην προσπάθειά τους να υπολογίσουν τα όρια της χωρητικότητας, εξέτασαν την πιθανότητα βελτίωσης του ρυθμού μετάδοσης πληροφορίας με τη χρήση συστημάτων πολλαπλών κεραιών, σε συγκεκριμένες εφαρμογές σε συνθήκες οπτικής επαφής.



Εικόνα 20 Περιβάλλον πολυδιαδρομών

έχει αποδειχθεί ότι τα MIMO συστήματα, εκμεταλλεύονται τις συνιστώσες πολλαπλών διαδρομών προς όφελος της επίδοσής τους. Αυτό είναι δυνατό εξ' αιτίας της ικανότητας των πολλαπλών κεραιών να διαχωρίζουν τις συνιστώσες πολλαπλών διαδρομών, κάτι το οποίο συνεπάγεται αύξηση της ποσότητας των μεταδιδόμενων δεδομένων [8].

Έστω ότι υπάρχουν N_R κεραίες λήψης, σε ένα κανάλι SIMO, τότε αν θεωρήσουμε ότι τα σήματα στη λήψη έχουν το ίδιο πλάτος, άρα μπορούν να προστεθούν με την ίδια φάση, προκύπτει ότι η ισχύς του συνολικού σήματος είναι N_R φορές, η ισχύς του σήματος εκπομπής. Ο θόρυβος στη λήψη προστίθεται ασύμφωνα και άρα η ισχύς του πολλαπλασιάζεται επί N_R . Σύμφωνα με τα παραπάνω ο λόγος σήματος προς θόρυβο γίνεται:

$$SNR \approx \frac{N_R^2 * signalpower}{N_R * Noisepower} = N_R * SNR_0$$

Τότε η χωρητικότητα του καναλιού SIMO προκύπτει ότι ισούται με:
 $C \approx BW * \log(1 + N_R * SNR_0)$ [9].

Αν έχουμε διαφορετική περίπτωση με N_T κεραιές στον πομπό, σε κανάλι MISO, και με βάση τα παραπάνω, ότι το κανάλι είναι άγνωστο στον πομπό, η ισχύς των σημάτων κάθε κεραιάς εκπομπής διαιρείται δια N_T . Αν υποθέσουμε ότι τα σήματα στη λήψη έχουν ίδιο πλάτος, τότε μπορούν να προστεθούν με την ίδια φάση και επομένως η ισχύς του σήματος στη λήψη είναι $2N_T$ φορές η ισχύς του σήματος εκπομπής. Επειδή όμως υπάρχει μία κεραιά λήψης, ο θόρυβος παραμένει ο ίδιος και

$$SNR \approx \frac{N_T^2 * signalpower / M}{noise power} = M * SNR_0$$

έτσι ο λόγος σήματος προς θόρυβο γίνεται:

και τελικά η χωρητικότητα του καναλιού θα γίνει ίση με
 $C = BW * \log_2(1 + N_R * N_T * SNR_0)$ [9].

Εάν υποθέσουμε ότι έχουμε $N_R \times N_T$ στοιχεία τότε εφαρμόζεται διαφορετικό σήμα έτσι ώστε όλα τα σήματα μετάδοσης να αποκωδικοποιούνται στο δέκτη. Επομένως με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένα κανάλι για κάθε κεραιά μετάδοσης, με χωρητικότητα:

$$C = BW * \log_2 \det \left(1 + \frac{N_R}{N_T} * SNR_0 \right)$$

Επειδή όμως, υπάρχουν N_T τέτοια κανάλια., η συνολική χωρητικότητα πολλαπλασιάζεται επί N_T . Συνεπώς υπάρχει γραμμική αύξηση της χωρητικότητας με τον αριθμό των κεραιών μετάδοσης [9].

Η μετάδοση δεδομένων χρησιμοποιώντας έναν αριθμό από κανάλια χαμηλής σχετικά ισχύος είναι πιο συμφέρουσα από το να χρησιμοποιηθεί ένα, υψηλής ισχύος.

Αναλυτικά η έκφραση της χωρητικότητας καναλιού MIMO έχει ως εξής: Για επίπεδο κανάλι:

$$C = BW * \log_2 \det \left(I_r + \frac{P}{N_T * N_0} HH^H \right)$$

Εξίσωση 8 MIMO χωρητικότητα

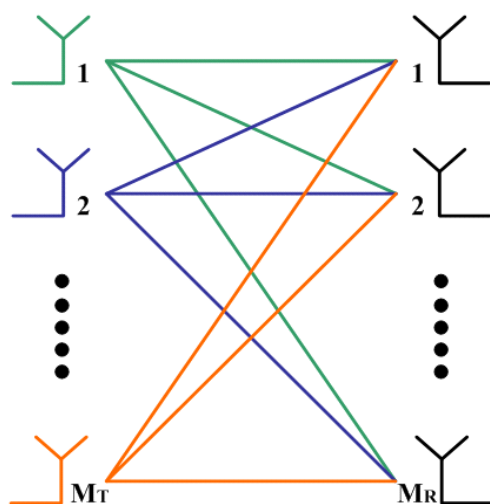
όπου όπου $r = \min(N_T, N_R)$, και HH^H η Ερμητιανή αντιμετάθεση του H [9].

Από τα παραπάνω μπορούμε να καταλήξουμε ότι η χωρητικότητα του καναλιού MIMO είναι κατά προσέγγιση ακέραιο πολλαπλάσιο της αντίστοιχης του SISO αφού έχουν αποδείξει, ότι ένα σύστημα MIMO με N_T κεραιές εκπομπής και N_R κεραιές

λήψης ισοδυναμεί με κάποιο αριθμό SISO καναλιών και η ολική χωρητικότητα είναι το άθροισμα των επιμέρους SISO χωρητικότητων [9].

4.3 Ανάλυση MIMO συστημάτων

Στη περίπτωση ενός συστήματος πολλαπλών εισόδων-εξόδων η διάταξη εκπομπής διαθέτει N_T κεραιές και η αντίστοιχη λήψης N_R . Η παρακάτω εικόνα δίνει μία χαρακτηριστική εικόνα του MIMO ασύρματου διαύλου.



Εικόνα 21 Σχηματικό διάγραμμα MIMO

Για να μπορέσει να αναπτυχθεί ένα μοντέλο για την περιγραφή αυτών των συστημάτων πρέπει να ισχύουν ορισμένες βασικές προϋποθέσεις. Η πρώτη είναι σχετικά με την αποδοχή της ανυπαρξίας της διασυμβολικής παρεμβολής (ISI) κάτι το οποίο συνεπάγεται ότι το εύρος ζώνης του σήματος εκπομπής είναι σχετικά μικρό. Το φαινόμενο της διασυμβολικής παρεμβολής παρατηρείται σε περιβάλλον διάδοσης πολλαπλών διαδρομών όταν το εύρος ζώνης διαμόρφωσης είναι μεγαλύτερο από το σύμφωνο εύρος ζώνης. Σε αντίθετη περίπτωση δεν παρατηρείται διασυμβολική παρεμβολή και η απόκριση της βασικής ζώνης του καναλιού σταματά να εξαρτάται από την εξάπλωση χρονικής καθυστέρησης και γίνεται μόνο συνάρτηση του χρόνου [20].

Κάθε διαδρομή του σήματος από το σημείο εκπομπής στο σημείο λήψης μπορεί να αναπαρασταθεί ως μεταβλητή στο χώρο των μιγαδικών αριθμών. Αυτό προέρχεται από το γεγονός ότι το ασύρματο κανάλι θεωρείται κανάλι με σταθερή απολαβή και γραμμική απόκριση φάσης σε ένα εύρος ζώνης συχνοτήτων. Αυτή η παρατήρηση

βασίζεται στο γεγονός ότι το εύρος ζώνης του συστήματος είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης του καναλιού. Ειδικά για τις ασύρματες ζεύξεις των εσωτερικών χώρων, όπου είναι χαμηλή η εξάπλωση καθυστέρησης, το κανάλι διάδοσης μπορεί να θεωρηθεί επίπεδο ως προς τη συχνότητα στο εύρος ζώνης λειτουργίας [20].

Άλλη μία προϋπόθεση λέγεται θεώρηση στενοζωνικού εύρους ζώνης και θεωρεί τους συντελεστές της απολαβής καναλιού σταθερές μιγαδικές μεταβλητές στο εύρος ζώνης του ραδιοδιαύλου. Συνεπώς, κάθε στοιχείο του πίνακα καναλιού $h_{i,j}(t,t)$ σε ένα σύστημα MIMO μεταξύ της j -οστής κεραίας εκπομπής και της i -οστής κεραίας λήψης εκφράζει τη συνάρτηση μεταφοράς κάθε υποκαναλιού και ακολουθεί μιγαδική απεικόνιση. Άρα, το μέτρο και το όρισμα του κάθε στοιχείου αντιπροσωπεύουν την εξασθένηση και την ολίσθηση φάσης που προκαλεί το υποκανάλι στο σήμα διάδοσης [20].

Μία ακόμη σημαντική προϋπόθεση έχει να κάνει με το μοντέλο διάλειψης μπλοκ (block fading model) και αναφέρεται στους συντελεστές των υποκαναλιών δηλαδή, στα στοιχεία του πίνακα απόκρισης του καναλιού. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι οι παράμετροι αυτοί είναι τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν η καθεμιά κυκλικά συμμετρική μιγαδική Γκαουσιανή κατανομή μηδενικής μέσης τιμής. Την ίδια στιγμή, κάθε συντελεστής του υποκαναλιού, σε ένα σύστημα πολλαπλών εισόδων-εξόδων, διατηρεί την τιμή του σταθερή κατά τη χρονική διάρκεια ενός block συμβόλων μετάδοσης, ενώ καθένας συντελεστής μεταβάλλεται ανεξάρτητα από block σε block. Συνεπώς, στη χρονική διάρκεια ενός μπλοκ δεδομένων ο πίνακας απόκρισης του καναλιού διατηρείται σταθερός, ενώ στη χρονική διάρκεια το επόμενο μπλοκ δεδομένων κάθε στοιχείο του μεταβάλλεται ανεξάρτητα [20].

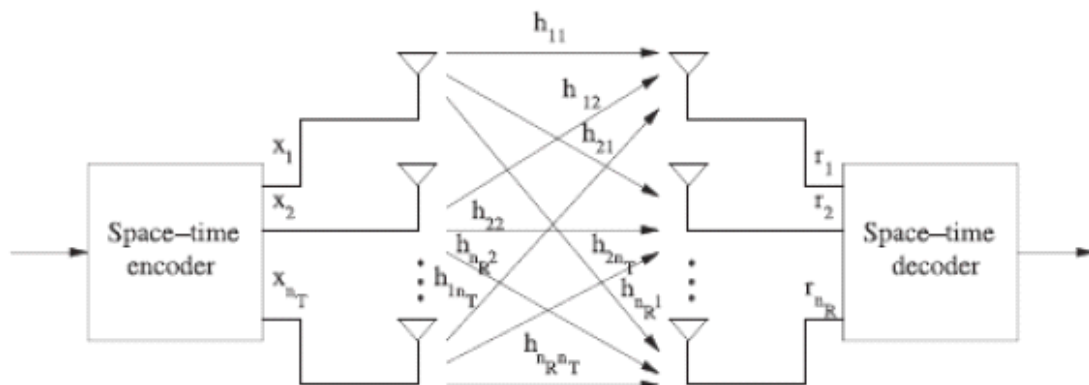
Τέλος, πρέπει να λάβουμε υπόψη το γεγονός ότι το κανάλι είναι γνωστό στο δέκτη μέσω ακολουθιών κατάρτισης (training sequences) οι οποίες προστίθενται στο block συμβόλων των δεδομένων πληροφορίας. Με αυτές τις ακολουθίες γίνεται η εκτίμηση του καναλιού στο δέκτη με κατάλληλη επεξεργασία των αντίστοιχων κυματομορφών [20].

4.4 Μαθηματικό μοντέλο MIMO καναλιού

Αν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα κανάλι το οποίο δεν είναι επιλεκτικό ως προς τη συχνότητα, τότε κάθε στιγμή μπορεί να χαρακτηρίζεται από έναν μιγαδικό αριθμό εάν πρόκειται για την περίπτωση SISO ($h_{\text{SISO}} = h$), από ένα διάνυσμα σειρών μιγαδικών αριθμών για την περίπτωση MISO ($h_{\text{MISO}} = [h_1 \ h_2 \ \dots \ h_N]$), από ένα διάνυσμα στηλών μιγαδικών αριθμών στην περίπτωση SIMO ($h_{\text{SIMO}} = [h_1; h_2; \dots h_N]$) και από ένα δισδιάστατο πίνακα και πάλι μιγαδικών αριθμών αν πρόκειται για ένα

$$H_{\text{MIMO}} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{N1} & h_{N2} & \dots & h_{NN} \end{bmatrix}$$

σύστημα MIMO: όπου h_{ij} είναι η κρουστική απόκριση του καναλιού μεταξύ της i -οστής κεραίας εκπομπής και της j -οστής κεραίας λήψης [3].



Εικόνα 22 MIMO διάγραμμα

Για λόγους κανονικοποίησης, θεωρείται ότι η ισχύς που λαμβάνεται, από το κάθε κανάλι, στις κεραίες λήψης είναι ίση με τη συνολική εκπεμπόμενη ισχύ. Αυτό σημαίνει ότι δεν λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα ενίσχυσης και πτώσης σήματος κατά τη διάδοση του σήματος. Έτσι λαμβάνοντας τον περιορισμό κανονικοποίησης για τα στοιχεία του καναλιού H , σε ένα κανάλι με σταθερούς συντελεστές ισχύει:

$$\sum_{j=1}^{N_r} |h_{ij}|^2 = N_T, i = 1, 2, \dots, N \quad [3].$$

Όταν τα στοιχεία του πίνακα που χαρακτηρίζουν το κανάλι είναι τυχαίες μεταβλητές, η κανονικοποίηση ισχύει για την αναμενόμενη αξία της παραπάνω έκφρασης. Ο πίνακας της κρουστικής απόκρισης του καναλιού μπορεί να είναι γνωστός στον δέκτη

αλλά δεν είναι πάντα γνωστός στον πομπό. Παρόλα αυτά μπορεί να γίνει μία εκτίμησή του στον πομπό χρησιμοποιώντας ένα αξιόπιστο κανάλι ανατροφοδότησης [3].

Τα στοιχεία του πίνακα της κρουστικής απόκρισης του καναλιού μπορεί να είναι τυχαία ή ντετερμινιστικά. Στις ασύρματες επικοινωνίες τα στοιχεία αυτά ακολουθούν κατανομές Rayleigh, Rician και κυρίως Nakagami. Ο θόρυβος και οι παρεμβολές μοντελοποιούνται ως στοχαστικές ανεξίτηλες λευκού θορύβου. Έτσι ο θόρυβος στο δέκτη περιγράφεται από έναν πίνακα στήλη $N_{R \times 1}$, όπου τα στοιχεία του είναι μιγαδικές τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν κατανομή Gauss μηδενικής μέσης τιμής και μοναδιαίας διασποράς. Ο δέκτης είναι βασισμένος σε μια αρχή εκτίμησης μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood-ML) που ισχύει από κοινού για όλες τις κεραίες λήψης. Το λαμβανόμενο σήμα αντιπροσωπεύεται από ένα πίνακα στήλη, διαστάσεων $N_{R \times 1}$, όπου το κάθε στοιχείο του αντιστοιχεί σε μία κεραία λήψης. Θέτοντας ως P_R τη μέση ισχύ στην έξοδο κάθε κεραίας λήψης, ο μέσος λόγος

σήματος προς θόρυβο για την κάθε κεραία λήψης ορίζεται ως $\gamma = \frac{P_R}{\sigma^2}$ όπου $\sigma^2 = N_0$, η ισχύς του θορύβου για κάθε κανάλι. Δεδομένου της υπόθεσης ότι η συνολική λαμβανόμενη ισχύ ανά κεραία είναι ίση με το σύνολο της εκπεμπόμενης ισχύς, ο λόγος σήματος προς θόρυβο θα γίνει ίσος με τη συνολική εκπεμπόμενη ισχύ προς την ισχύ θορύβου σε κάθε κεραία λήψης και έτσι θα είναι ανεξάρτητος από τον αριθμό

των εκπεμπόμενων κεραιών N_T , $\gamma = \frac{P}{\sigma^2}$ [3].

Με τη χρησιμοποίηση του γραμμικού προτύπου το λαμβανόμενο σήμα μπορεί να αναπαρασταθεί από την παρακάτω σχέση: $R = Hx + n$ [3].

4.5 Μοντελοποίηση MIMO καναλιών

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί πολλές τεχνικές εκπομπής και λήψης για την βελτίωση των δυνατοτήτων των ασύρματων συστημάτων επικοινωνιών, αλλά το κριτήριο για την επίδοση τους εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος διάδοσης. Γι αυτό το λόγο αναπτύσσονται μέθοδοι μοντελοποίησης και εκτίμησης των χαρακτηριστικών των διαύλων MIMO, οι οποίες θα συνεισφέρουν στον προσδιορισμό των προδιαγραφών των τεχνικών μετάδοσης [13].

Η μοντελοποίηση των MIMO καναλιών, μπορεί να κατηγοριοποιηθεί με διάφορους τρόπους και εξαρτάται από τα κριτήρια ενδιαφέροντος. Μία πιθανή κατηγοριοποίηση για παράδειγμα αφορά το διαχωρισμό τους σε ευρείας ζώνης (*wideband*) και στενής ζώνης (*narrowband*). Μία άλλη δημοφιλής κατηγοριοποίηση είναι αυτή που απεικονίζεται στην επόμενη εικόνα και διαχωρίζει τα μοντέλα διαύλων MIMO σε φυσικά (*physical*) και αναλυτικά (*analytical*). Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά τα κυριότερα μοντέλα που ανήκουν σε αυτές τις κατηγορίες [13].

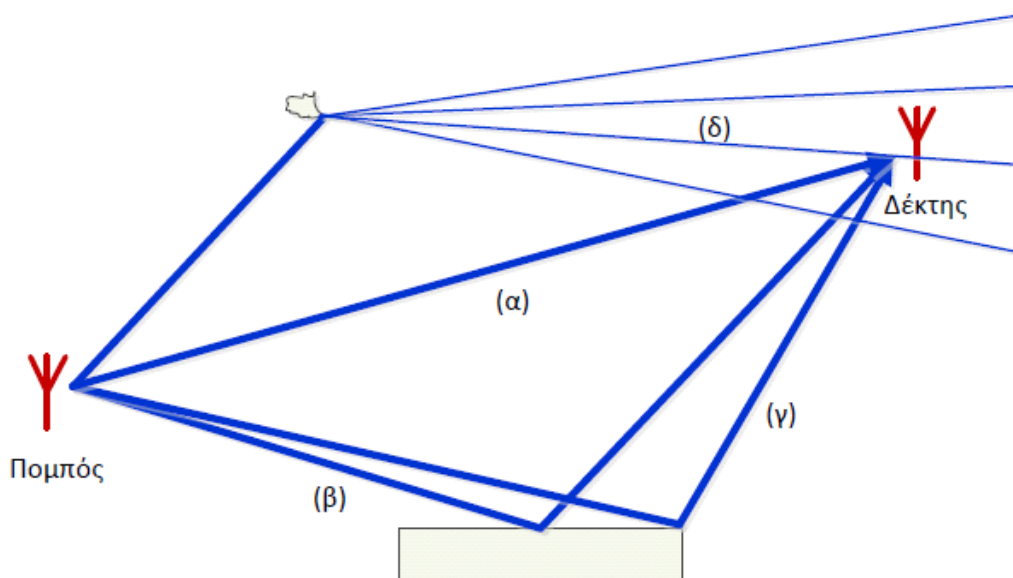


Εικόνα 23 Μοντέλα διαύλων

4.5.1 Φυσικά μοντέλα

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν μοντέλα τα οποία στοχεύουν στην αναπαράσταση των φυσικών μηχανισμών διάδοσης, για τη μοντελοποίηση του πίνακα μεταφοράς του διαύλου. Εκτός της άμεσης συνιστώσας, οι συνιστώσες που δημιουργούνται από άλλες διαδρομές οφείλονται στην αλληλεπίδραση του διαδιδόμενου κύματος με φυσικά εμπόδια στο χώρο που ονομάζονται σκεδαστές (scatterers) [15].

Σύμφωνα με την εικόνα 24, η απευθείας συνιστώσα υπόκειται σε απώλειες ελεύθερου χώρου. Ανάκλαση έχουμε όταν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε μία ομαλή επιφάνεια με αποτέλεσμα την αλλαγή διεύθυνσης διάδοσης, ενώ η περίθλαση εξηγεί την ύπαρξη πεδίου σε περιοχές σκίασης με τη βοήθεια της αρχής Huygens. Επίσης, η διέλευση των κυμάτων μέσα από εμπόδια έχει ως αποτέλεσμα την εξασθένησή τους λόγω απορρόφησης μέρους της ενέργειας. Τέλος, διάχυση προκαλείται κατά την πρόσπτωση του κύματος σε μία επιφάνεια με διαστάσεις συγκρίσιμες με το μήκος κύματος και αφορά τη διασπορά του ανακλώμενου κύματος σε πολλές διαφορετικές κατευθύνσεις [15].



Εικόνα 24 α. απευθείας συνιστώσα β. ανάκλαση γ. περίθλαση δ. διάχυση

Τα φυσικά μοντέλα περιγράφουν την διάδοση μέσω πολλαπλών διαδρομών μεταξύ μίας θέσης εκπομπής και μίας θέσης λήψης. Σύμφωνα με μελέτες και σχετικές έρευνες, τα μοντέλα μπορούν να διακριθούν, ανάλογα με τη φιλοσοφία μοντελοποίησης, σε ντετερμινιστικά (deterministic), γεωμετρικά – στοχαστικά (geometric based stochastic models) και μοντέλα διαύλων πολλαπλής πόλωσης (multi-polarized channels) [15].

4.5.1.1 Ντετερμινιστικά μοντέλα

Τα ντετερμινιστικά μοντέλα έχουν στόχο την αναλυτική αναπαράσταση των μηχανισμών διάδοσης για δεδομένο περιβάλλον. Λόγω ακρίβειας στη μοντελοποίηση, συχνά αντικαθιστούν ακόμα και πραγματικές μετρήσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι το μοντέλο ανίχνευσης ακτίνων (ray tracing model, RT), του οποίου η αρχή λειτουργίας βασίζεται στις αρχές της γεωμετρικής οπτικής και της ομοιόμορφης θεωρίας της περίθλασης και υποθέτει ότι το μήκος κύματος είναι πολύ μικρότερο από το μέγεθος των σκεδαστών [17].

Αρχικά, οι μέθοδοι ανίχνευσης ακτίνων αγνοούσαν το φαινόμενο της διάχυτης σκέδασης (diffuse scattering). Ωστόσο, κάποιες βελτιώσεις έχουν δείξει μεγαλύτερη συμφωνία με πραγματικές μετρήσεις. Το μοντέλο στοχεύει στον προσδιορισμό διαφόρων χαρακτηριστικών του σήματος στο δέκτη, όπως του πλάτους, της φάσης και της πόλωσης. Η απευθείας συνιστώσα στο δέκτη, είναι το εκπεμπόμενο πεδίο το οποίο διαδοχικά έχει υποστεί [17]:

- Επίδραση του διαγράμματος ακτινοβολίας εκπομπής
- Εξασθένηση λόγω απωλειών διάδοσης ελεύθερου χώρου και τυχόν επιπλέον εξασθένηση λόγω διέλευσης του κύματος μέσω εμποδίου
- Στροφή φάσης ως αποτέλεσμα του ηλεκτρικού μήκους της διαδρομής του κύματος
- Επίδραση του διαγράμματος ακτινοβολίας λήψης και τυχόν απόκλισης πόλωσης (polarization mismatch) στο δέκτη

Ανακλώμενες και διαθλώμενες συνιστώσες μοντελοποιούνται παρόμοια, λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό μήκος διαδρομής και θεωρώντας κατάλληλους συντελεστές ανάκλασης και διάθλασης. Τονίζεται ότι ενώ τέτοιες μέθοδοι

αναπαριστούν πιστά τους μηχανισμούς διάδοσης, η χρήση τους είναι περιορισμένη λόγω της ιδιαίτερα αυξημένης υπολογιστικής πολυπλοκότητας που εισάγουν [17].

4.5.1.2 Γεωμετρικά στοχαστικά μοντέλα

Τα γεωμετρικά – στοχαστικά μοντέλα δεν εστιάζουν σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον διάδοσης με δεδομένες τις θέσεις των σκεδαστών, αλλά αντίθετα, βασίζονται στη στοχαστική τοποθέτηση των σκεδαστών στο χώρο ακολουθώντας μία προκαθορισμένη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Αυτά τα μοντέλα βασίζονται στη στοχαστική περιγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των διαύλων. Η θέση των σκεδαστών στο χώρο επηρεάζει παραμέτρους διάδοσης, όπως το μήκος διαδρομής, γωνίες άφιξης (angles of arrival, AoAs) και γωνίες αναχώρησης (angles of departure, AoDs) των πολυδιαδρομικών συνιστωσών, καθυστέρηση άφιξης κ.ά. Επιπλέον, θεωρώντας κίνηση των σκεδαστών ή/και του πομπού και του δέκτη, όλες οι παραπάνω μεταβλητές είναι χρονικά μεταβαλλόμενες, όπως άλλωστε και το πλήθος των πολυδιαδρομικών συνιστωσών. Η κρουστική απόκριση μεταξύ μίας κεραίας εκπομπής και μίας κεραίας λήψης εκφράζεται ως:

$$h(t, \tau, \Omega_T, \Omega_R) = \sum_{i=0}^{Q(t)-1} h_i(t, \tau, \Omega_T, \Omega_R)$$
, όπου $Q(t)$ εκφράζει το χρονικά μεταβαλλόμενο πλήθος πολυδιαδρομικών συνιστωσών, τα η καθυστέρηση, Ω_T κατεύθυνση αναχώρησης και Ω_R κατεύθυνση άφιξης i -οστής συνιστώσας [18].

Τα γεωμετρικά – στοχαστικά μοντέλα έχουν βασικό πλεονέκτημα τη δυνατότητα που παρέχουν για την αναπαράσταση πολλών φαινομένων, όπως τη χρονική μεταβολή του διαύλου και τις διαλείψεις μικρής και μεγάλης κλίμακας. Αυτό γίνεται, ελέγχοντας την κατανομή των σκεδαστών στο χώρο και την ταχύτητα των σκεδαστών, του πομπού και του δέκτη. Στις πιο συχνές περιπτώσεις, θεωρείται ότι οι συνιστώσες πολλαπλών διαδρομών, αλληλεπιδρούν στη διαδρομή τους από την κεραία εκπομπής προς την κεραία λήψης με ένα και μοναδικό σκεδαστή (single bounce scattering), ενώ υπάρχουν περιορισμένες προτάσεις μοντέλων που θεωρούν δύο σκεδαστές (double bounce scattering). Επίσης παρέχεται η δυνατότητα ομαδοποίησης των σκεδαστών (clusters) και ελέγχου του εύρους και της θέσης τους στο χώρο. Λόγω της ευελιξίας αυτών των μοντέλων ως προς τη δυνατότητα παραμετροποίησης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πληθώρα περιπτώσεων [24].

4.5.1.3 Μοντέλα διαύλων MIMO στα πλαίσια ευρωπαϊκής δράσης και σε οργανισμούς προτυποποίησης

Το πιο δημοφιλές γεωμετρικό - στοχαστικό μοντέλο είναι αυτό που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της κοινής ευρωπαϊκής κίνησης COST 259, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης αρκετών διαφορετικών περιβαλλόντων διάδοσης. Το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε σε μελέτες συστημάτων SIMO και MISO, αλλά για την εφαρμογή του σε μελέτες MIMO χρειάστηκαν βελτιώσεις. Το νέο μοντέλο προέκυψε στα πλαίσια της δράσης COST 273 [11].

Τα τελευταία χρόνια όμως, για τις ανάγκες των μελετών προτυποποίησης συστημάτων τρίτης γενιάς, αναπτύχθηκε το μοντέλο διαύλου MIMO για εξωτερικούς χώρους, γνωστό ως 3GPP spatial channel model (3GPP-SCM). Αυτό ασχολείται με την περιγραφή εξωτερικών περιβαλλόντων διάδοσης πολλαπλών χρηστών. Από τον ορισμό του αυτό το μοντέλο θεωρεί συνολικά 6 χρονικά διαχωρίσιμες διαδρομές (taps), κάθε μία από τις οποίες αποτελείται από 20 μή διαχωρίσιμες πολυδιαδρομικές συνιστώσες, ενώ το πλήθος των στοιχειοκεραιών των κινητών τερματικών και των σταθμών βάσης είναι ίσο με δύο. Επίσης, τα κινητά τερματικά κατανέμονται κατά το δυνατό ομοιόμορφα εντός μίας κυψέλης. Μετά την αρχικοποίηση όλων των παραμέτρων του πολυχρηστικού περιβάλλοντος διάδοσης, υπολογίζεται η κρουστική απόκριση μεταξύ των στοιχειοκεραιών πομπού και δέκτη, για κάθε κινητό τερματικό ξεχωριστά σύμφωνα με την αρχή της υπέρθεσης. Επιπλέον λεπτομέρειες υλοποίησης του μοντέλου 3GPP/3GPP2 είναι διαθέσιμες στην αναφορά [11].

Για να είναι δυνατή η μελέτη συστημάτων και πιο πάνω από της τρίτης γενιάς (beyond 3G systems, B3G), αναπτύχθηκε ένα μοντέλο καναλιών MIMO στα πλαίσια της δράσης Winner, του οποίου η αρχιτεκτονική βασίστηκε αρχικά στο μοντέλο 3GPP/3GPP2 για προσομοίωση περιβαλλόντων εξωτερικού χώρου και στο μοντέλο IEEE 802.11n για προσομοιώσεις διάδοσης εσωτερικού χώρου. Ωστόσο, το αναθεωρημένο μοντέλο δεν ήταν επαρκές για μοντελοποίηση απαιτητικών συνθηκών διάδοσης. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε τελικά παρέχει χαρακτηρισμό 17 διαφορετικών σεναρίων συνθηκών διάδοσης (εξωτερικών και εσωτερικών), ενώ παρέχει εργαλεία για αξιολόγηση επίδοσης τόσο σε επίπεδο ζεύξης, όσο και σε επίπεδο συστήματος. Για κάθε σενάριο υπάρχουν δύο τύποι μοντέλων διαύλου: Ένα γενικό μοντέλο (generic) και ένα μοντέλο με περιορισμένη ευελιξία που βασίζεται στην ύπαρξη αριθμού συστάδων (clusters) σκεδαστών και σε ισάριθμες χρονικά

διαχωρίσιμες διαδρομές (clustered delay line model, CDL). Επίσης, παρέχεται η δυνατότητα ορισμού τριδιάστατων διαγραμμάτων ακτινοβολίας εκπομπής και λήψης (δηλ. συμπεριλαμβανομένων των γωνιών ανύψωσης), καθώς και η θεώρηση τριδιάστατων γεωμετριών στοιχειοκεραίας [11].

4.6 Τα συστήματα MIMO στο εμπόριο

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, οι ασύρματες επικοινωνίες άρχισαν να γίνονται εμπορικά γνωστές στον αναπτυγμένο κόσμο και από τότε, η ανάπτυξή τους υπήρξε ραγδαία. Η κινητή τηλεφωνία, η οποία λόγω της υποστήριξης της κινητικότητας των χρηστών εξαπλώθηκε με γρήγορους ρυθμούς, ώσπου έφθασε να αριθμεί πάνω από 5 δισεκατομμύρια χρήστες μέχρι τα μέσα του 2010. Ωστόσο, τα κινητά συστήματα επικοινωνιών, δεν υπήρξαν τα μοναδικά ασύρματα συστήματα με μεγάλη διείσδυση στους καταναλωτές. Από τις αρχές του 2000 οι ασύρματες προσωπικές πλέον, επικοινωνίες ξεκίνησαν ραγδαία εξάπλωση 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. Επομένως είναι σαφές ότι οι ασύρματες επικοινωνίες θα αποτελέσουν και στις επόμενες δεκαετίες έντονο ενδιαφέρον και μεγάλη ανάπτυξη [25].

Τρεις είναι οι κύριες περιοχές εφαρμογής των ασύρματων κινητών επικοινωνιών οι οποίες εμφανίζουν αξιοσημείωτη εξέλιξη και, συνεπώς, παρουσιάζουν μεγάλο σχεδιαστικό και ερευνητικό ενδιαφέρον [25]:

- 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, το πρώτο εμπορικό σύστημα που χρησιμοποίησε την τεχνολογία mimo-OFDMA εμφάνισε η Iospan Wireless Inc. 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 [4].

Στις κινητές επικοινωνίες, γίνεται μια προσπάθεια 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 Lucent 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. Άλλες επιχειρήσεις ανέπτυξαν mimo- OFDMA λύσεις για IEEE 802.16e WiMAX ευρυζωνικά κινητά πρότυπα. Το 2006, κάποιες άλλες επιχειρήσεις 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[1].

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 [1].

5^ο Κεφάλαιο: Συμπεράσματα

Αναμφισβήτητα, τα συστήματα MIMO αποτελούν σημαντική ενότητα των σύγχρονων επικοινωνιών και τα πλεονεκτήματα που παρέχουν είναι εξαιρετικά ωφέλιμα. Ωστόσο, η αυξημένη πολυπλοκότητά τους και συνεπώς το μεγάλο κόστος κατασκευής τους αποτελούν μειονεκτήματα που είναι δύσκολο να παρακαμφθούν κατά τη εκπόνηση μίας τηλεπικοινωνιακής μελέτης. Όπως αναφέρθηκε στην αρχή αυτού του κεφαλαίου και όπως αποδείχτηκε τελικά από όλη τη μελέτη που ακολούθησε, η υβριδική επιλογή κεραιών είναι η απάντηση στο μοναδικό σημαντικό μειονέκτημα των συστημάτων MIMO. Για το λόγο αυτό, η σπουδαιότητα της προσέγγισης αυτής είναι μεγάλη.

Το σημαντικότερο όμως συμπέρασμα της ανάλυσης που προηγήθηκε, είναι πως με σωστό σχεδιασμό διατάξεων επεξεργασίας σήματος, με λεπτομερή μελέτη του καναλιού και κατάλληλη επιλογή αλγορίθμων, η επιλογή κεραιών μπορεί να μειώσει το κόστος χωρίς να προκαλέσει σημαντικές απώλειες στην επίδοση των συστημάτων. Δηλαδή παρέχει τη δυνατότητα να περιοριστεί σημαντικά ένα βασικό μειονέκτημα των συστημάτων MIMO, χωρίς όμως να επηρεαστούν ιδιαίτερα οι ωφέλιμες λειτουργίες τους, όπως η υψηλή χωρητικότητα ή η αυξημένη αξιοπιστία.

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1 Πολυόδευση σε ασύρματο κανάλι.....	11
Εικόνα 2 Το τερματικό κινείται και το σήμα του επηρεάζεται από τους μηχανισμούς διάδοσης	11
Εικόνα 3 Ζώνες συχνότητων.....	12
Εικόνα 4 Περιοχές ακτινοβολίας.....	13
Εικόνα 5 Διάγραμμα ακτινοβολίας ιστροπικής κεραίας.....	14
Εικόνα 6 Διάγραμμα ακτινοβολίας κατευθυντικής κεραίας.....	15
Εικόνα 7 Διάγραμμα ακτινοβολίας ομοιοκατευθυντικής κεραίας	15
Εικόνα 8 Διάφορες κεραίες	16
Εικόνα 9 Διαμόρφωση συχνότητας.....	17
Εικόνα 10 Διαμόρφωση πλάτους.....	18
Εικόνα 11 QPSK	21
Εικόνα 12 Πολλαπλές διαδρομές.....	22
Εικόνα 13 Προφίλ καθυστέρησης ισχύος	25
Εικόνα 14 Διαλείψεις σε ασυσχέτιστους διαύλους	30
Εικόνα 15 Βελτίωση ρυθμού σφαλμάτων με χρήση διαφορικών τεχνικών	31
Εικόνα 16 Γενική μορφή διάταξης διαφορικής λήψης χώρου	32
Εικόνα 17 Τρόποι πρόσβασης.....	37
Εικόνα 18 Αρχιτεκτονική συστημάτων MIMO	38
Εικόνα 19 Αύξηση απόδοσης συστημάτων MIMO	39
Εικόνα 20 Περιβάλλον πολυδιαδρομών	44
Εικόνα 21 Σχηματικό διάγραμμα MIMO	46
Εικόνα 22 MIMO διάγραμμα.....	48
Εικόνα 23 Μοντέλα διαύλων	50
Εικόνα 24 α. απευθείας συνιστώσα β. ανάκλαση γ. περίθλαση δ. διάχυση.....	51

Πίνακας εξισώσεων

Εξίσωση 1 Νόμος Friis	23
Εξίσωση 2 Εκθετικό προφίλ	25
Εξίσωση 3 Προφίλ Gauss	25
Εξίσωση 4 ομοιόμορφο προφίλ	25
Εξίσωση 5 Σηματοθορυβικός λόγος	43
Εξίσωση 6 χωρητικότητα	43
Εξίσωση 7 Σηματοθορυβικός λόγος με κέρδος	43
Εξίσωση 8 MIMO χωρητικότητα	45

Βιβλιογραφία

1. <https://www.alcatel-lucent.com/>
2. www.ceid.upatras.gr
3. <https://www.iit.demokritos.gr>
4. www.iospanwireless.com
5. <http://en.wikibooks.org>
6. <http://en.wikipedia.org>
7. <http://openarchives.gr>
8. <http://www.signal.uu.se/Publications>
9. <https://www.researchgate.net/>
10. <http://telcoantennas.com.au>
11. 3GPP/3GPP2 Spatial channel model ad hoc group, “spatial channel model for Multiple Input – Multiple Output (MIMO) simulations v.6.0.1,” *Technical Report*, 2003.
12. Alamouti S., “A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications,” *IEEE Journal on Select Areas in Communications*, vol. 16, October 1998.
13. Almers P. etc, “Survey of Channel and Radio Propagation Models for Wireless MIMO Systems,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2007.
14. Gesbert D. etc, “From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems”, *IEEE Journal on selected areas in Commun.*, Vol. 21, 2003.
15. Molisch A. etc, “The COST 259 directional channel model - Part I: Overview and methodology,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.5, 2006.
16. Neasmith E. and N. C. Beaulieu, “New results on selection diversity”, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, 1998.
17. Oestges C., “Deterministic channel modeling and performance simulation of microcellular wideband communication systems,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.51, no.6, 2002.
18. Oestges C. and B. Clerckx, *MIMO wireless communications, from real-world propagation to space-time code design*. Elsevier, 2007.

19. Proakis J. & Masoud Salehi, *Συστήματα Τηλεπικοινωνιών*, Αθήνα, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2002
20. Paulraj A., etc, “Introduction to Space-Time Wireless Communications”, Cambridge University Press, 2003.
21. Sendonaris A, etc, “User cooperation diversity – Part I: System description,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, 2003
22. M. Steinbauer, “The Double-Directional Radio Channel,” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 43, 2001.
23. G. L. Stuber, *Principles of Mobile Communication*, 2nd ed. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 2001
24. Waldschmidt C. and Werner Wiesbeck, “Compact Wide-Band Multimode Antennas for MIMO and Diversity”, *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol.52, 2004.
25. Zajic A. and G. L. Stuber, “Statistical Properties of Wideband MIMO Mobile-to-Mobile Channels,” *Proc. of IEEE WCNC'08*, Las Vegas, NE, 2008.
26. *Ασύρματες επικοινωνίες Αρχές και Πρακτική Β' Έκδοση*, Rappaport, Εκδόσεις Τζιόλα 2006
27. *Δίκτυα κινητών και προσωπικών επικοινωνιών*, Μ. Ε. Θεολόγου, Εκδόσεις Τζιόλα 2007
28. *Κεραίες Ασύρματες Ζεύξεις*, Χ. Καψάλης – Π. Κωττής, Εκδόσεις Τζιόλα 2008
29. *Συστήματα κινητών επικοινωνιών*, Α.Κανάτας- Φ. Κωνσταντίνου- Γ. Πάντος, Εκδόσεις Παπασωτηρίου 2008
30. Παρίκος Γ., “Ραδιοφωνία”, Αθήνα, Ίων, 1996