



Πανεπιστήμιο Αιγαίου

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

Διπλωματική Εργασία

Παναγιώτα Κώνστα

321/2018111

**Ανάλυση και προσομοίωση συστημάτων με ολοκλήρωση
επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης
(Joint Communications and Sensing)**

Επιβλέπων Καθηγητής: Κωνσταντίνος Μαλιάτσος

Τριμελής Επιτροπή:

Κωνσταντίνος Μαλιάτσος

Χαράλαμπος Σκιάνης

Δημήτριος Σκούτας

Σάμος, 2025

Περίληψη

Καθοριστικό παράγοντα αποτελούν τα τελευταία χρόνια οι ασύρματες επικοινωνίες για την εξυπηρέτηση καθημερινών αναγκών καθώς και για την λειτουργία βιομηχανιών και συστημάτων άμυνας. Οι απαιτήσεις για καλύτερη ταχύτητα, ποιότητα, αύξηση της μεταδιδόμενης πληροφορίας και ευελιξία συνεχώς αυξάνονται. Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη της τεχνολογίας Joint Communication and Radar Sensing (JCAS – Από κοινού Επικοινωνία και Ανίχνευση), η οποία συνδυάζει τις τεχνολογίες radar και επικοινωνιών σε ένα σύστημα. Ένα τέτοιου είδους σύστημα, μπορεί να ανακτήσει πληροφορίες από κινητούς στόχους, όπως οχήματα και ανθρώπους γύρω από τους πομποδέκτες. Δηλαδή, έχουν την δυνατότητα να εστιάσουν στον εντοπισμό, την παρακολούθηση και την αναγνώριση των στόχων αυτών. Η ανίχνευση στα συστήματα JCAS παρέχει πιο λεπτομερείς πληροφορίες για το περιβάλλον έχοντας κοινούς πόρους, δηλαδή εύρος ζώνης και κεραίες, και εκπεμπόμενα σήματα για τις λειτουργίες ανίχνευσης και επικοινωνίας του, διατηρώντας την ίδια στιγμή αξιόπιστη επικοινωνία.

Το κανάλι διάδοσης επηρεάζει την συμπεριφορά των σημάτων καθώς αυτά μεταφέρονται από τον πομπό στον δέκτη, και αποτελεί κομμάτι στην ανάπτυξη των συστημάτων JCAS. Παράγοντες όπως οι παρεμβολές, η εξασθένιση, οι διαλείψεις, οι μετατοπίσεις Doppler και η πολυδιαδρομική διάδοση προκαλούν παραμορφώσεις στο σήμα καθιστώντας δύσκολη την μοντελοποίηση του καναλιού. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα αναλυθούν τόσο τα μαθηματικά μοντέλα όσο και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την αποφυγή και διόρθωση παραμορφώσεων του σήματος.

Στο πρώτο κεφάλαιο, περιγράφονται οι βασικές αρχές της διάδοσης των ραδιοκυμάτων, οι μηχανισμοί εξασθένησης και τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση του καναλιού. Το δεύτερο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην πολυπλεξία συχνότητας (FDM) και την διαμόρφωση OFDM, με στόχο τη μείωση της διασυμβολικής παρεμβολής και την αύξηση της φασματικής απόδοσης. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η λειτουργία και τα χαρακτηριστικά των συστημάτων ραντάρ, καθώς και τεχνικές ανίχνευσης και παρακολούθησης στόχων. Το τέταρτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στη μοντελοποίηση του καναλιού διάδοσης, τις επιδράσεις της μετατόπισης Doppler και της καθυστέρησης, καθώς και στη χρήση σημειακών σκεδαστών και τη χρήση του steering vector (διάνυσμα κατεύθυνσης) για την αναπαράσταση των χωρικών χαρακτηριστικών του καναλιού.

Λέξεις Κλειδιά

Joint Communication and Radar Sensing (JCAS), Ραδιοδιάυλος, Ραδιοδιάδοση, Ανάκλαση, Σκέδαση, Διάθλαση, Περίθλαση, Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (OFDM), Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (FDM), Διαλείψεις, Κατανομή Rayleigh, Rice, Nakagami, Πολλαπλές Κεραίες Εισόδου-Εξόδου (MIMO), Φαινόμενο Doppler, Εμβέλεια Ραντάρ (RCS), Beamforming, Μοντελοποίηση Καναλιού

Abstract

In recent years, wireless communications have been a key factor in serving daily needs, as well as in the operation of industries and defense systems. The demand for higher speed, better quality, increased data transmission, and greater flexibility is constantly growing. This has led to the development of Joint Communication and Radar Sensing (JCAS) technology, which integrates radar and communication technologies into a single network. Such a system can retrieve information from moving targets, such as vehicles and people, around transceivers, surpassing traditional radar systems. In other words, it has the capability to focus on target detection, tracking, and identification. Detection in JCAS systems provides more detailed environmental information by sharing resources—such as bandwidth, antennas, and transmitted signals—between sensing and communication functions, while maintaining reliable communication.

The propagation channel affects signal behavior as it travels from the transmitter to the receiver and plays a crucial role in the development of JCAS systems. Factors such as interference, fading, signal dropouts, Doppler shifts, and multipath propagation cause distortions that make channel modeling challenging. This thesis analyzes both mathematical models, and the techniques used to mitigate and correct signal distortions.

The first chapter describes the fundamental principles of radio wave propagation, attenuation mechanisms, and the mathematical models used for channel modeling. The second chapter focuses on frequency division multiplexing (FDM) and the orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technique, aiming to reduce intersymbol interference and enhance spectral efficiency. The third chapter examines the operation and characteristics of radar systems, along with target detection and tracking techniques. Finally, the fourth chapter is dedicated to propagation channel modeling, the effects of Doppler shift and delay, as well as the use of point scatterers and the Steering Vector method to represent the spatial characteristics of the channel.

Keywords

Joint Communication and Radar Sensing (JCAS), Radio Channel, Radio Propagation Mechanisms, Reflection, Scattering, Refraction, Diffraction, Frequency Division Multiplexing (FDM), Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), Fading (Signal Attenuation), Rayleigh, Rice, Nakagami Distribution, Multiple Input Multiple Output (MIMO), Doppler Effect, Radar Cross Section (RCS), Beamforming, Channel Modeling

Κατάλογος Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1. Βασικές Αρχές Ραδιοδιαύλου, Μηχανισμοί Ραδιοδιάδοσης και Επιδράσεις στα Επικοινωνιακά Συστήματα	9
1.1 Ραδιοδιάυλος και παράγοντες επίδρασης	9
1.2 Μηχανισμοί Ραδιοδιάδοσης	9
1.2.1 Απευθείας διάδοση (Line of Sight -LoS- Propagation).	9
1.2.2 Ανάκλαση (Reflection - Multipath Propagation).	10
1.2.3 Σκέδαση (Scattering).	10
1.2.4 Διάθλαση (Refraction).	11
1.2.5 Απορρόφηση (Absorption).	11
1.2.6 Περίθλαση (Diffraction).	12
1.2.7 Εξασθένηση (Attenuation).	12
1.3 Αποτελέσματα των φαινομένων τηλεπικοινωνιών	13
1.4 Διαλείψεις	15
1.5 Μαθηματικά μοντέλα.....	16
1.5.1 Κατανομή Gauss.	16
1.5.2 Κατανομή Rayleigh.	17
1.5.3 Κατανομή Rice.	17
1.5.4 Κατανομή Nakagami-m.	18
1.6 Συνθήκες LOS και NLOS	18
1.6.1 LOS (Line of Sight) επικοινωνία.	18
1.6.2 NLOS (Non-Line of Sight) επικοινωνία.	19
1.6.3 Υβριδικά μοντέλα επικοινωνίας	19
1.7 Επιπτώσεις στα επικοινωνιακά συστήματα.....	20
1.8 Τεχνικές μετριάσμου.....	20
1.9 Χρονικές και χωρικές διακυμάνσεις.....	21
1.9.1 Χρονικές διακυμάνσεις.	21
1.9.2 Χωρικές διακυμάνσεις.	21
1.10 Φαινόμενο Doppler	22
1.11 Είδη Κεραιοστοιχείων	23
1.11.1 Μοντέλα συνεχούς χρόνου για κεραιοδιατάξεις.....	23
1.11.2 Μοντέλα διακριτού χρόνου	26
Κεφάλαιο 2. Πολυπλεξία FDM και OFDM: Χαρακτηριστικά, Μετάδοση και Προκλήσεις Συγχρονισμού 28	
2.1 Πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDM)	28
2.2 Τεχνική OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)	28

2.3	Χαρακτηριστικά της OFDM	29
2.4	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα του σχήματος OFDM	31
2.5	Διαφορές μεταξύ FDM και OFDM	31
2.6	Τεχνικές Διαμόρφωσης	32
2.6.1	Διαμόρφωση Ολίσθησης Φάσης (Phase Shift Keying - PSK)	32
2.6.2	Quadrature Amplitude Modulation (QAM)	34
2.6.3	Pulse Amplitude Modulation (PAM)	35
2.7	Διαδικασία μετάδοσης OFDM σήματος	36
2.8	Τρόπος αποφυγής διασυμβολικής παρεμβολής	38
2.9	Προβλήματα Συγχρονισμού	38
2.10	PARP	39
2.11	Συμπεριφορά OFDM σε ασύρματους διαύλους	39
Κεφάλαιο 3. Ολοκληρωμένα Συστήματα Επικοινωνίας και Ραντάρ (JCAS): Λειτουργία, Ανίχνευση και Βελτιστοποίηση		
3.1	Joint communication and ραντάρ sensing (JCAS) systems.	41
3.2	Τα χαρακτηριστικά των ραντάρ	41
3.3	Η λειτουργία των ραντάρ	42
3.4	Χαρακτηριστικά των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων	43
3.5	Διαδικασία αποστολής σήματος	44
3.6	Radar range equation	45
3.6.1	Ορισμός του radar cross section (RCS)	46
3.6.2	Θόρυβος	47
3.6.3	Track and Search Radar Range Equation	48
3.6.4	Συνιστώσες του RCS	49
3.6.5	Φαινόμενα ανάκλασης και περίθλασης	50
3.6.6	Προσδιορισμός RCS	52
3.7	Ανίχνευση στόχων ραντάρ	53
3.7.1	Διακύμανση και ανίχνευση στόχων	53
3.7.2	Βελτίωση ανίχνευσης	53
3.7.3	Constant False Alarm Rate (CFAR)	54
3.8	Pulse compression	55
3.8.1	Τεχνικές βελτιστοποίησης ανίχνευσης στόχων	55
3.9	Τύπος Κεραίας: Uniform Linear Array (ULA)	56
Κεφάλαιο 4. Μοντελοποίηση και Χαρακτηριστικά Καναλιών σε Συστήματα JCAS		
4.1	Κρουστική απόκριση καναλιού	57
4.2	Διακριτή συνάρτηση μεταφοράς - Channel Transfer Function	58

4.3	Καθυστερήσεις και μετατοπίσεις Doppler.....	58
4.4	Steering Vector	58
4.5	Μοντέλα Καναλιών	59
4.6	Μοντελοποίηση Καναλιού	61
	Συμπεράσματα.....	81
	Βιβλιογραφία.....	82

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1.	Απευθείας διάδοση του σήματος από τον πομπό στον δέκτη χωρίς εμπόδια και παρεμβολές.	10
Εικόνα 2.	Ανάκλαση σήματος σε μεγάλες επίπεδες επιφάνειες.	10
Εικόνα 3.	Σκέδαση σήματος - Το σήμα διασκορπίζεται προς διαφορετικές κατευθύνσεις.	11
Εικόνα 4:	Διάδοση σήματος σε περιοχές με διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες.	11
Εικόνα 5:	Απορρόφηση και εξασθένηση σήματος καθώς αυτό περνάει μέσα από κάποιο μέσο.	12
Εικόνα 6:	Κάμψη του σήματος γύρω από ένα αντικείμενο.	12
Εικόνα 7:	Απώλεια Διαδρομής (Path Loss) – εκθετική μείωση της ισχύος με την απόσταση.	13
Εικόνα 8:	Σκίαση (Shadowing) – διακυμάνσεις της ισχύος λόγω εμποδίων.	14
Εικόνα 9:	Πολυδιαδρομική Διάδοση (Multipath) – γρήγορες μεταβολές της ισχύος λόγω ανακλάσεων και παρεμβολών.	14
Εικόνα 10:	Επικοινωνία Οπτικής Επαφής (LOS) – Άμεση και ανεμπόδιστη μετάδοση σήματος.	19
Εικόνα 11:	Επικοινωνία Χωρίς Οπτική Επαφή (NLOS) – Το σήμα παρεμποδίζεται από εμπόδια.	19
Εικόνα 12:	Φαινόμενο Doppler - Όταν η πηγή (ασθενοφόρο) πλησιάζει, ο παρατηρητής αντιλαμβάνεται υψηλότερη συχνότητα, ενώ όταν απομακρύνεται, η συχνότητα μειώνεται.	23
Εικόνα 13:	Μετάδοση σήματος μεταξύ πομπού (Tx) και δέκτη (Rx) που αποτελούνται από μία κεραία.	23
Εικόνα 14:	Μετάδοση σήματος μεταξύ πομπού (Tx) που αποτελείται από μία κεραία και δέκτη (Rx) που αποτελείται από πάνω από μία κεραία.	24
Εικόνα 15:	Μετάδοση σήματος μεταξύ πομπού (Tx) που αποτελείται από πάνω από μία κεραία και δέκτη (Rx) που αποτελείται από μία κεραία.	25
Εικόνα 16:	Μετάδοση σήματος μεταξύ πομπού (Tx) και δέκτη (Rx) που αποτελούνται από πάνω από μία κεραία.	25
Εικόνα 17:	Μετατροπή πεδίου συχνότητας σε πεδίο χρόνου με χρήση IFFT και FFT για την αντίστροφη διαδικασία.	30
Εικόνα 18:	Παρεμβολή συμβόλων στο κανάλι επικοινωνίας.	30
Εικόνα 19:	Χρήση διαστημάτων προστασίας για την μείωση των παρεμβολών μεταξύ των συμβόλων.	31
Εικόνα 20:	Χρήση κυκλικού προθέματος για την μείωση της διασυμβολικής παρεμβολής.	31

Εικόνα 21: FDM - Χρήση ζωνών προστασίας μεταξύ των καναλιών για αποφυγή παρεμβολών.	32
Εικόνα 22: OFDM - Επικάλυψη μεταξύ των καναλιών για λιγότερες παρεμβολές και φασματική απόδοση.	32
Εικόνα 23: Διάγραμμα αστερισμού BPSK.	33
Εικόνα 24: Διάγραμμα αστερισμού QPSK με διαφορετικά επίπεδα φάσης και πλάτους.	33
Εικόνα 25: Διάγραμμα αστερισμού 8-PSK και 16-PSK.	34
Εικόνα 26: Διάγραμμα αστερισμού 4-QAM.	34
Εικόνα 27: Διάγραμμα αστερισμού 8-QAM με διαφορετικά επίπεδα φάσης και πλάτους.	35
Εικόνα 28: Διάγραμμα αστερισμού 16-QAM με διαφορετικά επίπεδα φάσης και πλάτους	35
Εικόνα 29: Διάγραμμα αστερισμού για διαφορετικές τιμές M.	36
Εικόνα 30: Διαδικασία μετάδοσης σήματος OFDM.	36
Εικόνα 31: Σύστημα JCAS με έναν σταθμό βάσης που επικοινωνεί με πολλαπλούς χρήστες και ανιχνεύει στόχους.	41
Εικόνα 32: Διάγραμμα κύματος που απεικονίζει το μήκος κύματος, το πλάτος, την περίοδο κύματος, τον χρόνο, την φάση και την ένταση.	43
Εικόνα 33: Διάγραμμα λειτουργίας συστήματος ραντάρ.	44
Εικόνα 34: Αρχή λειτουργίας ραντάρ με στόχο ένα κινούμενο αντικείμενο.	47
Εικόνα 35: Μοντελοποίηση της σκέδασης του σήματος.	50
Εικόνα 36: Ανάκλαση σήματος σε μια λεία επιφάνεια.	50
Εικόνα 37: Κάμψη σήματος γύρω από την άκρη ενός αντικειμένου.	50
Εικόνα 38: Εξάπλωση κύματος λόγω πρόσκρουσης κύματος στο πίσω μέρος του αντικειμένου.	51
Εικόνα 39: Ανάκλαση κύματος σε κυλινδρική επιφάνεια.	51
Εικόνα 40: Φαινόμενο διάδοσης κύματος γύρω από κυλινδρική επιφάνεια.	51
Εικόνα 41: Σκέδαση κύματος από κοιλότητα.	52
Εικόνα 42: Πιθανότητα ανίχνευσης στόχου. Η σχέση μεταξύ στάθμης σήματος, κατωφλίου ανίχνευσης και πιθανότητας ψευδούς συναγερμού.	53
Εικόνα 43: Ρύθμιση περιβάλλοντος επικοινωνίας.	61
Εικόνα 44: Τοποθέτηση σκεδαστών.	62
Εικόνα 45: Παραμετροποίηση ιδιοτήτων διάδοσης και εξασθένισης.	63
Εικόνα 46: Υπολογισμός Doppler.	64
Εικόνα 47: Παραμετροποίηση OFDM και τοποθέτηση πιλότων.	65
Εικόνα 48: Δημιουργία του καναλιού μετάδοσης.	66
Εικόνα 49: Προσθήκη διαμόρφωσης και δημιουργία του πομπού.	66
Εικόνα 50: Υπολογισμός της απόκρισης συχνότητας του καναλιού.	67
Εικόνα 51: Δημιουργία του δέκτη.	68
Εικόνα 52: Ανίχνευση πιλότων και εφαρμογή ισοστάθμισης.	68
Εικόνα 53: Προσθήκη καθυστερήσεων και θορύβου.	69
Εικόνα 54: Ανάλυση σήματος στο πεδίο καθυστέρησης και Doppler.	69
Εικόνα 55: Απεικόνιση καναλιού αφού έχουν οριστεί τα τοπικά μέγιστα και υπολογιστεί οι καθυστερήσεις.	69
Εικόνα 56: Υπολογισμός της απόδοσης της ανίχνευσης και των πιθανοτήτων missed detection και false alarm.	70
Εικόνα 57: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα.	71

Εικόνα 58: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα.	71
Εικόνα 59: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα.	72
Εικόνα 60: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με μία χαμένη ανίχνευση.	72
Εικόνα 61: Αναπαράσταση των peaks για τους 5 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα.	73
Εικόνα 62: Αναπαράσταση των peaks για τους 5 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα.	73
Εικόνα 63: Αναπαράσταση των peaks για τους 5 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα.	73
Εικόνα 64: Αναπαράσταση των peaks για τους 15 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα.	74
Εικόνα 65: Αναπαράσταση των peaks για τους 20 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα.	74
Εικόνα 66: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με SNR 5.	75
Εικόνα 67: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με SNR 50.	75
Εικόνα 68: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με SNR 100.	75
Εικόνα 69: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με threshold 5.	76
Εικόνα 70: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με threshold 30.	76
Εικόνα 71: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με threshold 50.	77
Εικόνα 72: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με threshold με βάση το SNR 5.	77
Εικόνα 73: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με threshold με βάση το SNR 5.	78
Εικόνα 74: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με threshold με βάση το SNR 5.	78
Εικόνα 75: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με threshold με βάση το SNR 50.	79
Εικόνα 76: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με threshold με βάση το SNR 50.	79
Εικόνα 77: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με threshold με βάση το SNR 50.	79
Εικόνα 78: Ανίχνευση peaks σε 10 επαναλήψεις.	80

Κεφάλαιο 1. Βασικές Αρχές Ραδιοδιαύλου, Μηχανισμοί Ραδιοδιάδοσης και Επιδράσεις στα Επικοινωνιακά Συστήματα

1.1 Ραδιοδιάυλος και παράγοντες επίδρασης

Ο ραδιοδιάυλος αποτελεί το μέσο μετάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που χρησιμοποιείται στις μεταδόσεις ραδιοσυχνοτήτων για τις τηλεπικοινωνίες. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που καθορίζουν τη χρήση των ραδιοδιαύλων από τα τηλεπικοινωνιακά σήματα, όπως η συχνότητα, το εύρος ζώνης, το σχήμα διαμόρφωσης και οι τεχνικές κωδικοποίησης.

Η μετάδοση πληροφοριών μέσω ραδιοκυμάτων μπορεί να επηρεαστεί από παρεμβολές άλλων σημάτων ή πηγών ραδιοζεύξης (RF interference). Οι αιτίες αυτών των παρεμβολών περιλαμβάνουν φυσικούς, τεχνητούς και γεωγραφικούς παράγοντες. Επίσης μπορεί να ευθύνονται και οι καιρικές συνθήκες, η κινητικότητα των χρηστών και η συχνότητα λειτουργίας του δικτύου. Ακόμα, η παρουσία πρόσθετων σημάτων στην ίδια ζώνη συχνοτήτων μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές και προβλήματα επικοινωνίας κατά τη μετάδοση ενός σήματος, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν μείωση της ισχύος σήματος, αύξηση του SINR (Signal to Interference and Noise Ratio) και αύξηση του ποσοστού σφάλματος συμβόλου (SER – Symbol Error Rate). Όλα αυτά οδηγούν σε αποτυχίες, καθυστερήσεις και μείωση της ποιότητας σήματος.

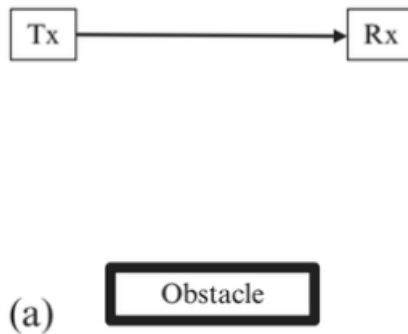
Έτσι, η κατανόηση όλων όσων αναφέρθηκαν παίζει σημαντικό ρόλο για την σχεδίαση των ασύρματων συστημάτων για να μπορέσουν να είναι αποδοτικά και να εκμεταλλεύονται σωστά όλους τους πόρους που τους είναι διαθέσιμοι. [12], [13], [15]

1.2 Μηχανισμοί Ραδιοδιάδοσης

Οι μηχανισμοί ραδιοδιάδοσης περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο τα σήματα αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον κατά την μετάδοσή τους, μεταξύ πομπού και δέκτη. Η αλληλεπίδραση αυτή μπορεί να επηρεάσει την ένταση, την κατεύθυνση και την ποιότητα των σημάτων. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις παίζουν σημαντικό ρόλο για τον κατάλληλο σχεδιασμό του συστήματος έτσι ώστε να είναι αποδοτικό, καθώς μπορεί να προκαλέσουν καθυστερήσεις, παραμορφώσεις και εξασθένιση του σήματος. Οι βασικοί μηχανισμοί που καθορίζουν τη ραδιοδιάδοση είναι οι εξής:

1.2.1 Απευθείας διάδοση (Line of Sight -LoS- Propagation).

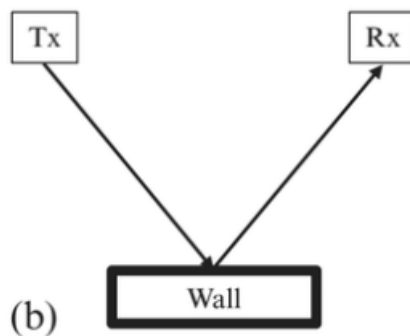
Η απευθείας διάδοση είναι ο τρόπος που τα ραδιοκύματα μπορούν να ταξιδέψουν σε κενό χώρο ή μέσω ενός μέσου σε ευθεία γραμμή, δηλαδή ταξιδεύουν απευθείας από τον πομπό στον δέκτη και πίσω χωρίς παρεμβολές ή εμπόδια. Κατά την διάδοση, το σήμα μπορεί να υποστεί όλα τα παρακάτω φαινόμενα με αποτέλεσμα να παραμορφώνεται ανάλογα.



Εικόνα 1. Απευθείας διάδοση του σήματος από τον πομπό στον δέκτη χωρίς εμπόδια και παρεμβολές.

1.2.2 Ανάκλαση (Reflection - Multipath Propagation).

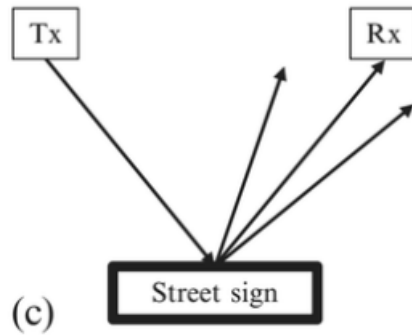
Η ανάκλαση συμβαίνει όταν τα ραδιοκύματα προσκρούουν σε επίπεδες επιφάνειες με μεγαλύτερες διαστάσεις σε σχέση με το μήκος κύματος του σήματος. Οι ανακλάσεις μπορούν να δημιουργήσουν πολλαπλές διαδρομές μετάδοσης, ενισχύοντας ή αποδυναμώνοντας το σήμα στο δέκτη, δηλαδή να οδηγήσει σε εποικοδομητική ή καταστροφική παρεμβολή, ανάλογα τις φάσεις τους. Όσων αφορά τα ραντάρ, ενώ το λαμβανόμενο σήμα περιλαμβάνει το άμεσο σήμα από τον στόχο, επίσης λαμβάνει και το ανακλώμενο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σήμα να φτάνει παραμορφωμένο αφού τα ανακλώμενα σήματα φτάνουν με διαφορετικές φάσεις και πλάτη. Έτσι μειώνεται η ακρίβεια του ραντάρ στον εντοπισμό και την παρακολούθηση των στόχων ειδικότερα σε περιβάλλοντα με ισχυρές ανακλάσεις, όπως πάνω από λείες ή υδάτινες επιφάνειες, όπου το σήμα μπορεί να αλλοιωθεί, προκαλώντας ψευδείς στόχους ή λανθασμένους υπολογισμούς των σημάτων.



Εικόνα 2. Ανάκλαση σήματος σε μεγάλες επίπεδες επιφάνειες.

1.2.3 Σκέδαση (Scattering).

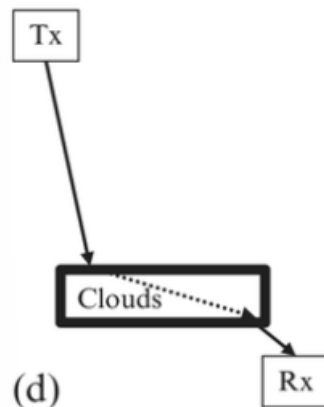
Η σκέδαση συμβαίνει όταν τα ραδιοκύματα συναντούν μεγάλες τραχιές επιφάνειες ή επιφάνειες με διαστάσεις ίσες/συγκρίσιμες με το μήκος κύματος, με αποτέλεσμα να αλλάζουν κατεύθυνση. Αυτό προκαλεί φαινόμενα πολλαπλών διαδρομών και διακυμάνσεις του σήματος καθιστώντας δυσκολότερη την ανίχνευση στόχων σε μεγάλες αποστάσεις, ειδικότερα όταν τα σήματα έχουν υψηλότερες συχνότητες.



Εικόνα 3. Σκέδαση σήματος - Το σήμα διασκορπίζεται προς διαφορετικές κατευθύνσεις.

1.2.4 Διάθλαση (Refraction).

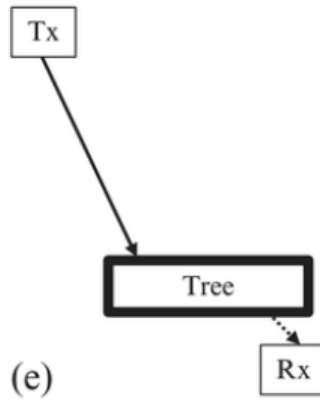
Τα κύματα υπόκεινται σε διάθλαση όταν η ταχύτητα ενός κύματος μεταβάλλεται καθώς ταξιδεύει σε περιοχές με διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, οι οποίες διαφέρουν σε πυκνότητα, πίεση και θερμοκρασία, ή και μεταξύ άλλων υλικών. Η δέσμη κάμπτεται λόγω της μεταβολής της ταχύτητας διευρύνοντας την εμβέλεια του πομπού, ενισχύοντας την κάλυψή του και την δυνατότητα ανίχνευσης του αλλά μπορεί να δημιουργήσει και τυφλά σημεία.



Εικόνα 4: Διάδοση σήματος σε περιοχές με διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες.

1.2.5 Απορρόφηση (Absorption).

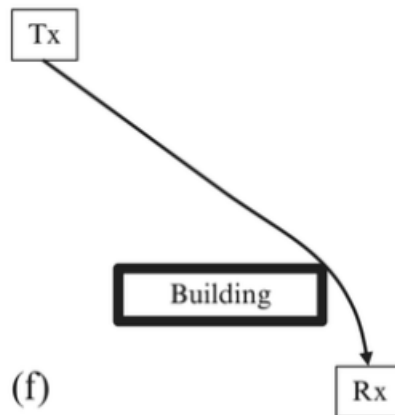
Απορρόφηση συμβαίνει όταν μειώνεται η ισχύς του σήματος καθώς αυτό περνάει μέσα από κάποιο μέσο. Ανάλογα την πυκνότητα του κάθε μέσου και της συχνότητας του σήματος, το σήμα απορροφάται με διαφορετικό ρυθμό. Αν η συχνότητα του σήματος είναι υψηλή, τότε απορροφάται το μεγαλύτερο μέρος του, καθώς τα μόρια του αέρα ή άλλων αέριων μέσων ή υλικών απορροφούν ένα μέρος της ενέργειας των σημάτων αυτών μειώνοντας την εμβέλειά τους. Αυτό επηρεάζει σημαντικά την ένταση που ταξιδεύουν τα ραδιοκύματα και την απόσταση που μπορούν να καλύψουν πριν η ισχύς τους μειωθεί σημαντικά και πλέον δεν είναι εύκολα ανιχνεύσιμα.



Εικόνα 5: Απορρόφηση και εξασθένηση σήματος καθώς αυτό περνάει μέσα από κάποιο μέσο.

1.2.6 Περίθλαση (Diffraction).

Η περίθλαση συμβαίνει όταν τα ραδιοκύματα προσκρούουν σε εμπόδια με διαστάσεις ισοδύναμες με το μήκος κύματος δημιουργώντας δευτερεύοντα κύματα. Έτσι, η διάδοση συμβαίνει προς πολλές κατευθύνσεις, ακόμα και σε περιοχές που ο πομπός δεν έχει άμεση ορατότητα. Αυτό γίνεται πιο έντονα όταν τα κύματα έχουν μεγαλύτερα μήκη κύματος. Επίσης αυτή η διαδικασία επιτρέπει στα κύματα να κάμπτονται, δίνοντας τη δυνατότητα στον πομπό να ανιχνεύσει στόχους πίσω από εμπόδια και έτσι να αυξήσει την εμβέλειά του. Ειδικότερα στα ραντάρ η συχνότητα της ακτινοβολίας τους επηρεάζει το πόσο μακριά μπορεί να ταξιδέψει ένα σήμα. Οι χαμηλότερες συχνότητες συνήθως ταξιδεύουν ευκολότερα γύρω από εμπόδια.



Εικόνα 6: Κάμψη του σήματος γύρω από ένα αντικείμενο.

1.2.7 Εξασθένηση (Attenuation).

Η εξασθένηση ορίζεται ως η μείωση της ισχύος του σήματος κατά την διάρκεια διάδοσής του σε μεγάλες αποστάσεις. Αυτό συμβαίνει επειδή τα κύματα αλληλεπιδρούν με τα μόρια και τα διάφορα σωματίδια στην ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα μέρος της ενέργειας να διασκορπίζεται και να χάνεται. Πιο συγκεκριμένα, ο βαθμός που εξασθενεί ένα σήμα εξαρτάται από την συχνότητά του. Οι υψηλές συχνότητες καθιστούν το σήμα πιο ευαίσθητο στην εξασθένηση, οπότε δεν είναι κατάλληλες για εφαρμογές χαμηλού υψόμετρου και μεγάλης εμβέλειας. Οι χαμηλές συχνότητες, καθιστούν το σήμα καταλληλότερο για εφαρμογές μεγαλύτερης εμβέλειας και δύσκολες καιρικές συνθήκες,

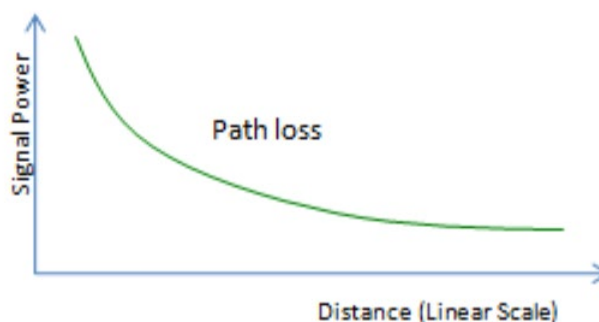
καθώς υφίσταται μικρότερη εξασθένηση. Ως εξασθένηση ορίζεται επίσης η μείωση ισχύος λόγω της διασποράς των κυμάτων προς άλλες κατευθύνσεις μακριά από τους δέκτες.

Αυτοί οι μηχανισμοί προκύπτουν επειδή διάφορα φυσικά ή τεχνητά αντικείμενα παρεμβάλλονται μεταξύ του πομπού και του δέκτη, συμμετέχοντας στη διάδοση ενώ κινούνται τυχαία στο περιβάλλον. Ως αποτέλεσμα αυτών των μηχανισμών διάδοσης, το σήμα εκπομπής ακολουθεί πολλαπλές διαδρομές που διαφέρουν ως προς το χρόνο, τη φάση και το πλάτος πριν φτάσει στο δέκτη ως σύνθετο σήμα. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως διάδοση πολλαπλών διαδρομών (multipath propagation). Ωστόσο, το φαινόμενο αυτό μπορεί να προκαλέσει διαλείψεις λόγω των διακυμάνσεων στο πλάτος του σήματος λήψης. Το πλάτος του λαμβανόμενου σήματος σε έναν ασύρματο δίαυλο μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα τριών συνιστωσών, οι οποίες είναι μέση τιμή των απωλειών διάδοσης, οι μακρόχρονες διαλείψεις και οι βραχύχρονες.

1.3 Αποτελέσματα των φαινομένων τηλεπικοινωνιών

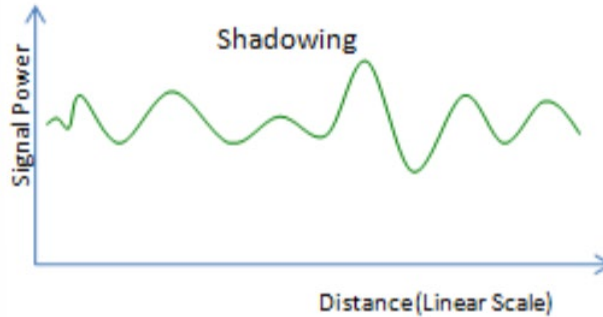
Τα φαινόμενα που επηρεάζουν την ασύρματη επικοινωνία συνοψίζονται στα ακόλουθα:

Η **απώλεια διαδρομής (path loss)**, είναι η μείωση της ισχύος του σήματος όταν τα ραδιοκύματα κινούνται στο χώρο. Πρόκειται για ένα φυσικό φαινόμενο που επηρεάζεται από τον χώρο μεταξύ του πομπού και του δέκτη, καθώς και από την ικανότητα του περιβάλλοντος να απορροφά και να διασκορπίζει τα σήματα. Για ένα στατικό δέκτη το φαινόμενο της απώλειας διαδρομής που αυξάνεται με την απόσταση είναι σταθερό.



Εικόνα 7: Απώλεια Διαδρομής (Path Loss) – εκθετική μείωση της ισχύος με την απόσταση.

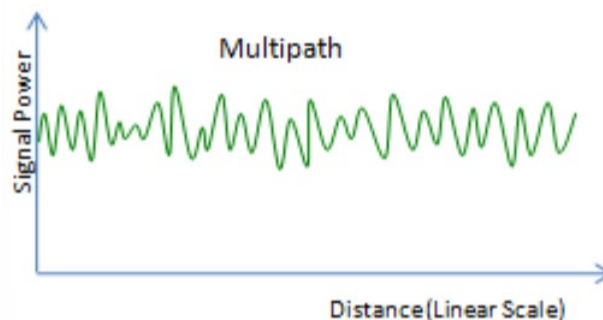
Η **σκίαση ή μακρόχρονες διαλείψεις (shadowing or slow fading)**, είναι οι διακυμάνσεις στην ισχύ του σήματος λόγω μεγάλων εμποδίων που παρεμβάλλονται στη διαδρομή του σήματος δημιουργώντας προβλήματα επικοινωνίας (π.χ. δημιουργία νεκρών ζωνών). Για ένα στατικό δέκτη καθώς το περιβάλλον αλλάζει, η σκίαση εξακολουθεί να παίζει ρόλο και η ένταση του σήματος μπορεί να αυξομειώνεται. Οι μακρόχρονες διαλείψεις εμφανίζονται όταν τα χαρακτηριστικά του καναλιού αλλάζουν πιο αργά από την διάρκεια του εκπεμπόμενου σήματος, επηρεάζοντας τη μέση τιμή του λαμβανόμενου σήματος σε μεγάλες χρονικές περιόδους.



Εικόνα 8: Σκίαση (Shadowing) – διακυμάνσεις της ισχύος λόγω εμποδίων.

Οι **βραχύχρονες ή γρήγορες διαλείψεις (fast fading)**, εμφανίζονται όταν τα χαρακτηριστικά του καναλιού αλλάζουν ταχύτερα από την διάρκεια του εκπεμπόμενου σήματος, έχοντας απότομες διακυμάνσεις του πλάτους και της φάσης ενός σήματος σε σύντομο χρονικό διάστημα ή απόσταση, έτσι ώστε οι επιδράσεις των απωλειών διαδρομής να μπορεί να αμεληθούν. Βραχύχρονες διαλείψεις μπορεί να προκύψουν από τη συμβολή δυο ή περισσότερων εκδοχών του μεταδιδόμενου σήματος, που φθάνουν στο δέκτη με μικρές διαφορές καθυστέρησης. Οι βραχύχρονες διαλείψεις προκαλούν διασυμβολική παρεμβολή (InterSymbol Interference - ISI) όταν η μέγιστη διαφορά στην καθυστέρηση των πολυδιαδρομικών συνιστωσών είναι μεγαλύτερη από την περίοδο ενός συμβόλου. Κάθε σήμα πολλαπλής διαδρομής εμφανίζει μια ολίσθηση συχνότητας λόγω της κίνησης μεταξύ πομπού, δέκτη και σκεδαστών,. Αυτή η ολίσθηση ονομάζεται ολίσθηση Doppler και εξαρτάται από την ταχύτητα του κινητού μέρους και την κατεύθυνση του εκπεμπόμενου σήματος σε σχέση με του λαμβανόμενου.

Οι **διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών (multipath fading)**, συμβαίνουν όταν σήματα από πολλές κατευθύνσεις φτάνουν στο δέκτη με διαφορά στην έντασή τους και στη φάση δημιουργώντας ένα σύνθετο σήμα με πιθανές διακυμάνσεις στην ισχύ, στη φάση και την ποιότητα. Για ένα σταθερό δέκτη λόγω των ανακλάσεων και των παρεμβολών, οι διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών συνεχίζει να προκαλεί διαλείψεις και ταλαντώσεις στο λαμβανόμενο σήμα.



Εικόνα 9: Πολυδιαδρομική Διάδοση (Multipath) – γρήγορες μεταβολές της ισχύος λόγω ανακλάσεων και παρεμβολών.

Οι ισοσταθμιστές καναλιών (equalizers) και τα συστήματα MIMO (Multiple Input Multiple Output) είναι κάποιες απ' τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται πλέον για να αντιμετωπίσουν τις επιπτώσεις αυτών των φαινομένων.

1.4 Διαλείψεις

Οι διαλείψεις είναι ένα σύνολο φαινομένων που εμφανίζεται στα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας και μπορούν να προκαλέσουν διαφορές στην ισχύ του σήματος καθώς αυτό ταξιδεύει από τον πομπό στον δέκτη. Η διάλειψη που συμβαίνει στο σήμα μπορεί να δημιουργηθεί από διάφορους παράγοντες, όπως εμπόδια, ανακλάσεις, περίθλαση και σκέδαση, και συνήθως χωρίζονται σε δύο κατηγορίες στις αργές και την γρήγορες διαλείψεις.

Οι **αργές διαλείψεις (slow fading)** συμβαίνουν λόγω σταδιακών διακυμάνσεων που προκαλούνται από μεγάλα εμπόδια. Αυτός ο τύπος διάλειψης μεταβάλλεται αργά καθώς ο δέκτης κινείται και παραμένει σχεδόν σταθερός σε μεγαλύτερες περιοχές ή χρονικές περιόδους. Όσο αυξάνονται τα εμπόδια και η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, τόσο μειώνεται και η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος.

Αντίθετα, οι **γρήγορες διαλείψεις (fast fading)** συμβαίνουν λόγω της πολυδιαδρομικής διάδοσης. Σε αυτή την περίπτωση, το σήμα φτάνει στον δέκτη μέσω πολλών διαφορετικών διαδρομών, προκαλώντας σημαντικές αλλαγές στην ισχύ και τη φάση του σήματος ακόμη και για μικρές μετακινήσεις του δέκτη (της τάξης του $\lambda/2$, όπου λ είναι το μήκος κύματος). Επίσης, αυτό το είδος διαλείψεων προκαλείται και από μια ξαφνική αλλαγή στο κανάλι λόγω της κίνησης του δέκτη ή άλλων αντικειμένων στον περιβάλλοντα χώρο.

Τύποι Διαλείψεων

1. Επίπεδες διαλείψεις (flat fading). Συμβαίνουν όταν ολόκληρο το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος υφίσταται την ίδια εξασθένηση. Σε αυτή την περίπτωση, η επίδραση στο συχνοτικό περιεχόμενο του σήματος δεν υφίσταται σημαντικές διαφορές και έτσι δεν επηρεάζεται η ποιότητα του σήματος. Αυτή συνήθως η εξασθένηση συμβαίνει σε σενάρια όπου το μεταδιδόμενο σήμα ακολουθεί μια απλή και ανεμπόδιστη διαδρομή και το σήμα είναι στενής ζώνης.

2. Συχνοεπιλεκτικές διαλείψεις (frequency selective fading). Συμβαίνουν όταν οι συνιστώσες συχνότητας του σήματος υφίστανται διαφορετικά επίπεδα εξασθένησης με αποτέλεσμα την άνιση διασπορά του πλάτους του σήματος σε όλο το φάσμα συχνοτήτων. Το λαμβανόμενο σήμα περιλαμβάνει πολλά αντίγραφα του εκπεμπόμενου σήματος, τα οποία έχουν υποστεί χρονικές καθυστερήσεις και διαφορετικά επίπεδα εξασθένησης. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε διασυμβολική παρεμβολή (ISI). Οι βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να μειωθούν οι επιπτώσεις αυτών των διαλείψεων είναι η ισοστάθμιση (equalization), η προσπάθεια δηλαδή να αντισταθμιστούν οι διαφορετικές εξασθενίσεις, και οι μέθοδοι διαφορισμότητας, οι οποίες χρησιμοποιούν περισσότερες κεραιές ή διαδρομές για να δώσουν εναλλακτικές διαδρομές στο σήμα.

3. Διαλείψεις στενής ζώνης (narrowband fading). Αναφέρονται στις μεταβολές του σήματος που λαμβάνουν χώρα εντός ενός συγκεκριμένου στενού εύρους συχνοτήτων. Σε συνθήκες στενής ζώνης, η συμπεριφορά του καναλιού είναι πιο σταθερή από ό,τι σε ευρύτερες ζώνες συχνοτήτων, ακόμη και με πιθανές εξασθενήσεις. Τα κανάλια αυτά χρησιμοποιούνται σε μια πιο αργή μορφή επικοινωνίας όπου μεταδίδονται κυρίως φωνή ή αργές ροές δεδομένων. Έχουν μεγαλύτερο εύρος λήψης, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν στενότερα φίλτρα, μειώνοντας έτσι τον ανεπιθύμητο θόρυβο ευρείας ζώνης. Κατά κανόνα, οι διαλείψεις στενής ζώνης είναι ταυτόσημες με το flat fading.

4. Διαλείψεις ευρείας ζώνης (wideband fading). Αναφέρονται σε σήματα που καταλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, επιτρέποντας μετάδοση πολλαπλών ροών πληροφορίας και επιτυγχάνοντας υψηλές ταχυότητες. Ωστόσο υπάρχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να υπάρχουν περισσότερες παρεμβολές και εξασθενήσεις σε διάφορες συχνότητες που καθιστούν τη συμπεριφορά του καναλιού πιο περίπλοκη. Η ανίχνευση των σημάτων απαιτεί υψηλή αναλογία σήματος προς θόρυβο (SNR) καθώς η ισχύς του σήματος γίνεται ασθενέστερη ανά συχνότητα κάνοντας το σήμα πιο επιρρεπές σε παρεμβολές και θόρυβο. Για να βελτιωθεί η επικοινωνία θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν υψηλότερες συχνότητες καθώς υπάρχει διαθέσιμο φάσμα και είναι πιο εύκολο να σχεδιαστούν ολοκληρωμένα κυκλώματα που έχουν φίλτρα που υποστηρίζουν μια ευρύτερη ζώνη. Ακόμα, χωρίζοντας το φάσμα σε στενότερες ζώνες με την τεχνική OFDM, επιτυγχάνεται ο εντοπισμός περιοχών συχνοτήτων επηρεασμένες από θόρυβο ή παρεμβολές και η απομόνωσή τους βελτιώνοντας την απόδοση του συστήματος. Κατά κανόνα είναι έννοια ταυτόσημη με τις συχνο-επιλεκτικές διαλείψεις.

5. Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (large scale fading). Εκφράζουν την μεταβολή της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος σε μεγάλες αποστάσεις που προκαλείται από την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη καθώς και από αντικείμενα στον χώρο διάδοσης που εμποδίζουν ή ανακλούν το σήμα.

6. Διαλείψεις μικρής κλίμακας (small scale fading). Εκφράζουν την μεταβολή της ισχύος, της φάσης ή της συχνότητας του σήματος διάδοσης σε μικρές χρονικές περιόδους ή αποστάσεις. Αυτές οι μεταβολές προκύπτουν από φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης. Η πρόσθεση των συνιστωσών που δημιουργούνται έχουν ως αποτέλεσμα την ενίσχυση ή την αποδυνάμωση του λαμβανόμενου σήματος, κάτι που οδηγεί σε απότομες μεταβολές στο πλάτος του.

1.5 Μαθηματικά μοντέλα

Τα μαθηματικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν πως εξασθενεί και μεταβάλλεται το σήμα, λόγω φαινομένων όπως η πολυδιαδρομική διάδοση, καθώς αυτό ταξιδεύει στο περιβάλλον. Οι διακυμάνσεις που προκαλούνται στην ισχύ, την φάση και την συχνότητα του σήματος περιγράφονται με την βοήθεια αυτών των μοντέλων όπως Gauss, Rayleigh, Rice και Nakagami.

1.5.1 Κατανομή Gauss.

Η γκαουσιανή κατανομή, γνωστή και ως κανονική κατανομή, είναι ένα θεμελιώδες στατιστικό μοντέλο που περιγράφει την κατανομή πιθανότητας μιας συνεχούς τυχαίας μεταβλητής. Συνδέεται συχνά με σενάρια ασύρματης επικοινωνίας χωρίς διαλείψεις, στα οποία τα φαινόμενα πολλαπλών διαδρομών ή εξασθένησης δεν επηρεάζουν την ένταση του λαμβανόμενου σήματος. Λόγω της σταθερής ισχύος του σήματος, αυτό το μοντέλο λειτουργεί καλά σε καταστάσεις όπου τα φαινόμενα πολλαπλών διαδρομών είναι ελάχιστα ή ανύπαρκτα. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Gauss (για πραγματικές τυχαίες μεταβλητές) είναι η εξής:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

Όπου:

x = τυχαία μεταβλητή

μ = μέση τιμή του x

σ^2 = διασπορά γύρω από την μέση τιμή

Οι διαλείψεις Rayleigh και οι διαλείψεις Rice είναι μοντέλα που χρησιμοποιούνται για να μιμηθούν πώς η διάδοση πολλαπλών διαδρομών, ιδίως σε ασύρματα κανάλια επικοινωνίας, μπορεί να προκαλέσει διακυμάνσεις στην ένταση του σήματος. Χρησιμοποιούνται συχνά τόσο σε καταστάσεις LOS (Line of Sight - Rice) όσο και σε καταστάσεις NLOS (Non-Line of Sight - Rayleigh) και χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση των διαλείψεων μικρής κλίμακας.

1.5.2 Κατανομή Rayleigh.

Η κατανομή αυτή χρησιμοποιείται για την περιγραφή της τυχαίας φύσης του πλάτους του λαμβανόμενου σήματος. Οι διαλείψεις Rayleigh παρατηρούνται όταν όλες οι συνιστώσες που συνθέτουν το λαμβανόμενο σήμα ανακλώνται και σκεδάζονται από διάφορες επιφάνειες και αντικείμενα στο περιβάλλον και σε περιπτώσεις όπου ο πομπός και ο δέκτης δεν βρίσκονται σε άμεση οπτική επαφή (NLOS). Έτσι, το λαμβανόμενο σήμα ταξιδεύει σε διάφορα μονοπάτια που το καθένα έχει διαφορετικό πλάτος και φάση όταν φτάσουν στον δέκτη. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Rayleigh είναι η εξής:

$$p_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad r \geq 0$$

Όπου:

σ^2 = μέση ισχύς

1.5.3 Κατανομή Rice.

Η κατανομή αυτή χρησιμοποιείται για να περιγράψει την κατανομή πλάτων του λαμβανόμενου σήματος το οποίο αποτελείται από μια ντετερμινιστική συνιστώσα σήματος οπτικής επαφής (LOS) και πολλών πολυδιαδρομικών συνιστωσών. Σε αυτή την περίπτωση, επειδή η κυρίαρχη συνιστώσα υπερσχύει των πολυδιαδρομικών συνιστωσών, το πλάτος του τελικού σήματος ακολουθεί κατανομή Rice. Η συνιστώσα αυτή συμβάλλει σε μια πιο σταδιακή μεταβολή στα πλάτη του σήματος. Ο δίαυλος Rice είναι ένας πιο φιλικός δίαυλος από την περίπτωση Rayleigh, η οποία θεωρητικά αντιπροσωπεύει τη χειρότερη περίπτωση διαύλου κινητών επικοινωνιών. Η κατανομή Rice προκύπτει εάν μια διαδρομή είναι αρκετά ισχυρότερη από την συνιστώσα πολλαπλών διαδρομών. Αυτό μπορεί να συμβεί ακόμα και σε περιπτώσεις NLOS, όπου η ισχύς που μπορεί να ανακλάται από αντικείμενα είναι πολύ μεγάλη και κυριαρχεί στο λαμβανόμενο σήμα. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Rice είναι η εξής:

$$p_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 - s^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rs}{\sigma^2}\right), \quad r \geq 0$$

Όπου:

r = πλάτος λαμβανόμενου σήματος

σ^2 = διασπορά multipath συνιστώσας

s = μέση ισχύς του σήματος LOS

I_0 = συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης

1.5.4 Κατανομή Nakagami-m.

Η κατανομή αυτή χρησιμοποιείται επίσης για την εκτίμηση των πλατών σήματος με εντονότερα ή πιο ιδιαίτερα φαινόμενα από την κατανομή Rayleigh. Το μοντέλο αυτό μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία και ενδεχομένως μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς το λαμβανόμενο σήμα μπορεί να είναι ένα άθροισμα διανυσμάτων με τυχαίο μέγεθος και φάσεις, δηλαδή με διαφορετικές συνθήκες fading. Η παράμετρος m παίζει καθοριστικό ρόλο, αφού καθορίζει το σχήμα της κατανομής.

- Όταν $m = 0$, έχουμε μονόπλευρη γκαουσιανή κατανομή.
- Όταν $m = 1$, πλησιάζει την κατανομή Rayleigh.
- Όταν $m > 1$, πλησιάζει την κατανομή Rice.
- Και όταν $m < 1$, έχουμε έντονα φαινόμενα fading σε σχέση με τις κατανομές Rayleigh και Rice, όπου η πολυδιαδρομική διάδοση είναι εντονότερη.

Η Nakagami- m είναι πιο ευέλικτη και μπορεί να προσαρμοστεί σε διάφορες καταστάσεις εξασθένησης, καλύπτοντας τόσο LOS όσο και NLOS περιπτώσεις με διαφορετικές παραμέτρους. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Nakagami- m είναι η εξής:

$$p_r(r) = \frac{2m^m r^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} \exp\left(-\frac{mr^2}{\Omega}\right), \quad r \geq 0$$

Όπου:

m = shape factor

Ω = μέση ισχύς

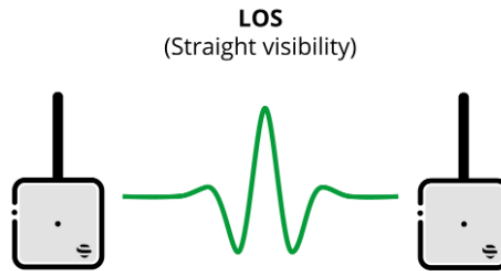
$\Gamma(m)$ = συνάρτηση Gamma

1.6 Συνθήκες LOS και NLOS

Στα κινητά δίκτυα, οι λέξεις "LOS" (Line of Sight) και "NLOS" (Non-Line of Sight) χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τις συνθήκες ορατότητας μεταξύ της κινητής συσκευής και του σταθμού βάσης.

1.6.1 LOS (Line of Sight) επικοινωνία.

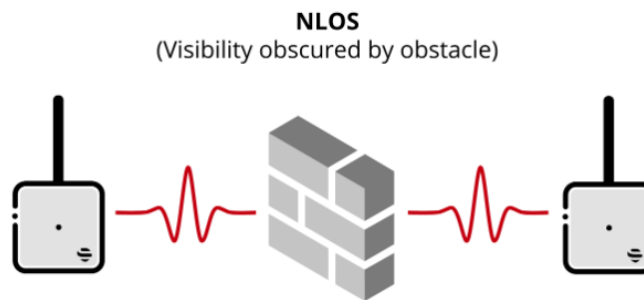
Είναι η επικοινωνία που γίνεται με άμεση οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Τα χαρακτηριστικά της LOS επικοινωνίας είναι ότι υπάρχουν μικρά φαινόμενα διαλείψεων και ανακλάσεων των σημάτων, έχει χαμηλότερες απώλειες διαδρομής και έτσι παράγει ισχυρότερα και πιο αξιόπιστα σήματα. Επίσης είναι ιδανική για ζώνες υψηλών συχνοτήτων και επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων. Αυτό συμβαίνει καθώς μεταξύ πομπού και δέκτη δεν υπάρχουν εμπόδια τα οποία θα μπορούσαν να προκαλέσουν την εξασθένηση και διάχυση του σήματος διάδοσης.



Εικόνα 10: Επικοινωνία Οπτικής Επαφής (LOS) – Άμεση και ανεμπόδιστη μετάδοση σήματος.

1.6.2 NLOS (Non-Line of Sight) επικοινωνία.

Είναι η επικοινωνία που γίνεται όταν μεταξύ πομπού και δέκτη υπάρχουν τεχνητά ή φυσικά εμπόδια. Τα χαρακτηριστικά της NLOS επικοινωνίας είναι ότι τα σήματα στο δέκτη μπορεί να προέρχονται από ανακλάσεις, περίθλαση και σκέδαση λόγω των εμποδίων που συναντάν και των διαφόρων σκεδαστών του περιβάλλοντος. Επίσης υπάρχουν μεγαλύτερες απώλειες διαδρομής και αυξημένη ευαισθησία σε παρεμβολές και fading λόγω της πολυδιαδρομικής διάδοσης του σήματος. Η ποιότητα της επικοινωνίας είναι χαμηλότερη λόγω των εμποδίων, γι' αυτό έχουν δημιουργηθεί διάφορες τεχνικές για την μείωση των αναφερόμενων επιπτώσεων.



Εικόνα 11: Επικοινωνία Χωρίς Οπτική Επαφή (NLOS) – Το σήμα παρεμποδίζεται από εμπόδια.

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας λειτουργούν σε υβριδικά περιβάλλοντα δηλαδή έναν συνδυασμό συνθηκών LOS και NLOS. Με την ανάπτυξη μικρότερων κυψελών, την εφαρμογή τεχνικών διαμόρφωσης δέσμης (beamforming), MIMO και επαναχρησιμοποίηση συχνότητας μπορούν να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα κάλυψης.

1.6.3 Υβριδικά μοντέλα επικοινωνίας

Τα υβριδικά μοντέλα επικοινωνίας λαμβάνουν υπόψη τόσο τις συνθήκες διάδοσης LOS όσο και τις συνθήκες διάδοσης NLOS. Τα μοντέλα αυτά είναι χρήσιμα σε περιβάλλοντα που υπάρχουν πολλές μεταβολές στην διαδρομή του σήματος. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να υπάρξει ακριβής μοντελοποίηση της επικοινωνίας και των διεργασιών εντοπισμού θέσεων μεταξύ πομπού και δέκτη. Τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση τους αποτελούν τα μαθηματικά στοχαστικά μοντέλα που έχουν αναφερθεί καθώς και μέθοδοι μηχανικής μάθησης.

1.7 Επιπτώσεις στα επικοινωνιακά συστήματα.

Οι διαλείψεις επηρεάζουν την ποιότητα και την αξιοπιστία των επικοινωνιών σε διάφορους τομείς. Παρακάτω αναφέρονται οι κύριες επιπτώσεις των διαλείψεων.

Παραμόρφωση σήματος. Το λαμβανόμενο σήμα υφίσταται μεταβολές πλάτους και φάσης ως αποτέλεσμα της εξασθένησης πολλαπλών διαδρομών, καθώς φτάνει στην δέκτη σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και διαφορετικές εντάσεις.

Συμβολή στον δέκτη. Τα σήματα με διαφορετική φάση μπορούν να αλληλοκαλύπτονται είτε εποικοδομητικά είτε καταστροφικά στο δέκτη, μειώνοντας τη συνολική ποιότητα του σήματος.

Σφάλματα συμβόλων και bit. Στα ψηφιακά συστήματα επικοινωνίας, η εξασθένηση μπορεί να οδηγήσει σε μεταβολές στην ισχύ του λαμβανόμενου σήματος. Αν οι τιμές της ισχύος είναι χαμηλές τότε υπάρχουν πολλές πιθανότητες να αυξηθούν τα ποσοστά σφάλματος bit. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα δεδομένα να φτάσουν παραμορφωμένα ή να έχει χαθεί ένα μέρος τους.

Θόρυβος. Η χαμηλή αναλογία σήματος προς θόρυβο (SNR), επηρεάζει την αξιοπιστία και τη σαφήνεια των μεταδιδόμενων δεδομένων. Αν η ισχύς του θορύβου είναι υψηλότερη της ισχύος του σήματος, τότε η αναγνώριση των δεδομένων γίνεται δυσκολότερα.

Καθυστέρηση. Μπορεί να αποτελεί πρόβλημα σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως τηλεδιασκέψεις βίντεο ή φωνητικές κλήσεις.

1.8 Τεχνικές μετριασμού.

Οι διαλείψεις, οι παρεμβολές και η εξασθένηση μπορούν να προκαλέσουν πολλά προβλήματα στο κανάλι επικοινωνίας, μειώνοντας την ποιότητα του σήματος. Για να μετριαστούν οι αρνητικές αυτές επιπτώσεις, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές μετριασμού. Οι βασικές απ' αυτές τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

Ισοστάθμιση. Η τεχνική αυτή μετριάζει τις επιπτώσεις της εξασθένησης πολλαπλών διαδρομών αλλά και των παρεμβολών μεταξύ συμβόλων (ISI). Οι ισοσταθμιστές (equalizers) αντισταθμίζουν τις μεταβολές πλάτους και φάσης χρησιμοποιώντας μεθόδους όπως:

- Ο *Zero Forcing (ZF)*: μειώνει την διασυμβολική παρεμβολή με αντιστροφή της επίδρασης του καναλιού αλλάσε περιπτώσεις που το λαμβανόμενο σήμα είναι ασθενές, μπορεί να αυξήσει τα επίπεδα θορύβου επηρεάζοντας το SNR.
- Ο *Minimum Mean Square Error (MMSE)*: ελαχιστοποιεί τον θόρυβο και την διασυμβολική παρεμβολή στην έξοδο.
- Και ο *Decision Feedback Equalizers (DFE)*: χρησιμοποιεί προηγούμενες εξόδους και εκτιμήσεις για να διορθώσει τα σφάλματα, μειώνοντας τις παρεμβολές και αυξάνοντας την ποιότητα του σήματος.

Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει μεθόδους τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και της συχνότητας και αποτελούν σημαντικό και απαραίτητο παράγοντα στα ασύρματα δίκτυα καθώς μειώνουν την πολυπλοκότητα και το Bit Error Rate (BER) και αυξάνουν την ταχύτητα

μετάδοσης, την ακρίβεια του εκπεμπόμενου σήματος και την σταθερότητα του συστήματος.

Τεχνικές διαφορισιμότητας. Οι τεχνικές διαφορισιμότητας χωρίζονται σε διαφορισιμότητα χώρου, χρόνου και συχνότητας και χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της ικανότητας των ασύρματων συστημάτων έναντι των επιπτώσεων των διαλείψεων.

- Η *διαφορισιμότητα χώρου (Spatial diversity)* εφαρμόζεται σε συστήματα MIMO (Multiple Input Multiple Output), όπου χρησιμοποιούνται πολλαπλές κεραίες στον πομπό και στον δέκτη και γίνεται ταυτόχρονη χρήση πολλαπλών καναλιών/διόδων αυξάνοντας την απόδοση του συστήματος.
- *Διαφορισιμότητα συχνότητας (Frequency diversity)* που μπορεί να υλοποιηθεί μέσω της τεχνικής διαμόρφωσης OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), με την οποία το ίδιο σήμα μεταδίδεται σε πολλαπλές συχνότητες μειώνοντας την ευαισθησία του καναλιού.
- Η *διαφορισιμότητα χρόνου (Time diversity)* επαναλαμβάνει την εκπομπή ενός σήματος σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, έτσι ώστε να αυξήσει τις πιθανότητες το λαμβανόμενο σήμα να φτάσει στο δέκτη χωρίς σφάλματα.

Άλλες μορφές αποτελούν η διαφορισιμότητα κωδικοποίησης, διαδρομών, πόλωσης και κίνησης όπου η κάθε μία περιλαμβάνει διάφορες τεχνικές ανάλογα την απαίτηση και τι μπορούν να αξιοποιήσουν.

1.9 Χρονικές και χωρικές διακυμάνσεις

Οι διαλείψεις επηρεάζονται τόσο από τη χρονική όσο και από τη χωρική διάσταση του καναλιού, πιο αναλυτικά:

1.9.1 Χρονικές διακυμάνσεις.

Είναι οι διακυμάνσεις τις ισχύος με την πάροδο του χρόνου.

- Τα ευρυζωνικά κανάλια μπορούν να υποστηρίξουν σήματα με μεγαλύτερες διακυμάνσεις, είτε αυτές συμβαίνουν γρήγορα είτε αργά επηρεάζοντας διαφορετικές χρονικές κλίμακες, λόγω του μεγαλύτερου εύρους ζώνης τους.
- Τα στενής ζώνης κανάλια, λόγω του μικρότερου εύρους ζώνης τους, έχουν πιο σταθερές διακυμάνσεις στον χρόνο. Οι μεταβολές του σήματος περιορίζονται σε μικρότερο εύρος συχνοτήτων ή σε μια συγκεκριμένη συχνότητα, με αποτέλεσμα οι μεταβολές της ισχύος να συμβαίνουν με καθορισμένο ρυθμό.

1.9.2 Χωρικές διακυμάνσεις.

Είναι οι διακυμάνσεις τις ισχύος όσο αλλάζει το περιβάλλον διάδοσης του σήματος.

- Τα ευρυζωνικά κανάλια μπορούν να εμφανίσουν διακυμάνσεις στην ισχύ του σήματος, στη φάση και στη γωνία άφιξης λόγω των πολλαπλών διαδρομών. Οι πολλαπλές διαδρομές δεν είναι χρονικά αναλύσιμες καθώς οι διαφορές στον χρόνο τους είναι πολύ μικρές. Σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η χωρική μεταβολή του σήματος για την ανάλυση πολλαπλών διαδρομών με παρόμοιες καθυστερήσεις αλλά διαφορετικές γωνίες άφιξης.
- Τα στενής ζώνης κανάλια έχουν πιο σταθερές διακυμάνσεις στον χώρο κάνοντας την συμπεριφορά του καναλιού πιο προβλέψιμη, καθώς οι διαφορές στο πλάτος

και τη φάση του σήματος σε διάφορες χωρικές διαστάσεις περιορίζονται σε μικρότερο εύρος συχνοτήτων. Η χωρική διάκριση μπορεί να γίνει μόνο μέσω της γωνίας άφιξης.

1.10 Φαινόμενο Doppler

Στις περιπτώσεις που το λαμβανόμενο σήμα μεταβάλλεται συναρτήσει της θέσης στον χώρο, η σχετική κίνηση μεταξύ του πομπού και του δέκτη (αλλά και των σκεδαστών) έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της συχνότητας του φέροντος f_c του λαμβανόμενου σήματος. Ακόμα και στην περίπτωση που δύο διαδρομές έχουν παραπλήσιες καθυστερήσεις, εφόσον έχουν διαφορετικές γωνίες άφιξης μπορούν να διακριθούν αναλύοντας το φάσμα συχνοτήτων ολίσθησης Doppler του λαμβανόμενου σήματος.

Η μετατόπιση Doppler f_d δίνεται από την σχέση:

$$f_d = \frac{u}{\lambda} \cos(\theta)$$

u = σχετική ταχύτητα μεταξύ πομπού και δέκτη (ή πομπού και σκεδαστή – σκεδαστή και δέκτη).

λ = μήκος κύματος

θ = γωνία κίνησης

Η συχνότητα του λαμβανόμενου σήματος υπολογίζεται από την σχέση:

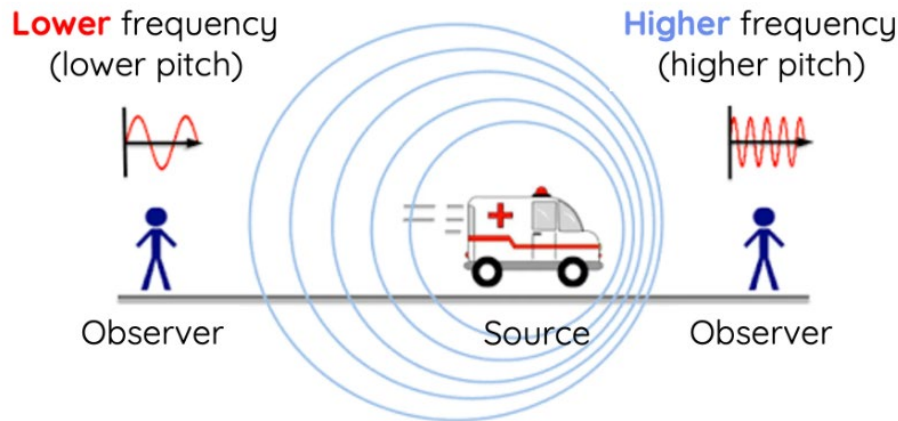
$$f_r = f_c \left(\frac{c + u}{c} \right)$$

f_c = συχνότητα φέροντος

c = ταχύτητα φωτός

u = ταχύτητα δέκτη

Σε ένα ευρυζωνικό κανάλι όταν ένα αντικείμενο κινείται τότε εισάγει μετατοπίσεις συχνότητας και μπορούν να προκληθούν διακυμάνσεις από διαφορετικές ταχύτητες λόγω των ανακλάσεων και, ως εκ τούτου, παρουσιάζουν μεγαλύτερη ποικιλία μετατοπίσεων Doppler. Σε ένα κανάλι στενής ζώνης, το φάσμα Doppler είναι πιο περιορισμένο και το εύρος των μετατοπίσεων συχνότητας είναι μικρότερο. Ένα απλούστερο φάσμα Doppler παράγεται όταν οι διακυμάνσεις της συχνότητας περιορίζονται σε μικρή ζώνη συχνοτήτων γύρω από την φέρουσα. Αυτή η μετατόπιση συχνότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ταχύτητας του δέκτη ή ενός σκεδαστή σε σχέση με τον πομπό.



Εικόνα 12: Φαινόμενο Doppler - Όταν η πηγή (ασθενοφόρο) πλησιάζει, ο παρατηρητής αντιλαμβάνεται υψηλότερη συχνότητα, ενώ όταν απομακρύνεται, η συχνότητα μειώνεται.

1.11 Είδη Κεραιοστοιχείων

Υπάρχουν 4 διαφορετικά είδη συστημάτων ανάλογα με τον αριθμό των κεραιών. τα SISO (Single Input Single Output), SIMO (Single Input Multiple Output), MISO (Multiple Input Single Output) και MIMO (Multiple Input Multiple Output).

1.11.1 Μοντέλα συνεχούς χρόνου για κεραιοδιατάξεις

1. SISO (Single Input Single Output)



Εικόνα 13: Μετάδοση σήματος μεταξύ πομπού (Tx) και δέκτη (Rx) που αποτελούνται από μία κεραία.

Σε αυτό το σύστημα υπάρχει μία κεραία στην πλευρά του πομπού και μία στου δέκτη, κάτι που το καθιστά το πιο εύκολα υλοποιήσιμο μεταξύ των 4^{ων} τύπων. Στο σύστημα αυτό ο θόρυβος εισάγεται κατά την μετάδοση του σήματος και το σήμα εξασθενεί λόγω των απωλειών που προκαλούνται. Η χωρητικότητα δίνεται από την σχέση:

$$C_{(SISO)} = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

Η δυνατότητα μετάδοσης του καναλιού καθορίζεται και περιορίζεται από τον νόμο του Shannon, σύμφωνα με τον οποίο υπάρχει θεωρητικός μέγιστος ρυθμός με τον οποίο μπορούν να μεταδοθούν ψηφία χωρίς σφάλματα σε ένα κανάλι περιορισμένου εύρους ζώνης παρουσία θορύβου. Η χρονικά μεταβαλλόμενη κρουστική απόκριση του καναλιού $h(t, \tau)$ δείχνει πως επηρεάζεται η μετάδοση του σήματος εξαιτίας του καναλιού. Το λαμβανόμενο σήμα υπολογίζεται από την σχέση:

$$y(t) = h(t, \tau) * x(t) \Leftrightarrow y(t) = \int_0^{\tau_{total}} h(t, \tau) x(t - \tau) d\tau$$

Όπου:

$y(t)$ = λαμβανόμενο σήμα

τ_{total} = χρονική διάρκεια κρουστικής απόκρισης διαύλου.

Και ο τελεστής * συμβολίζει την συνέλιξη.

2. SIMO (Single Input Multiple Output)



Εικόνα 14: Μετάδοση σήματος μεταξύ πομπού (Tx) που αποτελείται από μία κεραία και δέκτη (Rx) που αποτελείται από πάνω από μία κεραία.

Σε αυτό το σύστημα υπάρχει μία κεραία στην πλευρά του πομπού και πολλές κεραίες στην πλευρά του δέκτη. Η παρουσία πολλαπλών κεραιών στην πλευρά του δέκτη αυξάνει την απόδοση του συστήματος σε σχέση με το SISO, αφού μπορούν να επιτύχουν διαφορισμότητα εκπομπής ή λήψης συνδυάζοντας τα λαμβανόμενα σήματα για να αναδημιουργήσουν το τελικό σήμα. Επίσης βελτιώνουν την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος και μειώνουν την επίδραση των παρεμβολών και του θορύβου. Στο σύστημα αυτό ο θόρυβος εισάγεται κατά την μετάδοση του σήματος (π.χ. παρεμβολές) καθώς και στην αλυσίδα του δέκτη, και το σήμα εξασθενεί λόγω των απωλειών που προκαλούνται. Η SIMO διάταξη βελτιώνει την ποιότητα της ζεύξης σήματος ενώ η χωρητικότητα του καναλιού παραμένει η ίδια.

Η χρονικά μεταβαλλόμενη κρουστική απόκριση του καναλιού συμβολίζεται ως $h_i(t, \tau)$, όπου i είναι ο αριθμός της κεραίας στην πλευρά του δέκτη. Το λαμβανόμενο σήμα υπολογίζεται από την σχέση:

$$y_i(t) = \int_0^{\tau_{total}} h_i(t, \tau) x(t - \tau) d\tau$$

Όπου:

$h_i(t, \tau)$ = χρονικά μεταβαλλόμενη κρουστική απόκριση για την i -οστή κεραία

$y_i(t)$ = το σήμα που λαμβάνεται από την i -οστή κεραία.

3. MISO (Multiple Input Single Output)



Εικόνα 15: Μετάδοση σήματος μεταξύ πομπού (Tx) που αποτελείται από πάνω από μία κεραία και δέκτη (Rx) που αποτελείται από μία κεραία.

Σε αυτό το σύστημα υπάρχουν πολλές κεραίες στην πλευρά του πομπού και μία κεραία στην πλευρά του δέκτη. Για να υπάρξει βελτίωση στη μετάδοση του σήματος, η μέθοδος αυτή μας επιτρέπει τη χρήση τεχνικών όπως beamforming αλλά και διαφορισμότητα εκπομπής. Επίσης έχει την δυνατότητα να αντιμετωπίσει τις απώλειες που προκαλούνται λόγω των παρεμβολών και του θορύβου ή των διαλείψεων που προκαλούν εξασθένηση του λαμβανόμενου σήματος και να βελτιώσουν την ποιότητα του σήματος αυτού ενώ καταναλώνει λιγότερη ισχύ (για το ίδιο αποτέλεσμα). Στο σύστημα αυτό, ο θόρυβος εισάγεται με τον ίδιο τρόπο, δηλαδή κατά τη μετάδοση του σήματος ή στον δέκτη. Η χρήση πολλαπλών κεραιών στην πλευρά του πομπού μπορεί να αυξήσει την απόδοση του συστήματος αν υπάρξει κατάλληλη διαμόρφωση του σήματος που μεταδίδεται ενώ η χωρητικότητα του καναλιού παραμένει η ίδια. Ακόμη, η επικοινωνία από τις πολλαπλές κεραίες εκπομπής κωδικοποιείται διαφορετικά, έτσι ώστε η κεραία λήψης να μπορεί να αποκωδικοποιήσει με ακρίβεια την επικοινωνία από τις διαφορετικές αυτές κεραίες.

Η χρονικά μεταβαλλόμενη κρουστική απόκριση του καναλιού συμβολίζεται ως $h_i(t, \tau)$, όπου i είναι ο αριθμός της κεραίας στην πλευρά του πομπού. Το λαμβανόμενο σήμα υπολογίζεται, ως ο συνδυασμός των συνεισφορών απ' τις κεραίες του πομπού, από την σχέση:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{Nt} \int_0^{\tau_{total}} h_i(t, \tau) x_i(t - \tau) d\tau$$

Όπου:

Nt = ο αριθμός των κεραιών στον πομπό.

$h_i(t, \tau)$ = χρονικά μεταβαλλόμενη κρουστική απόκριση για την i -οστή κεραία

$x_i(t)$ = το σήμα που λαμβάνεται από την i -οστή κεραία.

4. MIMO (Multiple Input Multiple Output)



Εικόνα 16: Μετάδοση σήματος μεταξύ πομπού (Tx) και δέκτη (Rx) που αποτελούνται από πάνω από μία κεραία.

Σε αυτό το σύστημα υπάρχουν πολλές κεραίες τόσο στην πλευρά του πομπού όσο και στην πλευρά του δέκτη. Έτσι εκμεταλλευόμενοι την χωρική πολυπλεξία αυξάνεται η χωρητικότητα του καναλιού και με την διαφορισμότητα μειώνεται η επίδραση των διαλείψεων και του θορύβου, αφού μεταδίδονται πολλές και διαφορετικές ροές δεδομένων ταυτόχρονα. Τα συστήματα αυτά αποτελούν τη βάση για τις σύγχρονες τεχνολογίες ασύρματων επικοινωνιών, καθώς και αυξάνουν τη χωρητικότητα όπως αναφέρθηκε, αλλά και την αξιοπιστία του καναλιού επικοινωνίας. Η χωρητικότητα δίνεται από την σχέση:

$$C_{(MIMO)} = B \log_2 \det \left(I + \frac{\rho}{N_t} H H^H \right)$$

Όπου:

H = ο πίνακας καναλιού που περιγράφει τη σύνδεση μεταξύ των κεραιών πομπού και δέκτη. Το στοιχείο k, j του πίνακα αντιπροσωπεύει το κανάλι από τον j -οστό πομπό στον k -οστό δέκτη.

ρ = η συνολική ισχύς του μεταδιδόμενου σήματος.

$\det$ συμβολίζει την ορίζουσα.

Η χρονικά μεταβαλλόμενη κρουστική απόκριση του καναλιού συμβολίζεται ως $h_{i,j}(t, \tau)$, όπου i είναι ο δείκτης των κεραιών στην πλευρά του πομπού και j ο δείκτης των κεραιών στην πλευρά του δέκτη. Το λαμβανόμενο σήμα σε κάθε κεραία του δέκτη είναι ο συνδυασμός των συνεισφορών από όλες τις κεραίες πομπού και δίνεται από τη σχέση:

$$y_j(t) = \sum_{i=1}^{N_t} \int_0^{\tau_{total}} h_{i,j}(t, \tau) x_i(t - \tau) d\tau$$

Όπου:

$y_j(t)$ = το λαμβανόμενο σήμα στην j -οστή κεραία δέκτη

$x_i(t)$ = το σήμα που μεταδίδεται από την i -οστή κεραία πομπού

$h_{i,j}(t, \tau)$ = η χρονικά μεταβαλλόμενη κρουστική απόκριση για το ζεύγος (i, j) .

1.11.2 Μοντέλα διακριτού χρόνου

Όπως και στα μοντέλα συνεχούς χρόνου, στον διακριτό χρόνο ακολουθείται το ίδιο σκεπτικό αλλά το συνεχές σήμα δειγματοληπτείται και μετατρέπεται σε διακριτή ακολουθία.

1. SISO (Single Input Single Output)

Το λαμβανόμενο σήμα υπολογίζεται από την σχέση:

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N_{total}} h[n, k] x[n - k]$$

Όπου:

$y[n]$ = λαμβανόμενο σήμα

$x[n]$ = μεταδιδόμενο σήμα

$h[n, k]$ = χρονικά μεταβαλλόμενη κρουστική απόκριση

N_{total} = χρονική διάρκεια κρουστικής απόκρισης διαύλου.

2. SIMO (Single Input Multiple Output)

Το λαμβανόμενο σήμα υπολογίζεται από την σχέση:

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N_{total}} h_i[n, k] x[n - k]$$

Όπου:

$y_i(n)$ = το λαμβανόμενο σήμα στην i-οστή κεραία

$h_i(n, k)$ = η χρονικά μεταβαλλόμενη κρουστική απόκριση για την i-οστή κεραία.

3. SIMO (Single Input Multiple Output)

Το λαμβανόμενο σήμα υπολογίζεται από την σχέση:

$$y[n] = \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{k=0}^{N_{total}} h_i[n, k] x_i[n - k]$$

Όπου:

N_t = αριθμός κεραιών στον πομπό

$x_i(n)$ = το μεταδιδόμενο σήμα στην i-οστή κεραία

$h_i(n, k)$ = η χρονικά μεταβαλλόμενη κρουστική απόκριση για την i-οστή κεραία του πομπού.

4. MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Σε αυτή την περίπτωση το λαμβανόμενο σήμα στην j-οστή κεραία του δέκτη είναι ο συνδυασμός των συνεισφορών απ' όλες τις κεραίες του πομπού.

$$y_j[n] = \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{k=0}^{N_{total}} h_{i,j}[n, k] x_i[n - k]$$

Όπου:

$y_j[n]$ = το λαμβανόμενο σήμα στην j-οστή κεραία δέκτη

$h_{i,j}[n, k]$ = η χρονικά μεταβαλλόμενη κρουστική απόκριση για το ζεύγος (i, j).

Κεφάλαιο 2. Πολυπλεξία FDM και OFDM: Χαρακτηριστικά, Μετάδοση και Προκλήσεις Συγχρονισμού

2.1 Πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDM)

Στις ασύρματες επικοινωνίες, τα σήματα μπορεί να υποστούν διαλείψεις, παρεμβολές από γειτονικά σήματα και αλλοιώσεις κατά την μετάδοσή τους από τον πομπό στον δέκτη. Για να μπορέσουν να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα, έχουν δημιουργηθεί τρόποι μετάδοσης που αξιοποιούν καλύτερα το εύρος ζώνης του καναλιού, όπως η πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiplexing – FDM). Το FDM επικεντρώνεται στην μετάδοση πολλαπλών συμβόλων ταυτόχρονα σε διαφορετικές συχνότητες χωρίς να επηρεάζει το ένα το άλλο. Κάθε σύμβολο θα πρέπει να έχει μεγαλύτερη χρονική διάρκεια και να είναι στενότερο φασματικά, έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να μεταδίδονται περισσότερα σύμβολα στο συνολικό εύρος ζώνης του καναλιού. Ο πομπός για να επιδιώξει την μετάδοση σήματος ευρείας ζώνης χρησιμοποιώντας FDM, χωρίζει το σήμα σε πολλές στενές ζώνες υποκαναλιών διατηρώντας τον ρυθμό μετάδοσης της πληροφορίας όπως κάθε άλλο σύστημα. Αυτά τα συστήματα είναι ανθεκτικά στην διασυμβολική παρεμβολή (ISI), καθώς ένα ελαφρώς μετατοπισμένο χρονικά αντίγραφο ενός σήματος δεν έχει σοβαρή επίπτωση στο αρχικό σήμα και στα άλλα σήματα που προηγήθηκαν ή ακολούθησαν. [1][4][12][14][18]

2.2 Τεχνική OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

Αν και τα συστήματα FDM επιλύουν πολλά προβλήματα που υπάρχουν κατά την μετάδοση του σήματος, με την παράλληλη μετάδοση υπάρχει (ή προκαλείται από το κανάλι) φασματική επικάλυψη στο πεδίο της συχνότητας (Inter Carrier Interference - ICI), με αποτέλεσμα την απώλεια χρήσιμης πληροφορίας και χαμηλή ποιότητα επικοινωνίας. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το φαινόμενο θα πρέπει να δημιουργηθούν αποστάσεις μεταξύ των γειτονικών υποκαναλιών, χωρίς όμως να δεσμεύεται ή να χάνεται μεγάλο εύρος φάσματος. Αυτό αντιμετωπίζεται με την μέθοδο OFDM.

Η βασική ιδέα του OFDM είναι η διαίρεση του προς μετάδοση wideband σήματος σε μεγάλο αριθμό παράλληλων σημάτων στενής ζώνης. Ένα συμβατικό σύστημα καταλαμβάνει όλο το διαθέσιμο φάσμα, χρησιμοποιώντας παλμούς πολύ μικρής διάρκειας. Στην τεχνική OFDM, τα προς μετάδοση ψηφιακά δεδομένα διοχετεύονται παράλληλα στα υποκανάλια, με χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουμε ισοδύναμα πολλά συστήματα τα οποία μεταδίδουν, ταυτόχρονα το καθένα, ένα μικρό μέρος της πληροφορίας με αργό ρυθμό μετάδοσης, ώστε το καθένα να είναι σήμα στενής ζώνης, ενώ ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης παραμένει σταθερός.

Η τεχνική OFDM οδήγησε στην βελτίωση των χαρακτηριστικών των ασύρματων συστημάτων, καθώς η πληροφορία μεταδίδεται παράλληλα πάνω σε N ορθογώνιες φέρουσες, επιτυγχάνοντας σημαντική μείωση ή ακόμα και εξάλειψη της δια συμβολικής παρεμβολής (ISI) που προκαλείται από τη χρονική διασπορά του καναλιού και τα πολυδιαδρομικά φαινόμενα. Στο σύστημα OFDM τα φάσματα των υπο-φερουσών επικαλύπτονται, χωρίς όμως να δημιουργείται ICI (Inter Carrier Interference). Αυτό επιτυγχάνεται επειδή οι υπο-φέρουσες είναι μαθηματικά ορθογώνιες (ιδιότητες του

μετασχηματισμού Fourier). Στο πεδίο της συχνότητας, κάθε subcarrier (υποκανάλι ή υποφέρουσες της OFDM) εμφανίζει μηδενισμό εκεί που τα γειτονικά του εμφανίζουν μέγιστη τιμή. Έτσι εξασφαλίζουν απουσία παρεμβολών μεταξύ τους.

Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει οι υποφέρουσες να είναι μαθηματικά ορθογώνιες. Έστω για K υποκανάλια, σε κάθε υποκανάλι k , χρησιμοποιείται διαφορετική φέρουσα:

$$y_k = \cos(2\pi f_k t), k = 0, 1, \dots, K - 1$$

Όπου:

f_k = κεντρική συχνότητα του υποκαναλιού.

Αν η διαφορά συχνότητας μεταξύ διαδοχικών υποκαναλιών είναι $\Delta f = 1/T_s$.

Όπου:

T_s = διάρκεια του συμβόλου σε κάθε υποκανάλι

και για $k \neq j$ ισχύει:

$$\int_0^T \cos(2\pi f_k t + \varphi_k) \cos(2\pi f_j t + \varphi_j) dt = 0$$

τότε οι υποφέρουσες είναι ορθογώνιες μεταξύ τους ανεξάρτητα από τις φάσεις τους.

Ωστόσο, υπάρχουν και διάφορα φαινόμενα όπως Doppler και πολυδιαδρομικές διαλείψεις, τα οποία επηρεάζουν το OFDM σύστημα, καθώς αλλοιώνουν την ορθογωνιότητα των υποκαναλιών και προκαλούν παρεμβολές μεταξύ των subcarriers. Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα φαινόμενα, έχουν δημιουργηθεί διάφορες τεχνικές έτσι ώστε να αυξηθεί η ποιότητα των σημάτων και να μειωθούν οι αρνητικές επιπτώσεις των φαινομένων αυτών.

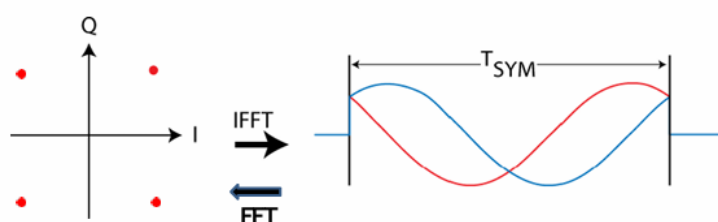
Τέλος, η OFDM κυματομορφή συμπεριλαμβάνει pilot (πιλοτικά) και guard (φύλαξη) subcarriers. Τα pilot subcarriers χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της ποιότητας της σύνδεσης και την εκτίμηση των χαρακτηριστικών του καναλιού, έτσι ώστε να επιτευχθεί μια σταθερή επικοινωνία. Τα guard subcarriers δεν μεταφέρουν δεδομένα ή εκπέμπονται με μικρή ισχύ και χρησιμοποιούνται για να δημιουργείται ένα κενό διάστημα ανάμεσα στα κανάλια εκπομπής, έτσι ώστε να επιτευχθεί μείωση των παρεμβολών από γειτονικά κανάλια.

2.3 Χαρακτηριστικά της OFDM

Η ορθογωνιότητα επιτυγχάνει εξοικονόμηση φάσματος, αφού τα κανάλια είναι αλληλοκαλυπτόμενα και αυτό επιτρέπεται με την προϋπόθεση ότι τα κανάλια μεταξύ τους θα είναι ορθογώνια. Η τεχνική αυτή επιτρέπει σε πολλαπλά σήματα πληροφορίας να μεταδίδονται σε ένα κοινό κανάλι επικοινωνίας και να ανιχνεύονται χωρίς να υπάρχει παρεμβολή μεταξύ τους. Στο πεδίο του χρόνου, τα υποκανάλια μεταδίδουν παράλληλα την πληροφορία ενώ στο πεδίο της συχνότητας, επιτρέπουν την φασματική τους επικάλυψη χωρίς να αλλοιώνονται. Έτσι, δεν χρειάζεται να υπάρχει μεταξύ τους απόσταση όπως θα χρειαζόταν στην FDM αλλά τα σύμβολα μπορούν να μεταδίδονται το ένα δίπλα στο άλλο εξοικονομώντας φάσμα. Η ορθογωνιότητα εξασφαλίζει ότι στα σημεία όπου το φάσμα

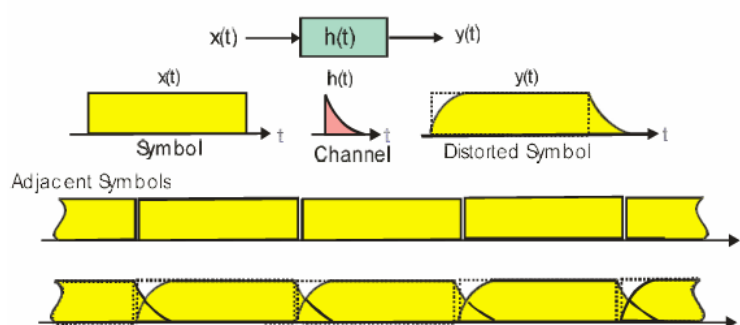
ενός υποκαναλιού παρουσιάζει κορυφή, το φάσμα των γειτονικών υποκαναλιών παρουσιάζει μηδενισμό και για να ισχύει αυτό θα πρέπει τα υποκανάλια να έχουν φέρουσες συχνότητες που να είναι ακέραια πολλαπλάσια μιας βασικής συχνότητας. Αν υπάρξει σφάλμα συγχρονισμού, τότε η συνθήκη ορθογωνιότητας παύει να ισχύει και εμφανίζεται αλλοίωση του σήματος.

Η OFDM τεχνική υλοποιείται με τον αλγόριθμο Fast Fourier Transform (FFT). Ο FFT και ο αντίστροφός του IFFT μπορούν να δημιουργήσουν πολλαπλές ορθογωνικές υποφέρουσες χρησιμοποιώντας μια μόνο ραδιοσυχνότητα. Η εφαρμογή των μετασχηματισμών Fourier συνιστά μια οικονομική και εύκολη υλοποίηση για τη μετατροπή του προϊόντος της διαμόρφωσης από το πεδίο της συχνότητας στο πεδίο του χρόνου (IFFT) και αντιστρόφως (FFT), η οποία διατηρεί ταυτόχρονα την ορθογωνιότητα των φερόντων των OFDM σημάτων.

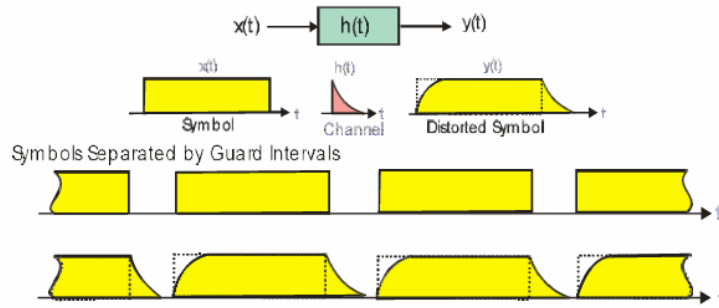


Εικόνα 17: Μετατροπή πεδίου συχνότητας σε πεδίο χρόνου με χρήση IFFT και FFT για την αντίστροφη διαδικασία.

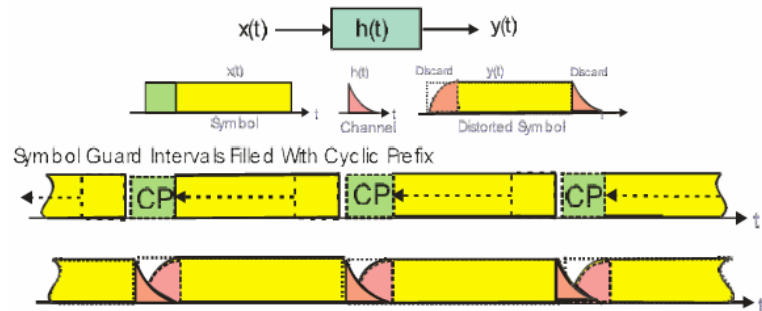
Για να μειώσουμε την διασυμβολική παρεμβολή (ISI), πρέπει για κάθε σύμβολο OFDM να εισάγεται ένα διάστημα προστασίας (guard interval). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την προστασία των σήματα από την διασυμβολική παρεμβολή, που προκαλεί η πολυδιαδρομική διάδοση και της παρεμβολής μεταξύ των υποκαναλιών. Η συχνότερη υλοποίηση των guard intervals είναι με την χρήση κυκλικού προθέματος (cyclic prefix – CP), όπου αντιγράφεται το τέλος κάθε συμβόλου και τοποθετείται στην αρχή του. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται η κυκλικότητα του σήματος και εξασφαλίζεται η ορθογωνιότητα (η κυκλικότητα διασφαλίζει την δυική σχέση κυκλικής συνέλιξης στον χρόνο με πολλαπλασιασμό στη συχνότητα – πράγμα που απλοποιεί εξαιρετικά τις διαδικασίες εκτίμησης και ισοστάθμισης). Η χρονική διάρκεια του διαστήματος προστασίας είναι μεγαλύτερη από τη καθυστέρηση διάδοσης του σήματος και συνήθως μικρότερη ή ίση με $T/4$.



Εικόνα 18: Παρεμβολή συμβόλων στο κανάλι επικοινωνίας.



Εικόνα 19: Χρήση διαστημάτων προστασίας για την μείωση των παρεμβολών μεταξύ των συμβόλων.



Εικόνα 20: Χρήση κυκλικού προθέματος για την μείωση της διασυμβολικής παρεμβολής.

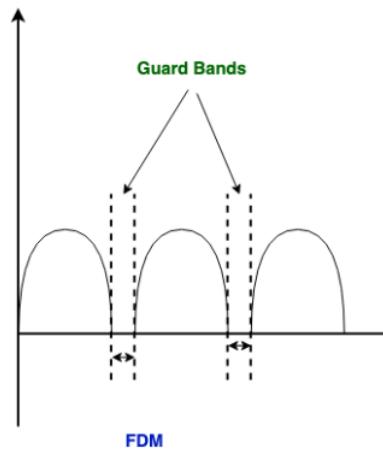
2.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα του σχήματος OFDM

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής είναι ότι υπάρχει καλύτερη αξιοποίηση του φάσματος, καθώς σε μικρό σχετικά φασματικό εύρος γίνεται δυνατή η μετάδοση πολλαπλών παράλληλων σημάτων. Επίσης, η τεχνική διαχέει τα προβλήματα του fast fading, μειώνοντας έτσι τα burst errors και καθιστώντας το σύστημα ανθεκτικό στις παρεμβολές.

Από την άλλη μεριά, μπορεί να υπάρξουν και κάποια προβλήματα. Ένα απ' αυτά είναι ότι υπάρχει ευαισθησία σε CFO (Carrier Frequency Offset), δηλαδή η μετατόπιση των συχνοτήτων δημιουργεί τα μεγαλύτερα προβλήματα στα συστήματα OFDM, όπως οι ολισθήσεις των ταλαντωτών σε πομπό/δέκτη και το φαινόμενο Doppler. Επίσης, η κυματομορφή OFDM εμφανίζει υψηλό PARP (Peak-to-Average Power Ratio), κάνοντάς την ευαίσθητη σε μη γραμμικές παραμορφώσεις του διαύλου, ενώ απαιτούνται αυστηρά γραμμικοί ενισχυτές.

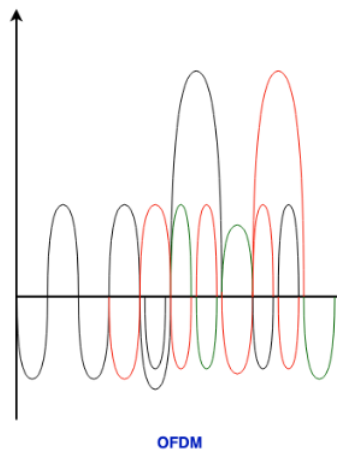
2.5 Διαφορές μεταξύ FDM και OFDM

Στην τεχνική FDM, μεταξύ των καναλιών, απαιτείται guard band έτσι ώστε να μην παρεμβάλλονται μεταξύ τους. Ωστόσο, λόγω των guard band, η φασματική απόδοση είναι χαμηλή, καθώς το φάσμα μεταξύ των καναλιών μένει ανεκμετάλλευτο. Επίσης, το κάθε κανάλι δεσμεύει ένα κομμάτι από το εύρος ζώνης και έχει χαμηλό ρυθμό δεδομένων.



Εικόνα 21: FDM - Χρήση ζωνών προστασίας μεταξύ των καναλιών για αποφυγή παρεμβολών.

Από την άλλη μεριά, στην τεχνική OFDM, δεν χρειάζονται τα guard band, καθώς τα υποκανάλια είναι ορθογώνια και έτσι δεν επηρεάζει το ένα το άλλο. Επίσης, η φασματική απόδοση είναι υψηλή (μαθηματικά μέγιστη για AWGN κανάλι. Σε αντίθεση με την FDM, ο ρυθμός δεδομένων στην OFDM είναι υψηλότερος για το ίδιο εύρος ζώνης. Τέλος η εκτίμηση καναλιού και η εξισορρόπηση στην OFDM είναι υπολογιστικά πολύ πιο αποδοτικές.



Εικόνα 22: OFDM - Επικάλυψη μεταξύ των καναλιών για λιγότερες παρεμβολές και φασματική απόδοση.

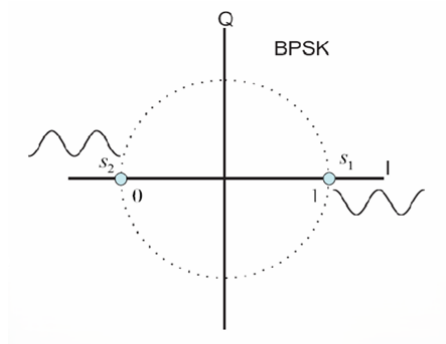
2.6 Τεχνικές Διαμόρφωσης

Σε συνδυασμό με την τεχνική OFDM, εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές διαμόρφωσης όπως PSK, QAM, PAM, ASK ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος. Η διαμόρφωση συμβόλων (modulation) αποτελεί την αντιστοίχιση της πληροφορίας σε ψηφιακή μορφή, σε ένα σύνολο συμβόλων και τελικά αναλογικών κυματομορφών, έτσι ώστε να μεταδοθεί στο κανάλι. Παρακάτω γίνεται αναφορά στις κυριότερες διαμορφώσεις που χρησιμοποιούνται σε αυτά τα συστήματα.

2.6.1 Διαμόρφωση Ολίσθησης Φάσης (Phase Shift Keying - PSK)

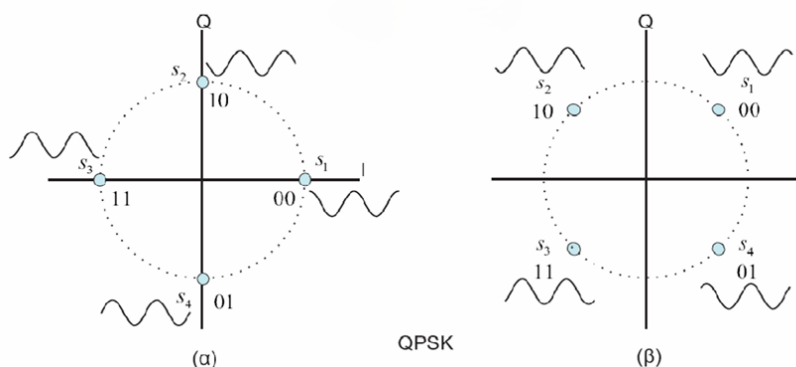
Η διαμόρφωση ολίσθησης φάσης χρησιμοποιείται πολύ συχνά στα συστήματα OFDM καθώς είναι ανθεκτική στον θόρυβο και εύκολα υλοποιήσιμη. Χρησιμοποιείται για την αποκατάσταση των φερόντων σημάτων στον πομπό και την μετατροπή της πληροφορίας σε σύμβολα με διαφορετικές φάσεις. Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές της ανάλογα το σύστημα που θα χρησιμοποιηθεί και είναι οι εξής:

- **Binary Phase Shift Keying (BPSK):** Χρησιμοποιεί δύο φάσεις (0° και 180°) για την αναπαράσταση των 0 και 1. Έτσι κάθε σύμβολο αντιστοιχεί σε 1bit πληροφορίας (0 ή 1) χρησιμοποιώντας μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα χαμηλή φασματική απόδοση.



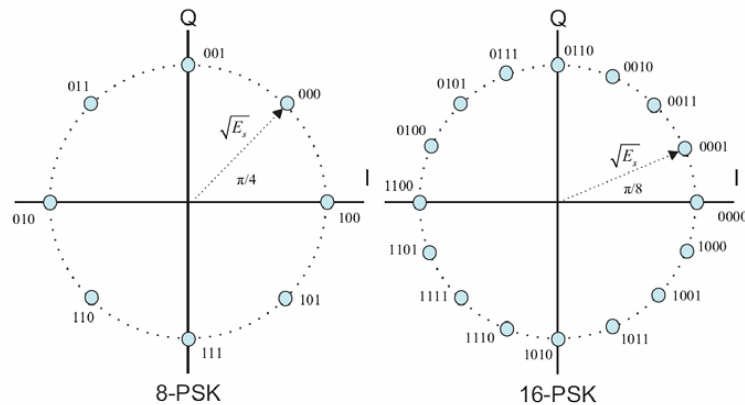
Εικόνα 23: Διάγραμμα αστερισμού BPSK.

- **Quadrature Phase Shift Keying (QPSK):** Χρησιμοποιεί τέσσερις φάσεις (0° , 90° , 180° , 270°) και κάθε σύμβολο αντιστοιχεί σε 2bit πληροφορίας οδηγώντας σε καλύτερη φασματική απόδοση.



Εικόνα 24: Διάγραμμα αστερισμού QPSK με διαφορετικά επίπεδα φάσης και πλάτους.

- **M-PSK:** Για την αντιστοίχιση περισσότερων bit ανά σύμβολο (όπως 8-PSK ή 16-PSK), αυξάνεται ο αριθμός των φάσεων. Ωστόσο, αυτό μπορεί να κάνει το κανάλι λιγότερο ανθεκτικό στον θόρυβο.



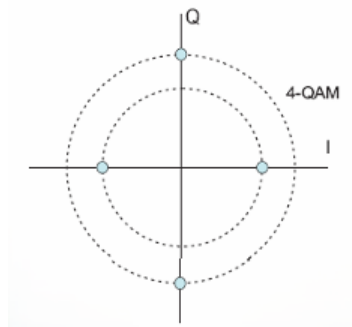
Εικόνα 25: Διάγραμμα αστερισμού 8-PSK και 16-PSK.

- **Differential PSK (DPSK):** Σε αυτή την περίπτωση, η φάση αλλάζει δυναμικά με βάση τις φάσεις των προηγούμενων συμβόλων, χωρίς να χρειάζεται να αντιστοιχήσουμε κάθε φάση σε ακριβή σύμβολα. Αυτή η μορφή κωδικοποίησης λειτουργεί καλύτερα σε περιβάλλοντα όπου η φάση μπορεί να μεταβάλλεται/ολισθαίνει.

2.6.2 Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

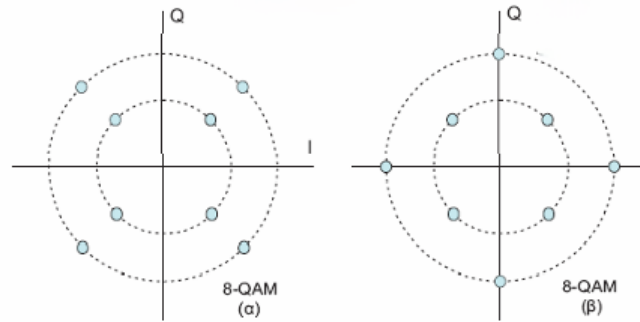
Σε αυτή την διαμόρφωση, τα μηνύματα κωδικοποιούνται τόσο στο πλάτος όσο και στη φάση του φέροντος. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η ποσότητα των bit πληροφορίας που στέλνονται. Οι παραλλαγές της ανάλογα το σύστημα που θα χρησιμοποιηθεί είναι οι εξής:

- 4 – QAM: Αντιστοιχεί 2 bit σε κάθε σύμβολο και είναι ίδια με την QPSK.



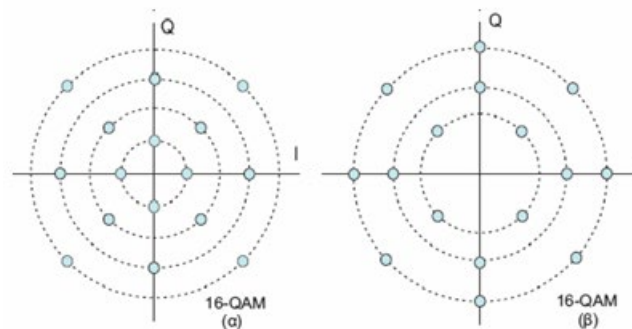
Εικόνα 26: Διάγραμμα αστερισμού 4-QAM.

- 8 – QAM: Αντιστοιχούν 3 bits σε κάθε σύμβολο.



Εικόνα 27: Διάγραμμα αστερισμού 8-QAM με διαφορετικά επίπεδα φάσης και πλάτους.

- 16 – QAM: Αντιστοιχούν 4 bits σε κάθε σύμβολο.



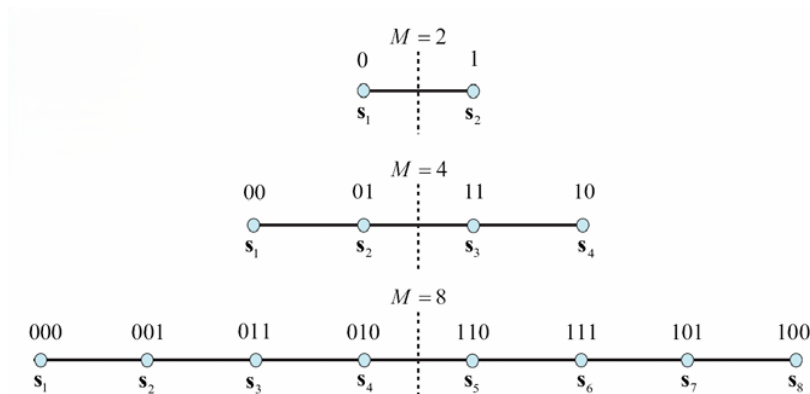
Εικόνα 28: Διάγραμμα αστερισμού 16-QAM με διαφορετικά επίπεδα φάσης και πλάτους

- 64 – QAM: Αντιστοιχούν 6 bits σε κάθε σύμβολο.
- 256 – QAM: Αντιστοιχούν 8 bits σε κάθε σύμβολο.

Οι ορθογώνιοι αστερισμοί χρησιμοποιούνται πολύ συχνά στην πράξη αφού έχουν το πλεονέκτημα της εύκολης διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης αλλά για $M > 16$ παρουσιάζουν χειρότερες επιδόσεις σε σχέση με τους μη-ορθογώνιους. Οι ορθογώνιοι αστερισμοί με άρτιο αριθμό επιπέδων πλάτους (4, 16, 64, 256, κ.ο.κ) ονομάζονται τετραγωνικοί (square QAM).

2.6.3 Pulse Amplitude Modulation (PAM)

- Στην M-PAM, όλα τα σήματα έχουν την ίδια φάση και για την αναπαράσταση των συμβόλων χρησιμοποιείται το πλάτος καθώς είναι το μόνο που αλλάζει.
- Στο 4-PAM, κάθε σύμβολο αντιστοιχεί σε δυάδες από bits (00, 01, 10, 11).
- Η πιθανότητα σφάλματος εξαρτάται από τις τιμές του πλάτους.

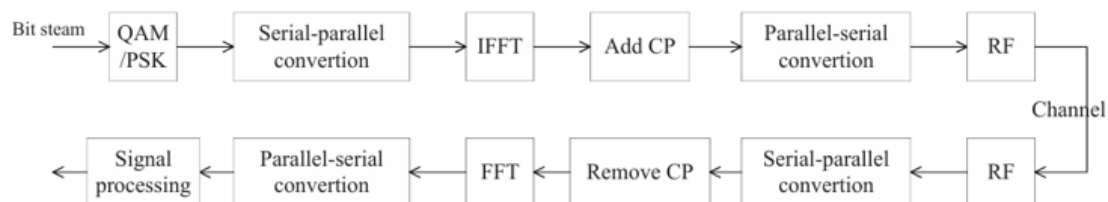


Εικόνα 29: Διάγραμμα αστερισμού για διαφορετικές τιμές M .

2.7 Διαδικασία μετάδοσης OFDM σήματος

Η μετάδοση ενός σήματος σε ένα σύστημα OFDM ξεκινά με την κωδικοποίησή του, τον διαχωρισμό του σε πακέτα και τη διαμόρφωσή του μέσω ψηφιακής διαμόρφωσης. Στην συνέχεια το σήμα μετατρέπεται από σειριακό σε παράλληλο ώστε να τροφοδοτήσει τον IFFT, προστεθεί το κυκλικό πρόθεμα, πριν μετατραπεί σε αναλογικό για να μεταδοθεί. Στην δέκτη ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία, αφού αφαιρεθεί η κυκλική επέκταση και απορριφθούν τα περιττά δείγματα, το αρχικό σήμα επαναφέρεται μέσω FFT.

Η διαδικασία που ακολουθείται για την αναπαράσταση της μετάδοσης ενός OFDM σήματος στην παρούσα εργασία περιέχει τα παρακάτω βήματα σύμφωνα με την αναπαράσταση της εικόνας.



Εικόνα 30: Διαδικασία μετάδοσης σήματος OFDM.

Βήμα 1°. Η διαδικασία ξεκινά με μια ροή δεδομένων την οποία θέλουμε να μεταδώσουμε. Συνεχίζουμε διαμορφώνοντας αυτά τα bits χρησιμοποιώντας την τεχνική Quadrature Amplitude Modulation – QAM και αντιστοιχίζοντάς τα με μιγαδικά σύμβολα, τα οποία αναπαριστούν τις διαφορετικές τιμές φάσης και πλάτους του σήματος.

Βήμα 2°. Στην συνέχεια, για να μπορέσει το σύστημα OFDM να μεταδώσει ταυτόχρονα τα σύμβολα σε περισσότερους από ένα υποφορείς, τα διαμορφωμένα σύμβολα μετατρέπονται σε παράλληλες ροές.

Βήμα 3°. Με τον Inverse Fast Fourier Transform - IFFT συνδυάζονται όλα τα σύμβολα των υποφορέων, που βρίσκονται στο πεδίο της συχνότητας, σε ένα σήμα στο ίδιο χρονικό διάστημα. Η IFFT μετατρέπει το σήμα από το πεδίο της συχνότητας στο πεδίο του χρόνου, καθιστώντας το κατάλληλο για μετάδοση μέσω του καναλιού. Επιπλέον, η IFFT διατηρεί την ορθογωνιότητα των υποφορέων εξασφαλίζοντας την μείωση των διαφεροντικών παρεμβολών μεταξύ τους (ICI) και την αντιμετώπιση της διασυμβολικής παρεμβολής (ISI),

εξασφαλίζοντας αποδοτική χρήση του φάσματος. Η συνάρτηση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εξόδου μετά απ' αυτή την διαδικασία είναι:

$$f(x) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi kn/N}$$

Όπου:

N = αριθμός subcarriers

k = δείκτης subcarrier

X_k = σύνολο συμβόλων σε κάθε k

n = διακριτός χρόνος

Βήμα 4°. Συνεχίζουμε προσθέτοντας το κυκλικό πρόθεμα (Cyclic Prefix – CP) έτσι ώστε να μην συμβεί διασυμβολική παρεμβολή (ISI). Για να διατηρηθεί αυτό στο OFDM σύστημά μας, προστίθεται κυκλικό πρόθεμα, το οποίο έχει την αρμοδιότητα να αντιγράψει το τέλος κάθε συμβόλου και να το τοποθετήσει στην αρχή του ίδιου συμβόλου. Έτσι επιτρέπεται η χρήση του FFT στον δέκτη χωρίς να επηρεάζονται τα σύμβολα λόγω πολλαπλών διαδρομών αλλοιώνοντάς τα καθώς και η απλοποίηση του equalizer. Η συνάρτηση που χρησιμοποιείται είναι:

$$x_{cp}[n] = x[N - L_{cp} + n], \quad n = 0, 1, \dots, L_{cp} - 1$$

Όπου:

x[n] = σύμβολο

N = μήκος συμβόλου

L_{cp} = μήκος CP

Βήμα 5°. Αφού ολοκληρωθούν οι παραπάνω ενέργειες, για να μεταδοθεί το σήμα μέσω του αναλογικού καναλιού (Radio Frequency – RF), μετατρέπεται από την παράλληλη μορφή του σε σειριακή ροή.

Βήμα 6°. Το σήμα περνάει μέσα από το κανάλι, το οποίο αναπαρίσταται ως εξής:

$$y[n] = x[n] * h[n] + w[n]$$

Όπου:

h[n] = κρουστική απόκριση καναλιού

w[n] = θόρυβος

* το σύμβολο της συνέλιξης

Βήμα 7°. Όταν το αναλογικό σήμα RF φτάσει στον δέκτη, θα αποδιαμορφωθεί και θα μετατραπεί σε ψηφιακή μορφή αλλά και από σειριακή ροή σε παράλληλη για να μας δώσει στην συνέχεια τα δεδομένα.

Βήμα 8°. Μετά, αφαιρούμε το κυκλικό πρόθεμα και παραμένει το σύμβολο χωρίς τις επιρροές ISI για να μετασχηματιστεί με FFT.

Βήμα 9°. Με τον Fast Fourier Transform – FFT μετατρέπεται το σήμα από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας, επαναφέροντας τα αρχικά σύμβολα του κάθε υποφορέα. Ο FFT με αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζει ότι η πληροφορία θα παραμείνει διαθέσιμη, επιτρέποντας την εξαγωγή των μεταδιδόμενων δεδομένων. Η συνάρτηση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εξόδου μετά απ' αυτή την διαδικασία είναι:

$$Y_k = \sum_{n=0}^{N-1} y[n]e^{-j2\pi kn/N}$$

Όπου:

Y_k = σήμα στο πεδίο της συχνότητας

Βήμα 10°. Τέλος, η παράλληλη ροή δεδομένων μετατρέπεται ξανά σε σειριακή ροή και στην συνέχεια το σήμα υπόκειται σε αποδιαμόρφωση QAM, έτσι ώστε να ανακτηθεί η αρχική ροή bit.

2.8 Τρόπος αποφυγής διασυμβολικής παρεμβολής

Για να αποφευχθεί η διασυμβολική παρεμβολή θα πρέπει η χρονική διάρκεια του διαστήματος φύλαξης T_g να είναι τουλάχιστον ίση με την μέγιστη χρονική διασπορά T_m που εισάγει ο δίαυλος. Στο διάστημα φύλαξης δεν μεταδίδεται πληροφορία και έτσι μειώνεται ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων.

Εκτός από το κάτω όριο $T_g \geq T_m$, για την επιλεγόμενη διάρκεια του διαστήματος φύλαξης που είναι η μέγιστη χρονική διασπορά του διαύλου, υπάρχει και ένα άνω όριο, το οποίο καθορίζεται από την μέγιστη αποδεκτή μείωση του ρυθμού μετάδοσης. Κατά την διάρκεια του διαστήματος φύλαξης, ο δέκτης απορρίπτει όποια σήματα λαμβάνει, έτσι ώστε να αποφευχθεί η παρεμβολή μεταξύ των διαδοχικών συμβόλων.

Ο πομπός μπορεί να μην εκπέμπει σήμα κατά την διάρκεια του διαστήματος φύλαξης, αλλά σε ένα σύστημα OFDM που υλοποιείται με μετασχηματισμό Fourier, είναι αποδοτικότερο, κατά την διάρκεια του διαστήματος φύλαξης ο πομπός να εκπέμπει ένα τμήμα του εκπεμπόμενου συμβόλου, συγκεκριμένα μια κυκλική επέκταση του. Αυτή η τεχνική επιτρέπει η ισοστάθμιση στον δέκτη να είναι απλούστερη. Πιο συγκεκριμένα, η εισαγωγή της κυκλικής επέκτασης στο μεταδιδόμενο σήμα, επιτρέπει την πραγματοποίηση της ισοστάθμισης στον δέκτη μέσω μιας απλής μιγαδικής διαίρεσης. Έτσι, το διάστημα φύλαξης καταλαμβάνεται από ένα τμήμα του προς μετάδοση συμβόλου το οποίο δημιουργείται με την μορφή κυκλικού προθέματος.

2.9 Προβλήματα Συγχρονισμού

Η ορθογωνιότητα των καναλιών παύει να ισχύει όταν εμφανίζονται προβλήματα συγχρονισμού. Τα προβλήματα αυτά προκύπτουν από:

1. Απόκλιση φέρουσας συχνότητας (Carrier Frequency Offset - CFO): έχουμε όταν υπάρχει απόκλιση συχνότητας μεταξύ αυτής του πομπού και του δέκτη. Οι δύο κύριες αιτίες είναι:

- Ασυμφωνία συχνότητας μεταξύ των ταλαντωτών του πομπού και του δέκτη. Οι ταλαντωτές δεν είναι ποτέ ίδιοι μεταξύ τους και η ονομαστική τους συχνότητα με την πραγματική τους διαφέρει λόγω κατασκευαστικών διαφορών, μεταβολών θερμοκρασίας, πίεσης, ηλικίας και άλλων παραγόντων.
- Φαινόμενο Doppler. Την συχνότητα του λαμβανόμενου σήματος επηρεάζει η κίνηση του πομπού, του δέκτη ή οποιουδήποτε αντικειμένου στο περιβάλλον διάδοσης που προκαλεί μετατόπιση Doppler.

2. Θόρυβο φάσης (Phase Noise): είναι ο θόρυβος που προκύπτει από τις ταχείες, βραχυπρόθεσμες, τυχαίες διακυμάνσεις της φάσης που εμφανίζονται σε ένα σήμα. Αυτές οι τυχαίες διακυμάνσεις προκαλούνται από χρονικές αστάθειες, οι οποίες προκαλούνται από διάφορους παράγοντες, όπως ατέλειες των ταλαντωτών και περιβαλλοντικές μεταβολές.

3. Απόκλιση Χρόνου Δειγματοληψίας (Sampling Clock Offset - SCO): προκύπτει από διαφορά στη συχνότητα του ρολογιού δειγματοληψίας μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Αν το ρολόι του δέκτη είναι αργό, παραλείπονται ορισμένα δείγματα εντός ενός χρονικού διαστήματος. Αν το ρολόι του δέκτη είναι γρήγορο, προστίθενται επιπλέον αχρείαστα δείγματα. Και οι δύο περιπτώσεις προκαλούν παραμόρφωση.

4. Σφάλματα στην Εκτίμηση Έναρξης Συμβόλων (Symbol Timing Offset - STO): προκύπτουν επειδή ο δέκτης δεν μπορεί να προσδιορίσει το σημείο έναρξης της δειγματοληψίας για να αποφεύγει τις παρεμβολές (ISI) από γειτονικά σύμβολα, καθώς η ακριβής θέση του δείγματος δεν είναι γνωστή. Έτσι, η δειγματοληψία καθίσταται δύσκολη, αφού πολλά από τα αρχικά δείγματα του δειγματοληπτημένου λαμβανόμενου σήματος αποτελούνται μόνο από θόρυβο.

Η επίδραση του σφάλματος του συγχρονισμού εξαρτάται από την σχετική απόκλιση συχνότητας, δηλαδή από την πραγματική απόκλιση κανονικοποιημένη ως προς το εύρος του κάθε υπό-καναλιού (subcarrier distance). Για παράδειγμα, μια τιμή απόκλισης συχνότητας λόγω Doppler ή λόγω απόκλισης των ταλαντωτών μπορεί να έχει αμελητέα επίδραση σε ένα OFDM σύστημα με μεγάλο εύρος υπό-καναλιών, ενώ να είναι καταστροφική για ένα σύστημα με υπό-κάναλια μικρού εύρους.

2.10 PARP

Στα σήματα OFDM παρατηρούνται πολύ υψηλές τιμές του λόγου της μέγιστης προς τη μέση ισχύ (Peak-to-Average Power Ratio PARP). Έτσι, το σήμα παρουσιάζει μεγάλη δυναμική περιοχή και αυτό απαιτεί είτε χρήση ενισχυτών με μεγάλο εύρος γραμμικής λειτουργίας, με αποτέλεσμα υψηλό κόστος, είτε οι ενισχυτές να λειτουργούν με μεγάλη αναδίπλωση ισχύος, με αποτέλεσμα η αποδοτικότητα ισχύος να είναι χαμηλή.

Το μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου, η ισχύς δεν αποκλίνει πολύ από την μέση τιμή της. Ωστόσο, όταν σε κάποιες χρονικές στιγμές προκύπτουν στιγμιαία υψηλές τιμές ισχύος, οι οποίες έχουν χαμηλές πιθανότητες εμφάνισης, οδηγούν τους ενισχυτές στην περιοχή μη γραμμικής λειτουργίας τους και προκαλούν αλλοίωση του σήματος.

2.11 Συμπεριφορά OFDM σε ασύρματους διαύλους

Τα OFDM σήματα ενδείκνυνται για μετάδοση σημάτων ευρείας ζώνης σε ασύρματους διαύλους. Αυτό συμβαίνει διότι έχουν υψηλή ανθεκτικότητα στη διασυμβολική παρεμβολή (ISI), που προκαλείται λόγω της συχνοεπιλεκτικής συμπεριφοράς του καναλιού. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση guard interval, τα οποία διασφαλίζουν ότι οι μεταδόσεις δεν παρεμβάλλονται μεταξύ τους, οπότε και η διασυμβολική παρεμβολή μειώνεται σημαντικά. Αυτό συμβαίνει με την προϋπόθεση ότι η μέγιστη χρονική διασπορά του διαύλου δεν είναι μεγαλύτερη από το διάστημα φύλαξης. Αντίθετα, ένα μέρος της διασυμβολικής παρεμβολής παραμένει, επηρεάζοντας την ποιότητα της μετάδοσης.

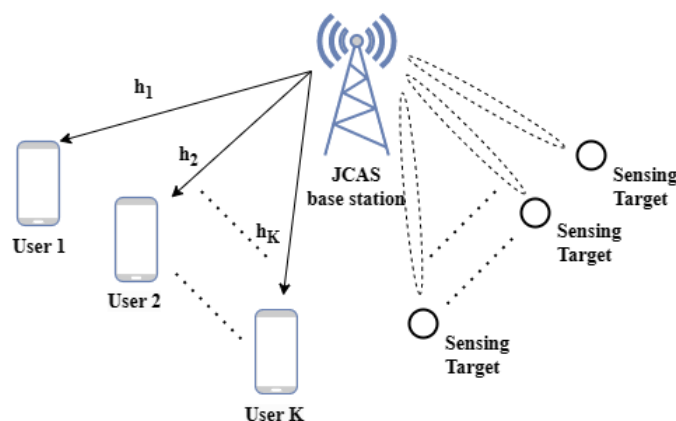
Εκτός από την συχνοεπιλεκτική συμπεριφορά του διαύλου, το σήμα επηρεάζεται και από την χρονική μεταβολή του καναλιού, η οποία συμβαίνει λόγω του φαινομένου Doppler. Αυτό το φαινόμενο έχει ως αποτέλεσμα την μετατόπιση της συχνότητας των υποφορέων, οδηγώντας σε παρεμβολές μεταξύ τους (ICI).

Ένα σύστημα OFDM με μεγάλο διάστημα φύλαξης είναι πιο ανθεκτικό σε διαύλους με έντονη συχνοεπιλεκτική συμπεριφορά, δηλαδή με μεγάλη χρονική διασπορά. Ωστόσο, αυτό προϋποθέτει τη χρήση μεγάλου διαστήματος φύλαξης και άρα μεγάλης διάρκειας OFDM συμβόλου. Για δεδομένο εύρος ζώνης, η μεγάλη διάρκεια OFDM συμβόλου οδηγεί σε υποκανάλια μικρού εύρους συχνοτήτων, τα οποία είναι ευαίσθητα σε σφάλματα συγχρονισμού και στην επίδραση της χρονικής μεταβολής του διαύλου λόγω Doppler.

Κεφάλαιο 3. Ολοκληρωμένα Συστήματα Επικοινωνίας και Ραντάρ (JCAS): Λειτουργία, Ανίχνευση και Βελτιστοποίηση

3.1 Joint communication and ραντάρ sensing (JCAS) systems.

Τα συστήματα αυτά αποσκοπούν στην ενοποίηση των λειτουργιών ραντάρ και της ασύρματης επικοινωνίας σε ένα ενιαίο σύστημα. Επιτρέπουν τις λειτουργίες μετάδοσης δεδομένων και ανίχνευσης στόχων ταυτόχρονα, επιτυγχάνοντας αξιοποίηση του φάσματος και ακρίβεια του εντοπισμού και παρακολούθησης στόχων. Τέτοιου είδους συστήματα τηλεπισκόπησης είναι πολύ σημαντικά και εφαρμόζονται τόσο σε στρατιωτικές όσο και σε πολιτικές εφαρμογές, όπως τα αυτόνομα οχήματα και έξυπνες πόλεις. Με την βοήθεια διάφορων τεχνικών όπως MIMO (Multiple Input Multiple Output) και OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), μπορεί να γίνει με επιτυχία ο συνδυασμός επικοινωνίας και ραντάρ, μειώνοντας τις παρεμβολές και κάνοντας πιο ακριβή την εκτίμηση θέσης και κίνησης των στόχων. [1][2][3][4][5][6][7][11] [16][17]



Εικόνα 31: Σύστημα JCAS με έναν σταθμό βάσης που επικοινωνεί με πολλαπλούς χρήστες και ανιχνεύει στόχους.

3.2 Τα χαρακτηριστικά των ραντάρ

Τα ραντάρ δεν χρησιμοποιούνται μόνο για την αναγνώριση των στόχων, αλλά και για την βελτίωση της επικοινωνίας μεταξύ πομπού και δέκτη. Κάποια από τα χαρακτηριστικά τους είναι:

1. Ανίχνευση σε μεγάλες αποστάσεις. Τα συστήματα ραντάρ έχουν σχεδιαστεί για να ανιχνεύουν αντικείμενα σε μεγάλες αποστάσεις, που συχνά φτάνουν μέχρι και εκατοντάδες χιλιόμετρα (ανάλογα με την συχνότητα και το είδος στόχου), ενώ ταυτόχρονα μπορούν να παρακολουθούν πολλαπλούς στόχους. Το μέγιστο εύρος τους (range) υπολογίζεται από την συνάρτηση:

$$R_{max} = \left(\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{min}} \right)^{1/4}$$

Όπου:

P_t = ισχύς εκπομπής

G = κέρδος κεραίας

λ = μήκος κύματος

σ = διατομή ραντάρ (radar cross-section)

P_{min} = ελάχιστη ανιχνεύσιμη ισχύς

2. Ανθεκτικότητα σε περιβαλλοντικές αλλαγές. Τα συστήματα ραντάρ είναι αποτελεσματικά κάτω από διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως σε δύσκολες καιρικές συνθήκες καθώς και σε περιβάλλοντα με χαμηλό φωτισμό, για παράδειγμα κατά την διάρκεια της νύχτας, σε αντίθεση με άλλα (π.χ. οπτικά) συστήματα ανίχνευσης.

3. 3D εντοπισμός στόχου. Τα ραντάρ μπορούν να παρέχουν ακριβή εντοπισμό στόχων στον τρισδιάστατο χώρο, προσδιορίζοντας την απόσταση, το ύψος και την γωνία ανίχνευσης.

4. Ανθεκτικότητα απέναντι σε παρεμβολές. Διάφορα είδη παρεμβολών μπορούν να διαταράξουν την απόδοση των ραντάρ. Ωστόσο, με την κατάλληλη επεξεργασία σήματος μπορεί να εξασφαλιστεί σταθερή απόδοση ακόμα και σε δυσμενής συνθήκες και να βελτιωθεί η ανθεκτικότητά τους στις παρεμβολές. Ο δείκτης απόδοσης δίνεται από την σχέση:

$$SINR = \frac{P_s}{P_n + P_j}$$

Όπου:

P_s = ισχύς σήματος προερχόμενο από τον στόχο

P_n = ισχύς θορύβου

P_j = ισχύς παρεμβολής

3.3 Η λειτουργία των ραντάρ

Ο όρος Radio Direction and Ranging (Radar) περιγράφει την τεχνική που χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνητικά κύματα για την ανίχνευση, τον εντοπισμό και την παρακολούθηση αντικειμένων. Η βασική λειτουργία του ραντάρ περιλαμβάνει την εκπομπή ενός ηλεκτρομαγνητικού παλμού από μια κεραία προς έναν στόχο. Μέρος την ενέργειας αυτού του παλμού ανακλάται από τον στόχο και επιστρέφει στο ραντάρ.

Η απόσταση στην οποία βρίσκεται ο στόχος από το ραντάρ προσδιορίζεται από την χρονική καθυστέρηση μεταξύ του εκπεμπόμενου και του ανακλώμενου σήματος:

$$R = \frac{c * t_d}{2}$$

Επιπλέον, η ταχύτητα του στόχου προσδιορίζεται από την μετατόπιση της συχνότητας λόγω του φαινομένου Doppler:

$$f_d = \frac{2vf_c}{c}$$

Όπου:

v = σχετική ταχύτητα του στόχου

f_c = συχνότητα λειτουργίας του ραντάρ

Το ραντάρ λειτουργεί στην περιοχή μικροκυμάτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Τα μήκη κύματος μπορούν να κυμαίνονται από μερικά χιλιοστά έως αρκετά μέτρα. Η ταχύτητα του κύματος, η οποία ισούται με την ταχύτητα του φωτός διαιρεμένη με το μήκος κύματος, επηρεάζει τη συχνότητά του. Οι συχνότητες του ραντάρ μετρούνται σε GHz ή MHz, συνήθως μεταξύ 10 GHz και 10 MHz, αν και στα πλαίσια του 5G και 6G οι συχνότητες radar μπορεί να φτάνουν και τα 28GHz (FR2 συχνότητες).

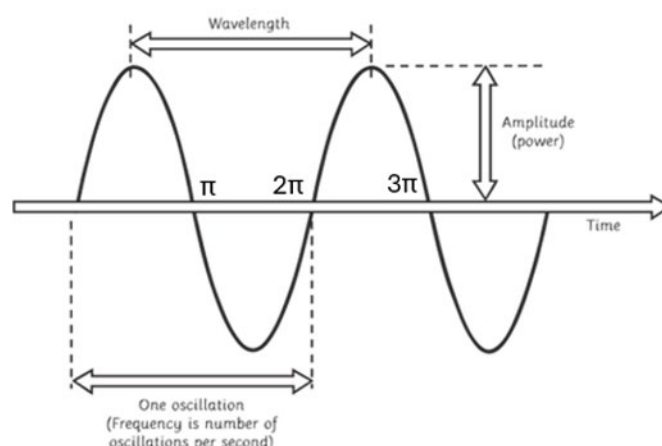
3.4 Χαρακτηριστικά των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Μήκος κύματος. Μήκος κύματος (λ) είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ενός κύματος.

Περίοδος και συχνότητα. Η περίοδος (T) ενός κύματος είναι ο χρόνος που χρειάζεται ένα κύμα για να μεταβεί από τη μία κορυφή στην επόμενη. Η συχνότητα (f) είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος και εκφράζει τον αριθμό των κορυφών που περνούν ανά δευτερόλεπτο από ένα σημείο.

Η ταχύτητα του κύματος δίνεται από την σχέση: $u = f * \lambda$. Στην περίπτωση των ραδιοκυμάτων, η ταχύτητα του κύματος είναι σχεδόν ίση με την ταχύτητα του φωτός.

Φάση. Η φάση ενός κύματος περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο ένα κύμα τοποθετείται σε σχέση με ένα άλλο. Μπορεί να προσδιοριστεί εξετάζοντας πού βρίσκονται οι κορυφές ή οι κοιλότητες. Ανάλογα με τη σχέση φάσης τους, τα κύματα μπορούν να προστίθενται είτε εποικοδομητικά είτε καταστροφικά. Η ευθυγράμμιση των κορυφών οδηγεί σε εποικοδομητική πρόσθεση, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του πλάτους του κύματος. Όταν οι κορυφές και οι κοιλότητες ευθυγραμμίζονται, πραγματοποιείται καταστροφική πρόσθεση, δηλαδή τα εκτός φάσης κύματα αλληλοεξουδετερώνονται, η οποία μπορεί να προκαλεί μέχρι και ακύρωση όπου το καθαρό πλάτος γίνεται μηδέν.

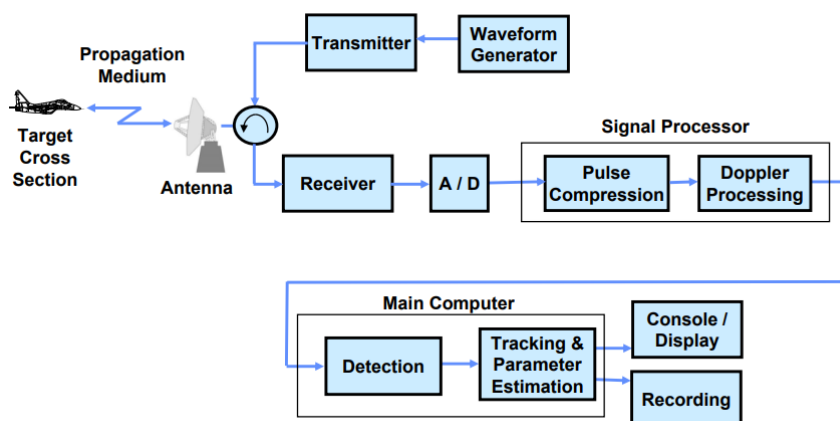


Εικόνα 32: Διάγραμμα κύματος που απεικονίζει το μήκος κύματος, το πλάτος, την περίοδο κύματος, τον χρόνο, την φάση και την ένταση.

Πόλωση. Η πόλωση αναφέρεται στην διεύθυνση του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Τα συστήματα ραντάρ μπορούν να χρησιμοποιούν διαφορετικές πολώσεις για την καλύτερη ανίχνευση στόχων, με την κεραία να ελέγχει τις ιδιότητες πόλωσης του κύματος. Επίσης, η επιλογή πόλωσης μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος και την μείωση των παρεμβολών.

3.5 Διαδικασία αποστολής σήματος

Η διαδικασία που ακολουθείται μετά την ενεργοποίηση του ραντάρ περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:



Εικόνα 33: Διάγραμμα λειτουργίας συστήματος ραντάρ.

1. Παραγωγή και ενίσχυση κυματομορφής. Ο πομπός παράγει ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα και στην συνέχεια ο παλμός αυτός ενισχύεται έτσι ώστε να αποκτήσει την κατάλληλη ισχύ για την μετάδοσή του.

2. Κατεύθυνση την ενέργειας στην κεραία. Ο παλμός μεταδίδεται μέσω ενός διακόπτη (RF switch – duplexer), ο οποίος διαχωρίζει τις λειτουργίες εκπομπής και λήψης. Επίσης, ο διακόπτης αυτός κατευθύνει την ενέργεια στην κεραία για μετάδοση του σήματος.

3. Διάδοση και ανάκλαση. Ο εκπεμπόμενος παλμός διαδίδεται στην ατμόσφαιρα και αλληλεπιδρά με αντικείμενα που θα συναντήσει. Η διατομή του στόχου, το ηλεκτρομαγνητικό του μέγεθος και το υλικό του καθορίζει πόση ενέργεια ανακλάται.

4. Λήψη ανακλώμενου σήματος. Μόλις μεταδοθεί ο παλμός, το ραντάρ μεταβαίνει από τη λειτουργία εκπομπής στη λειτουργία λήψης. Η κεραία παίρνει το ανακλώμενο σήμα και το στέλνει στην δέκτη. Η απόσταση μεταξύ του ραντάρ και του στόχου καθορίζεται από το χρονικό διάστημα μεταξύ του εκπεμπόμενου και του λαμβανόμενου σήματος και δίνεται από την σχέση:

$$d = \frac{c * \Delta_t}{2}$$

Όπου:

d = απόσταση μεταξύ ραντάρ και στόχου

c = ταχύτητα φωτός

Δ_t = χρόνος μεταξύ του εκπεμπόμενου και του λαμβανόμενου σήματος

5. Μετατροπή και συλλογή ενέργειας. Η κεραία συλλέγει την ανακλώμενη ενέργεια και τη μεταδίδει στον δέκτη. Ένας αναλογικός-ψηφιακός μετατροπέας (ADC) μετατρέπει το αναλογικό σήμα σε ψηφιακή μορφή για τη βελτίωση της ανίχνευσης του στόχου. Αυτό επιτρέπει ταχύτερη και πιο αξιόπιστη ψηφιακή επεξεργασία.

6. Επεξεργασία σήματος. Για τη βελτίωση της ανάλυσης και της ανίχνευσης στόχων, το ψηφιοποιημένο σήμα υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία. Χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως:

- **Συμπίεση παλμών**, η οποία αυξάνει την ακρίβεια του ραντάρ και βελτιώνει τη ανάλυση του ανιχνευόμενου σήματος.
- **Ανίχνευση φαινομένου Doppler**, που υπολογίζει την ταχύτητα ενός κινούμενου στόχου αναλύοντας τη μετατόπιση συχνότητας (Δf) του ανακλώμενου σήματος, ως εξής:

$$\Delta f = \frac{2 * u}{c} f_0$$

Όπου:

f_0 = συχνότητα λειτουργίας ραντάρ

7. Ανίχνευση. Τα δεδομένα αναλύονται για την ανίχνευση στόχων που είναι μεγαλύτεροι από ένα προκαθορισμένο μέγεθος κατωφλίου, με βάση την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος. Εάν το σήμα υπερβεί αυτό το κατώφλι, θεωρείται έγκυρος στόχος. Ωστόσο, μπορεί να προκύψει λανθασμένος συναγερμός εάν τα επίπεδα θορύβου βρίσκονται πάνω από τις τιμές του κατωφλίου ή χαμένη ανίχνευση αν τα σήματα δεν φτάνουν αυτές τις τιμές, λόγω διάφορων παραγόντων όπως οι διαλείψεις, με αποτέλεσμα να μην ανιχνευτούν.

$$P_r > P_{th}$$

Όπου:

P_r = ισχύς ανακλώμενου σήματος

P_{th} = κατώφλι

8. Παρακολούθηση και εκτίμηση παραμέτρων. Οι στόχοι που ανιχνεύθηκαν παρακολουθούνται και συσχετίζονται για την εκτίμηση της απόστασης, της ταχύτητας και της κατεύθυνσης κίνησης του στόχου μέσα από πολλαπλές σαρώσεις ραντάρ.

9. Εμφάνιση και καταγραφή. Σε μια κονσόλα ή ψηφιακή οθόνη, εμφανίζονται τα τελικά δεδομένα, συμπεριλαμβανομένων των πληροφοριών του στόχου. Οι πληροφορίες αποθηκεύονται για περαιτέρω εξέταση και κατανόηση της λειτουργίας του ραντάρ.

3.6 Radar range equation

Η σχέση μεταξύ της ισχύος που εκπέμπεται, της λαμβανόμενης ισχύος μετά από ανάκλαση και των διαφόρων άλλων στοιχείων που επηρεάζουν την εμβέλεια ενός συστήματος ραντάρ, περιγράφεται από την εξίσωση εμβέλειας ραντάρ. Η εξίσωση αυτή είναι σημαντική για την κατανόηση των λειτουργικών ορίων ενός τέτοιου συστήματος και

υπολογίζει την μέγιστη εμβέλεια που το ραντάρ μπορεί να εντοπίσει ή να παρακολουθήσει έναν στόχο. Η σχέση είναι η εξής:

$$P_r = \frac{P_t G_t \sigma A}{(4\pi R^2)^2}$$

Όπου,

$$\text{Gain } (G_t) = 4\pi A / \lambda^2$$

P_r = λαμβανόμενη ισχύς

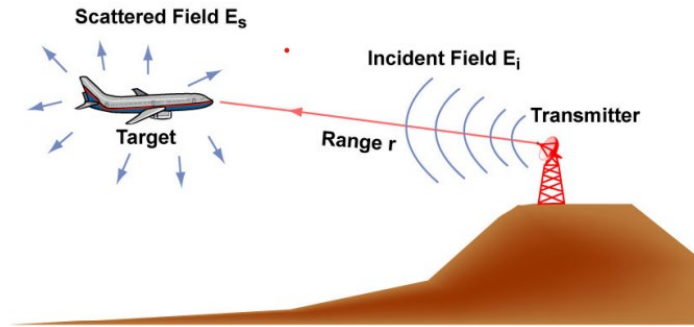
P_t = μεταδιδόμενη ισχύς

R = απόσταση από τον στόχο

Η εξίσωση εμβέλειας ραντάρ προσφέρει έναν τρόπο για τον προσδιορισμό της μέγιστης εμβέλειας στην οποία ένα ραντάρ μπορεί να ανιχνεύσει ή να παρακολουθήσει έναν στόχο, με βάση την εκπεμπόμενη ισχύ, το κέρδος της κεραίας, τη διατομή του στόχου και άλλες μεταβλητές όπως η ευαισθησία του δέκτη, οι απώλειες και οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις.

3.6.1 Ορισμός του radar cross section (RCS)

Radar cross section, ή αλλιώς περιοχή σκέδασης, είναι ένα μέτρο της ποσότητας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ανακλάται από έναν στόχο και επιστρέφει στο ραντάρ. Επίσης, εκφράζει πόσο μεγάλος εμφανίζεται ένας στόχος στα συστήματα ραντάρ, ανάλογα με την ποσότητα της ισχύος που ανακλάται. Το RCS είναι ισοδύναμο μιας επιφάνειας που ανακλά την ισχύ, η οποία αν ακτινοβολούνταν ισοτροπικά, θα ανακλούσε την ίδια ποσότητα ισχύος που θα λάμβανε το ραντάρ από τον στόχο. Όταν ο στόχος βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από το ραντάρ, εμφανίζεται στο σύστημα γεωμετρικά μεγαλύτερο, η ισχύς είναι ισχυρή και τα κύματα του ραντάρ φαίνονται να προέρχονται από διαφορετικές γωνίες και έτσι ο στόχος εντοπίζεται ευκολότερα. Ωστόσο, όσο απομακρύνεται, το ραντάρ παρατηρεί μια μικρότερη επιφάνεια, η ισχύς διασκορπίζεται και τα κύματα φαίνεται να προέρχονται από ένα σημείο καθιστώντας δυσκολότερο το έργο του ραντάρ. Η απόσταση και το μέγεθος δεν είναι οι μόνοι παράγοντες που επηρεάζουν τις τιμές του RCS, αλλά και το σχήμα του στόχου, η πόλωση, το υλικό του και η γωνία θέασης, που παίζει σημαντικό ρόλο κάθε φορά που αλλάζει.



Εικόνα 34: Αρχή λειτουργίας ραντάρ με στόχο ένα κινούμενο αντικείμενο.

Η ισχύς του ανακλώμενου σήματος στο στόχο υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_r = \frac{P_t G_t \sigma}{(4\pi R)^2}$$

Η πυκνότητα ισχύος του ανακλώμενου σήματος στο ραντάρ υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_r = \frac{P_t G_t}{(4\pi R)^2} \frac{\sigma}{(4\pi R)^2}$$

Όπου:

σ = radar cross section units (meters)²

Για τον υπολογισμό του RCS χρησιμοποιείται η σχέση:

$$RCS = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \left(\frac{|E_s|}{|E_i|} \right)^2 = \frac{P_r}{P_t} 4\pi r^2$$

Όπου:

E_s = scattered field

E_i = incident field

3.6.2 Θόρυβος

Στα συστήματα ραντάρ ο θόρυβος μπορεί να προκύψει από πολλούς παράγοντες και έτσι να επηρεάσει την απόδοση του ραντάρ. Κάποιες από τις πιο συνηθισμένες πηγές θορύβου είναι:

- **Θερμικός θόρυβος.** Μπορεί να προκληθεί από τα εξαρτήματα του δέκτη (receiver, waveguide και duplexer) και από περιβαλλοντικούς παράγοντες.
- **Ατμοσφαιρικός θόρυβος.** Προκαλείται από διάφορα περιβαλλοντικά φαινόμενα όπως η ηλιακή ακτινοβολία, οι καιρικές συνθήκες, η επιφάνεια του εδάφους.
- **Τεχνητές παρεμβολές.** Προκαλούνται από διαφορετικά συστήματα επικοινωνιών που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση ή άλλου είδους συσκευές που μπορεί να

δημιουργήσουν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές ή ακόμη και άλλα αντικείμενα-στόχοι που βρίσκονται στην ίδια απόσταση (και άλλη γωνία).

Η ισχύς θορύβου στον δέκτη υπολογίζεται από την σχέση: $N = k B_n T_s$

Όπου:

k = σταθερά του Boltzmann

T = θερμοκρασία θορύβου του συστήματος

B = εύρος ζώνης του δέκτη

3.6.3 Track and Search Radar Range Equation

Ένα σύστημα ραντάρ μπορεί να εκτελεί δύο διαφορετικές λειτουργίες ανάλογα τις πληροφορίες που διαθέτει. Η πρώτη είναι η ανίχνευση, όταν η θέση ενός στόχου είναι γνωστή και η κεραία είναι στραμμένη προς το στόχο, και χρησιμοποιείται η εξίσωση ραντάρ εντοπισμού, η οποία μπορεί να ρυθμιστεί τόσο για σκοπούς αναζήτησης όσο και για σκοπούς παρακολούθησης:

$$S/N = \frac{P_t \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 k T_s B_n L}$$

Η δεύτερη είναι η αναζήτηση, όταν η θέση του στόχου είναι άγνωστη και το ραντάρ πρέπει να αναζητήσει μια μεγάλη γωνιακή περιοχή για να τον βρει, και χρησιμοποιείται η εξίσωση ραντάρ αναζήτησης, η οποία προσαρμόζεται ώστε να διατηρείται συνεχής παρακολούθηση ενός κινούμενου στόχου:

$$S/N = \frac{P_{av} A_e t_s \sigma}{4\pi \Omega R^4 k T_s L}$$

Όπου:

S/N = λόγος σήματος προς θόρυβο

P_{av} = μέση ισχύς εκπομπής

Ω = solid γωνία αναζήτησης

t_s = χρόνος σάρωσης για Ω

A_e = ενεργός επιφάνεια κεραίας

Η βελτιστοποίηση των επιδόσεων ενός συστήματος ραντάρ τόσο για σκοπούς αναζήτησης όσο και για σκοπούς ανίχνευσης είναι ένα κρίσιμο βήμα στη διαδικασία σχεδιασμού. Και στις δύο περιπτώσεις είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί ικανοποιητικός λόγος σήματος προς θόρυβο για την ενίσχυση της συνολικής απόδοσης του συστήματος και τη μείωση των λανθασμένων συναγερμών.

3.6.4 Συνιστώσες του RCS

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν τον τρόπο που ένα σύστημα ραντάρ αλληλεπιδρά με έναν στόχο και μεταβάλλει τις τιμές RCS, κάποιοι απ' τους οποίους είναι:

1. Μέγεθος και σχήμα αντικειμένου. Ο τρόπος με τον οποίο τα κύματα ανακλώνται και σκεδάζονται διαφέρει ανάλογα το μέγεθος και τη γεωμετρία των στόχων. Μπορεί να εμφανιστεί ακόμα και φαινόμενο πολλαπλών διαδρομών. Όσο μεγαλύτεροι είναι, τόσο περισσότερο ισχυρή είναι η ανακλώμενη ισχύς και έτσι οι στόχοι ανακαλύπτονται ευκολότερα.

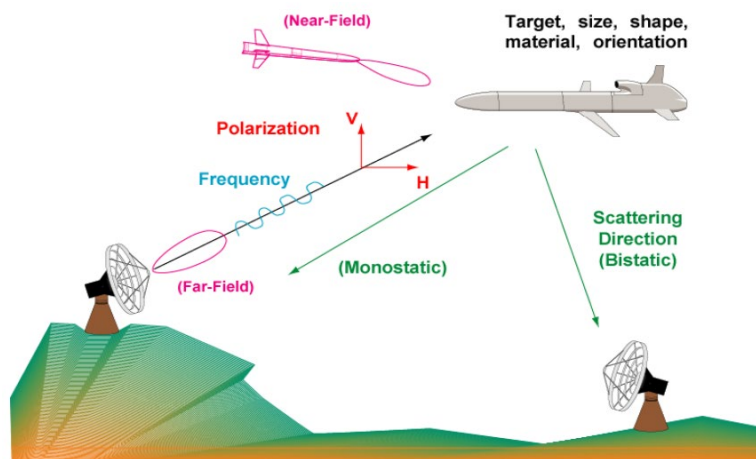
2. Μήκος κύματος. Αντανακλάται περισσότερη ενέργεια αν τα αντικείμενα είναι μεγαλύτερα από το μήκος κύματος του ραντάρ. Αν τα αντικείμενα είναι μικρότερα από το μήκος κύματος, σκεδάζουν με διαφορετικό τρόπο την ενέργεια μειώνοντας έτσι την αποτελεσματικότητα του RCS.

3. Μηχανισμοί σκέδασης. Όταν τα κύματα ραντάρ αλληλεπιδρούν με αντικείμενα, συμβαίνουν διάφοροι μηχανισμοί σκέδασης. Αυτοί οι μηχανισμοί περιλαμβάνουν φαινόμενα συντονισμού, περίθλασης, διάθλασης, σκέδασης άκρων και επιφανειακή σκέδαση. Ο τρόπος με τον οποίο αυτοί οι μηχανισμοί συμβάλλουν στη διατομή ραντάρ εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου και του σήματος ραντάρ.

4. Σύνθεση υλικού. Οι ιδιότητες του υλικού ενός αντικειμένου επηρεάζουν τον τρόπο αλληλεπίδρασης των κυμάτων ραντάρ με αυτό. Τα κύματα ραντάρ αντιδρούν διαφορετικά ανάλογα με την αγωγιμότητα και τη διαπερατότητα ενός υλικού, δύο ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες. Για παράδειγμα, υλικά με υψηλή αγωγιμότητα έχουν μεγαλύτερο RCS, καθώς αντανακλούν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας. Υλικά μη αγωγιμα έχουν χαμηλότερο RCS, καθώς μπορούν να απορροφήσουν ή να σκεδάσουν τα κύματα ραντάρ.

5. Πόλωση. Αναφέρεται στην επίδραση της ανάκλασης στη διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου του κύματος, δηλαδή την πόλωση του εκπεμπόμενου και του ανακλώμενου κύματος. Η ευθυγράμμιση της πόλωσης του σήματος που εκπέμπει το ραντάρ με του λαμβανόμενου σήματος, μετά την πρόσκρουση του σε ένα αντικείμενο, οδηγεί σε αύξηση του RCS. Από την άλλη μεριά, η έλλειψη ευθυγράμμισης, οδηγεί σε μείωση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος.

6. Φαινόμενα πολλαπλών διαδρομών. Τα κύματα ραντάρ μπορεί να ανακλώνται πριν φτάσουν στον στόχο στο έδαφος ή σε άλλα αντικείμενα, περισσότερες από μία φορές πριν φτάσουν στο ραντάρ, οδηγώντας σε φαινόμενα πολλαπλών διαδρομών. Αυτό δυσκολεύει τον υπολογισμό του RCS, που μπορεί είτε να ενισχύσουν είτε να μειώσουν το RCS, ανάλογα την μορφολογία του περιβάλλοντος και την γεωμετρία του στόχου, δηλαδή την φάση με την οποία θα φτάσουν τα κύματα πίσω στο ραντάρ. Παράλληλα δυσχεραίνουν την εκτίμηση απόστασης και ταχύτητας του βασικού στόχου.

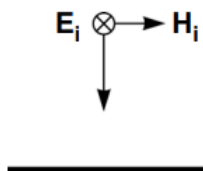


Εικόνα 35: Μοντελοποίηση της σκέδασης του σήματος.

3.6.5 Φαινόμενα ανάκλασης και περίθλασης

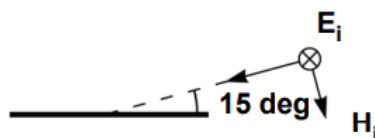
Φαινόμενα όπως η ανάκλαση και η περίθλαση συμβαίνουν όταν ηλεκτρομαγνητικά κύματα προσκρούουν σε αντικείμενα, και εξαρτώνται από το σχήμα και τη δομή του στόχου. Κάποια από τα βασικά φαινόμενα είναι τα εξής:

1. Specular Reflection. Συμβαίνει όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσκρούει σε μια λεία επίπεδη επιφάνεια και ανακλάται προς μια προβλέψιμη κατεύθυνση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία επιφανειακών ρευμάτων, τα οποία παράγουν ηλεκτρομαγνητικά πεδία προς την αντίθετη κατεύθυνση, επιστρέφοντας μέρος της ενέργειας πίσω στο ραντάρ.



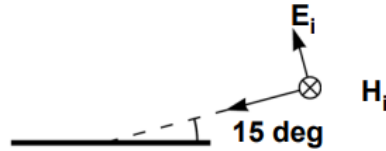
Εικόνα 36: Ανάκλαση σήματος σε μια λεία επιφάνεια.

2. Leading Edge Diffraction. Συμβαίνει όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαθλάται και ανακλάται προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση όταν συναντά την άκρη ενός αντικειμένου. Το κύμα κάμπτεται γύρω από την άκρη του αντικειμένου, προκαλώντας τη διασπορά του προς διάφορες κατευθύνσεις.



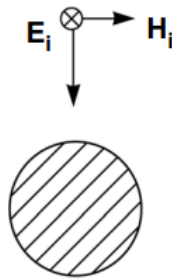
Εικόνα 37: Κάμψη σήματος γύρω από την άκρη ενός αντικειμένου.

3. Trailing Edge Diffraction. Συμβαίνει όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσκρούει στο πίσω μέρος ενός αντικειμένου. Ένα μέρος του κύματος διαθλάται και ανακλάται, ενώ ένα άλλο μέρος του διασκορπίζεται περιφερειακά.



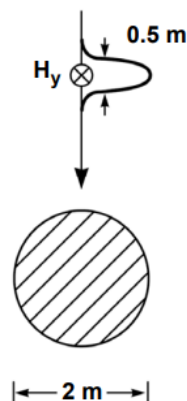
Εικόνα 38: Εξάπλωση κύματος λόγω πρόσκρουσης κύματος στο πίσω μέρος του αντικειμένου.

4. Specular Reflection on a Cylinder. Συμβαίνει όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσκρούει σε ένα κυλινδρικό αντικείμενο. Ο τρόπος είναι παρόμοιος με την περίπτωση της Specular Reflection, με την διαφορά ότι επειδή η επιφάνεια είναι κυρτή, το κύμα διαχέεται σε μεγαλύτερη περιοχή, μειώνοντας την ένταση του σήματος που επιστρέφει στο ραντάρ.



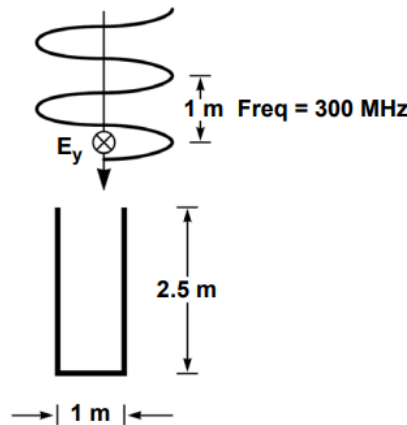
Εικόνα 39: Ανάκλαση κύματος σε κυλινδρική επιφάνεια.

5. Creeping Wave Effect. Συμβαίνει όταν μεταβάλλεται η πόλωση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος καθώς αλληλεπιδρά με ένα κυλινδρικό ή στρογγυλεμένο αντικείμενο. Το κύμα ταξιδεύει περιμετρικά του αντικειμένου, δημιουργώντας επιφανειακά ρεύματα και αυτά με την σειρά τους δημιουργούν δευτερογενείς ανακλάσεις, οι οποίες επηρεάζουν το RCS.



Εικόνα 40: Φαινόμενο διάδοσης κύματος γύρω από κυλινδρική επιφάνεια.

6. Scattering by a Cavity. Συμβαίνει όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα εισέρχεται σε μια κοιλότητα ή κλειστή περιοχή και παγιδεύεται στο εσωτερικό τους λόγω των φαινομένων συντονισμού. Έτσι δημιουργείται ένα στάσιμο κύμα, καθώς ανακλάται πολλαπλές φορές μέσα στην περιοχή αυτή. Το σήμα που θα βγει από την περιοχή αυτή, θα επηρεάσει το συνολικό RCS του αντικειμένου.



Εικόνα 41: Σκέδαση κύματος από κοιλότητα.

3.6.6 Προσδιορισμός RCS

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι που μπορούν να ακολουθηθούν για την εκτίμηση της ανιχνευσιμότητας των στόχων. Δύο βασικές είναι οι φυσικές μετρήσεις και προγνωστική μοντελοποίηση.

1. Μετρήσεις πλήρους κλίμακας. Οι μετρήσεις πλήρους κλίμακας συμβαίνουν πάνω σε πραγματικά αντικείμενα σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα. Ο στόχος, για να πραγματοποιηθούν αυτές οι μετρήσεις, θα πρέπει να είναι τοποθετημένος σε κατασκευές που είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να ελαχιστοποιούν τις παρεμβολές. Ένα παράδειγμα είναι ο στόχος να είναι τοποθετημένος σε στήλη από αφρώδες υλικό. Το υλικό αυτό έχει χαμηλή ανακλαστικότητα με αποτέλεσμα την μείωση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (clutter). Σε περιπτώσεις που ο στόχος είναι μεγαλύτερος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεταλλικός πυλώνας. Ωστόσο, ο πυλώνας μπορεί να αντανακλά τα κύματα ραντάρ. Αν σχεδιαστεί προσεκτικά το σύστημα, τότε αυτή η παρεμβολή μπορεί να αφαιρεθεί απ' τις μετρήσεις διασφαλίζοντας την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

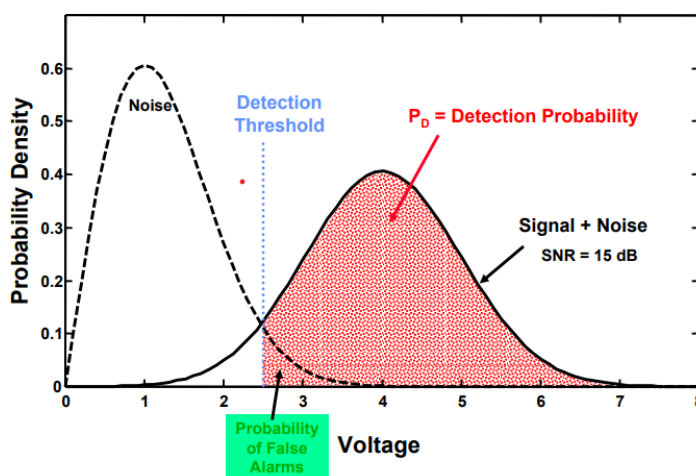
2. Scaled Model Measurements. Οι μετρήσεις σε μοντέλα μειωμένης κλίμακας προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία για μεγάλα αντικείμενα που οι μετρήσεις είναι ανέφικτες με το προηγούμενο μοντέλο. Ρυθμίζοντας το μήκος κύματος του ραντάρ και δημιουργώντας μικρότερα κομμάτια του στόχου, μπορεί το RCS να αναπαράγει καλύτερα αποτελέσματα.

3. Ηλεκτρομαγνητική σκέδαση. Η κατανόηση του RCS βασίζεται στις αρχές της ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης που περιγράφονται από τις εξισώσεις του Maxwell. Όταν τα κύματα ραντάρ προσκρούουν σε έναν στόχο, προκαλούν επιφανειακά ρεύματα που μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου, δημιουργώντας δευτερεύοντα κύματα. Αυτή η σκεδαζόμενη ενέργεια είναι αυτό που ανιχνεύεται από το ραντάρ και καθορίζει το RCS.

4. Εκτίμηση RCS. Εκτός από τις φυσικές μετρήσεις, η εκτίμηση του RCS μπορεί να γίνει με την χρήση υπολογιστικών μοντέλων που προσομοιώνουν τις ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σημάτων ραντάρ και του στόχου. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στο σχήμα του στόχου, τις υλικές ιδιότητες του και το μήκος κύματος του ραντάρ.

3.7 Ανίχνευση στόχων ραντάρ

Η διαδικασία ανίχνευσης στόχων από το ραντάρ βασίζεται στον επιτυχή διαχωρισμό των σημάτων από το θόρυβο του περιβάλλοντος. Για να ανιχνεύουμε τους στόχους, ορίζουμε ένα κατώφλι πάνω από το επίπεδο θορύβου. Σε ορισμένες περιοχές (range gates), δεν ανιχνεύεται λανθασμένα θόρυβος λόγω του ότι το κατώφλι είναι υψηλότερο από τα επίπεδα θορύβου. Ωστόσο, καθώς το ραντάρ σαρώνει διαφορετικά range gates, μπορεί να συναντήσουμε διαφορετικούς στόχους με ασθενέστερο ανακλώμενο σήμα, το οποίο θα μπορούσε να πέσει κάτω από το κατώφλι, οδηγώντας σε χαμένες ανιχνεύσεις.



Εικόνα 42: Πιθανότητα ανίχνευσης στόχου. Η σχέση μεταξύ στάθμης σήματος, κατωφλίου ανίχνευσης και πιθανότητας ψευδούς συναγερμού.

3.7.1 Διακύμανση και ανίχνευση στόχων

Το ραντάρ δειγματοληπτεί τις επιστροφές σε τακτά χρονικά διαστήματα χρησιμοποιώντας έναν αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα (ADC). Όταν δεν υπάρχουν στόχοι, οι επιστροφές θα αποτελούνται μόνο από θόρυβο. Ωστόσο, όταν υπάρχουν στόχοι, οι επιστροφές μπορεί να περιλαμβάνουν τόσο ανακλάσεις από στόχους όσο και θόρυβο. Το κατώφλι παραμένει σταθερό, ενώ το επίπεδο θορύβου αυξομειώνεται, επηρεάζοντας την αξιοπιστία της ανίχνευσης.

Οι διακυμάνσεις στο επίπεδο θορύβου χαρακτηρίζονται από μια κατανομή πιθανοτήτων. Η καμπύλη πυκνότητας θορύβου σε σχέση με το κατώφλι καθορίζει την πιθανότητα ψευδών συναγερμών. Ένα υψηλό κατώφλι ελαχιστοποιεί τους ψευδείς συναγερμούς, ενώ ένα χαμηλό κατώφλι αυξάνει τον κίνδυνο ψευδών ανιχνεύσεων. Η παρουσία τόσο του σήματος όσο και του θορύβου εισάγει μια νέα κατανομή πιθανοτήτων με μεγαλύτερη μέση τιμή ή/και διασπορά, όπου ένας υψηλότερος σηματοθορυβικός λόγος (SNR) αυξάνει την πιθανότητα ανίχνευσης, ενώ μειώνει την πιθανότητα ψευδών συναγερμών και το αντίστροφο.

3.7.2 Βελτίωση ανίχνευσης

Η ενσωμάτωση παλμών ραντάρ βελτιώνει την ικανότητα επιτυχημένων ανιχνεύσεων στόχων συνδυάζοντας τα ανακλώμενα σήματα από διαφορετικούς παλμούς. Αυτό μπορεί να συμβεί με δύο διαφορετικούς τρόπους.

- Με την **Συνεκτική Ολοκλήρωση (Coherent Integration)**, υπολογίζεται ο μέσος όρος των σημάτων, διατηρώντας πληροφορίες πλάτους και φάσης.
- Με την **Μη Συνεκτική Ολοκλήρωση (Noncoherent Integration)**, πρώτα προσδιορίζεται η ισχύς και στη συνέχεια υπολογίζεται ο μέσος όρος, οδηγώντας σε απώλεια πληροφορίας φάσης, επειδή παίρνουμε απλώς το μέγεθος του σήματος, με αποτέλεσμα την μείωση αποδοτικότητας.

3.7.3 Μοντέλα διακύμανσης στόχου (Swirling Models)

Η διακύμανση στόχου αναφέρεται σε αλλαγές στο ανακλώμενο σήμα που λαμβάνονται από έναν στόχο λόγω αλλαγών στο σχήμα, τη γωνία ή τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του στόχου. Τα μοντέλα Swirling κατηγοριοποιούνται σε τέσσερις τύπους με βάση τα χαρακτηριστικά των διακυμάνσεων που παρατηρούνται στα σήματα αυτά.

1. Τα μοντέλα **Swirling 1 & 2**: υποθέτουν πολλούς σκεδαστές παρόμοιου μεγέθους, με αποτέλεσμα μια εκθετική κατανομή της ανακλαστικότητας (μέσω του RCS) του στόχου.
2. Τα μοντέλα **Swirling 3 & 4**: υποθέτουν ότι ο στόχος έχει έναν μόνο κυρίαρχο σκεδαστή που είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τους άλλους, οδηγώντας σε μια διακριτή κατανομή πιθανότητας.

Οι στόχοι με μικρότερη διακύμανση μπορούν να εντοπιστούν με χαμηλότερο SNR, ενώ εκείνοι με μεγαλύτερη διακύμανση απαιτούν υψηλότερο SNR για να έχουν την ίδια πιθανότητα ανίχνευσης.

3.7.3 Constant False Alarm Rate (CFAR)

Η μέθοδος Constant False Alarm Rate (CFAR) βοηθά στον καθορισμό του κατωφλίου ισχύος και για τον διαχωρισμό των πραγματικών στόχων από τους ψευδείς συναγερμούς. Εάν το κατώφλι είναι πολύ χαμηλό, ανιχνεύονται περισσότεροι στόχοι. Ωστόσο, θα οδηγήσει επίσης σε περισσότερους ψευδείς συναγερμούς. Εάν το κατώφλι είναι πολύ υψηλό, ο αριθμός των ψευδών συναγερμών θα μειωθεί, αλλά θα ανιχνευθούν λιγότεροι στόχοι.

Στους περισσότερους ανιχνευτές ραντάρ, το κατώφλι ρυθμίζεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μια σταθερή πιθανότητα ψευδούς συναγερμού γνωστό ως CFAR. Στα περισσότερα συστήματα ανίχνευσης CFAR, το επίπεδο κατωφλίου υπολογίζεται με την εκτίμηση του κατώτατου επιπέδου θορύβου σε μία κυψέλη δοκιμής (CUT) και τίθεται ένα κατώτατο όριο μεγαλύτερο από το εκτιμώμενο επίπεδο θορύβου. Οι κυψέλες φύλαξης συνήθως αποκλείονται από αυτή την εκτίμηση για να αποφευχθεί η αλλοίωση αυτής της εκτίμησης και διασφαλιστεί η ακρίβεια. Ένας στόχος δηλώνεται παρών στο CUT εάν είναι μεγαλύτερος από το τοπικό μέσο επίπεδο ισχύος.

3.8 Pulse compression

Η συμπίεση παλμών είναι μια πολύ σημαντική τεχνική στα συστήματα ραντάρ, καθώς ενισχύει την αποτελεσματική ανίχνευση στόχων, που εξαρτάται σημαντικά από τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR). Για να υπάρξει ακριβής ανίχνευση, θα πρέπει ο λόγος να διατηρείται υψηλός. Επίσης, η εμβέλεια ανίχνευσης στόχων είναι αντιστρόφως ανάλογη του εύρους ζώνης του κύματος. Όσο υψηλότερο είναι το εύρος ζώνης, τόσο μικρότερη είναι η εμβέλεια ανίχνευσης. Ωστόσο, ενώ ένα ραντάρ συνεχούς κύματος (CW) προσφέρει καλή μέση ισχύ και ανάλυση, ενώ από την άλλη είναι δύσκολο να επιτευχθούν και τα δύο χρησιμοποιώντας ένα παλμικό ραντάρ. Η υψηλότερη μέση ισχύς συσχετίζεται αρνητικά με το εύρος ζώνης ή είναι ανάλογη του πλάτους παλμού. Έτσι, ένα ευρύτερο πλάτος παλμού προκύπτει από υψηλότερη μέση ισχύ. Από την άλλη πλευρά, η σχέση μεταξύ πλάτους παλμού και ανάλυσης στον χώρο είναι αντίστροφη. Η ανάλυση και το εύρος ανίχνευσης μειώνονται όσο αυξάνεται η μέση ισχύς.

Για να επιτευχθεί ο συνδυασμός υψηλής ισχύος και ανάλυσης, έχουν δημιουργηθεί τεχνικές συμπίεσης παλμού. Ένας μακρύς παλμός με το ίδιο εύρος ζώνης ή την ίδια ανάλυση με έναν σύντομο παλμό μπορεί να παραχθεί με τροποποίηση της συχνότητας ή της φάσης του παλμού κατά μήκος της διάρκειάς του. Εντός του πλάτους του παλμού, η γραμμική διαμόρφωση συχνότητας αλλάζει τη συχνότητα από χαμηλή σε υψηλή. Η φάση του παλμού μεταβάλλεται με τη χρήση δυαδικής κωδικοποίησης φάσης, που μερικές φορές αναφέρεται ως συμπίεση παλμού. Με τη χρήση αυτών των μεθόδων, το ραντάρ είναι σε θέση να συνδυάσει ταυτόχρονα την ενέργεια ενός μεγάλου παλμού και την ανάλυση ενός μικρού παλμού.

3.8.1 Τεχνικές βελτιστοποίησης ανίχνευσης στόχων

Για τη βελτίωση του σηματοθορυβικού λόγου του λαμβανόμενου σήματος, τα συστήματα ραντάρ χρησιμοποιούν προσαρμοσμένα φίλτρα ως τεχνική φιλτραρίσματος. Η τεχνική αυτή συμπεριλαμβάνει το φιλτράρισμα του σήματος που παράγεται από τον μεταδιδόμενο παλμό στο δέκτη. Το προσαρμοσμένο φίλτρο σχεδιάζεται για να ταιριάζει με τις φασματικές ιδιότητες του μεταδιδόμενου παλμού, όπως ένας ορθογώνιος παλμός, μεγιστοποιώντας την ανίχνευση του σήματος στόχου και ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις παρεμβολές θορύβου. Ο ορθογώνιος παλμός εμφανίζεται με μια συγκεκριμένη μορφή στο πεδίο του χρόνου και με μια αντίστοιχη κατανομή ενέργειας σε διάφορες συχνότητες, η οποία ονομάζεται φάσμα ισχύος. Η απόκριση συχνότητας του φίλτρου θα πρέπει να ταιριάζει με το σήμα του παλμού διότι αν το φίλτρο είναι πιο φαρδύ από το φάσμα του παλμού τότε το SNR μειώνεται, ενώ αν είναι πιο στενό τότε μπορεί να μην καταφέρει να αναγνωρίσει κάποιες συχνότητές του.

Για να αυξηθεί η απόδοση ανίχνευσης και το σήμα να μην εμπεριέχει μεγάλα ποσοστά θορύβου, θα πρέπει να βελτιστοποιηθεί η απόκριση του φίλτρου. Υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους μπορεί να γίνει συμπίεση παλμών και είναι οι εξής:

1. Κωδικοποίηση φάσης (Binary Phase Coding). Αυτή η μέθοδος μεταβάλλει την φάση του παλμού και έτσι βελτιώνει την ανάλυση και διαχειρίζεται αποτελεσματικά τις παρεμβολές.

2. Γραμμική διαμόρφωση συχνότητας (Linear Frequency Modulation). Αυτή η μέθοδος διαμορφώνει την συχνότητα του παλμού γραμμικά κατά την διάρκειά του. Με αυτόν τον τρόπο, σε έναν πιο μακρύ παλμό μπορεί να επιτευχθεί ανάλυση παρόμοια με αυτή ενός πιο σύντομου παλμού, δίνοντας την δυνατότητα να διατηρείται η ενέργεια ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται καλύτερη ανάλυση.

Μετά την διαδικασία συμπίεσης παλμού, ο παλμός που βγαίνει από το φίλτρο μπορεί να αποκαλύψει τη θέση του στόχου ενισχύοντας την ακρίβεια της ανίχνευσης. Η κυματομορφή συμπίεσης παλμού (PC) επιτρέπει στο ραντάρ να λειτουργεί ως τερματικό επικοινωνίας που στέλνει και λαμβάνει σύντομα μηνύματα. Επίσης, η κωδικοποίηση φάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση της παρεμβολής ραδιοσυχνοτήτων (RFI) μεταξύ γειτονικών ραντάρ, αυξάνοντας την αποδοτικότητα του συστήματος.

3.9 Τύπος Κεραίας: Uniform Linear Array (ULA)

Η Uniform Linear Array (ULA) είναι η πιο διαδεδομένη διάταξη κεραίας. Αυτό συμβαίνει καθώς η υλοποίηση και η ανάλυσή της είναι πιο απλή από άλλου είδους κεραίες. Σε μια ULA, όλα τα στοιχεία τοποθετούνται σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους και κατά μήκος μια ευθείας γραμμής. Επίσης, χρησιμοποιείται για χρήση τεχνικών εκτίμησης διεύθυνσης άφιξης (DOA – Direction Of Arrival), που εντοπίζουν την γωνιακή θέση των στόχων. Με την χρήση διάφορων τεχνικών μπορούν να υποστηρίξουν υψηλή ακρίβεια, beamforming αλλά και spatial filtering, επιτρέποντας υψηλή ακρίβεια και στον υπολογισμό της διεύθυνσης άφιξης του σήματος. Ωστόσο, παρά τα θετικά της, έχει περιορισμό όσων αφορά την κάλυψή της σε συγκεκριμένες γωνίες. Αυτό οδηγεί στην εμφάνιση φαινομένων όπως grating lobes (πλευρικούς λοβούς), εμφάνιση σημάτων από άλλες κατευθύνσεις, στις περιπτώσεις που τα στοιχεία της κεραίας είναι αραιά τοποθετημένα. Το αποτέλεσμα του φαινομένου αυτού είναι η εμφάνιση παρεμβολών και θορύβου καθιστώντας δύσκολη την ανίχνευση των στόχων. Σε σύγκριση με άλλους τύπους κεραίας:

Τύπος Κεραίας	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
ULA	Εύκολη υλοποίηση και σχεδιασμός, συγκεκριμένη διάταξη.	Περιορισμένη κάλυψη και εμφάνιση grating lobes.
Circular	Κάλυψη 360° στον οριζόντιο άξονα.	Υψηλή πολυπλοκότητα.
Planar	Εκτίμηση θέσης στις δύο διαστάσεις (2D DOA).	Απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός κεραιών και επεξεργασία.
Phased	Έλεγχος κατεύθυνσης και ακριβής υπολογισμός διεύθυνσης άφιξης (DOA).	Υψηλό κόστος και πολυπλοκότητα.

Πίνακας 1. Σύγκριση τύπων κεραιών.

Κεφάλαιο 4. Μοντελοποίηση και Χαρακτηριστικά Καναλιών σε Συστήματα JCAS

Σε αυτό το σημείο θα αναλυθεί η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των σημάτων ασύρματων επικοινωνιών σε ένα κανάλι επικοινωνίας σε ψηφιακή, δειγματοληφθείσα μορφή στην διάρκεια του χρόνου και της συχνότητας. [1]

4.1 Κρουστική απόκριση καναλιού

Η κρουστική απόκριση του καναλιού (CIR) αποτυπώνει την συμπεριφορά του καναλιού με την πάροδο του χρόνου μέχρι να φτάσει στον δέκτη. Για την δειγματοληψία της CIR χρησιμοποιούμε μια διακριτή χρονική αναπαράσταση:

$$H[m, l] = h(mT_r, lT_r)$$

Όπου:

T_r = χρόνος δειγματοληψίας

m = δείκτης διακριτού χρόνου

l = διακριτή καθυστέρηση

Η CIR λειτουργεί σαν φίλτρο πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (Finite Impulse Response - FIR) με μέγιστο αριθμό συντελεστών και καθυστερήσεων καναλιού ίσο με:

$$L = \lceil \tau_{\max}/T_r \rceil$$

Όπου:

$\tau_{\max}$ = μέγιστη καθυστέρηση που εισάγει το κανάλι.

Το λαμβανόμενο σήμα $y[m]$ μπορεί να εκφραστεί ως συνέλιξη του μεταδιδόμενου σήματος $x[m]$ και του διακριτού CIR $h[m, l]$:

$$y[m] = \sum_{l=1}^L h[m, l]x[m - l] + w[m]$$

Όπου:

$w[m]$ = θόρυβος.

Αυτό το είδος μοντέλου καναλιού βοηθάει στην προσομοίωση του φαινομένου πολυδιαδρομικής διάδοσης και καθιστούν ικανή την πρόβλεψη του σήματος που φτάνει στον δέκτη από πολλές κατευθύνσεις και διαφορετικούς πομπούς. Επίσης, δίνουν την δυνατότητα ανίχνευσης των παρεμβολών που συμβαίνουν από άλλα κανάλια και μπορούν να προτείνουν καλύτερη διάταξη των στοιχείων ενός συστήματος επικοινωνίας για να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος.

4.2 Διακριτή συνάρτηση μεταφοράς - Channel Transfer Function

Με την συνάρτηση μεταφοράς καναλιού (CTF) μπορούμε να αναλύσουμε το σήμα στο πεδίο της συχνότητας χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$H[m, q] = H(mT_r, \frac{q}{QT_r})$$

Όπου:

$q \in \{1, \dots, Q\}$ = δείκτης διακριτής συχνότητας

Q = αριθμός υποφορέων/subcarriers για ισοδύναμο OFDM σύστημα.

m = δείκτης διακριτού χρόνου

Με αυτό τον τρόπο βλέπουμε μέσα από τις καθυστερήσεις που υπάρχουν στο κανάλι και τις παραμορφώσεις που δέχεται το σήμα, πως επηρεάζονται οι διάφορες συχνότητες του σήματος. Πιο συγκεκριμένα, η εκτίμηση της CTF βοηθάει να γίνεται σωστή ευθυγράμμιση χρόνου και συχνότητας, το οποίο είναι απαραίτητο για την σωστή λειτουργία του συστήματος. Επίσης συμβάλει, σε συνδυασμό με το κυκλικό πρόθεμα, στην μείωση των παρεμβολών που συμβαίνουν μεταξύ των φορέων και των συμβόλων (ICI και ISI) καθώς και στην αποκατάσταση των μεταδιδόμενων δεδομένων.

4.3 Καθυστερήσεις και μετατοπίσεις Doppler

Για την παρακολούθηση του τρόπου με τον οποίο το σήμα μεταβάλλεται λόγω των μετατοπίσεων Doppler και των καθυστερήσεων, χρησιμοποιείται η συνάρτηση σκέδασης χρησιμοποιώντας τον διακριτό μετασχηματισμό Fourier (DFT):

$$S[p, l] = \sum_{m=1}^M h[m, l] e^{-j2\pi \frac{m}{M} p}$$

Κατά την μοντελοποίηση, οι σχετικές ταχύτητες πομπού και δέκτη θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές και στην συνέχεια με βάση αυτές υπολογίζεται και η σχετική ταχύτητα μεταξύ τους. Αυτή με την σειρά της χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μετατόπισης Doppler, δηλαδή την αλλαγή της συχνότητας του σήματος λόγω της κίνησης του πομπού και του δέκτη. Η μετατόπιση Doppler υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\text{μετατόπιση Doppler} = \frac{\text{σχετική ταχύτητα}}{\lambda} \cos(\text{σχετική γωνία})$$

Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνεται υπόψη στο τελικό σήμα η διαφορά στην φάση και την συχνότητα που μπορεί να υπάρξει λόγω της σχετικής κίνησης του πομπού με τον δέκτη, καθώς και η μεταβλητότητα του διαύλου.

4.4 Steering Vector

Χρησιμοποιούμε steering vectors για να εισάγουμε τις γωνίες διάδοσης του σήματος ως προς τους στόχους και τον δέκτη σε σχέση με τις κεραίες εκπομπής και λήψης. Για τον υπολογισμό της συνολικής απόκρισης καναλιού, χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$H(t, \text{delaybin}) = \text{steervec}_{rx}^H * \Sigma * \text{steervec}_{tx}$$

Όπου:

Σ = διαγώνιος που περιέχει τους συντελεστές κέρδους των σκεδαστών που συμμετέχουν στο κανάλι.

Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνουμε υπόψη τη χωρική διάσταση της διάδοσης του σήματος.

4.5 Μοντέλα Καναλιών

Για να μπορέσει ο τομέας των ασύρματων επικοινωνιών να βελτιωθεί, είναι πολύ σημαντική η συλλογή δεδομένων σε πραγματικά περιβάλλοντα. Ωστόσο, λόγω διάφορων παραγόντων όπως κινούμενα αντικείμενα, παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων ή μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες, οι μετρήσεις μεταξύ τους διαφέρουν.

Έτσι, δημιουργήθηκαν τα εμπειρικά μοντέλα καναλιών που είναι υπεύθυνα για τον έλεγχο της απόδοσης των επικοινωνιών αυτών. Οι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι (1) η ακριβής αναπαραγωγή του περιβάλλοντος διάδοσης και τα χαρακτηριστικά του, καθώς μπορούν να επηρεάσουν διαφορετικά τη διάδοση του σήματος, (2) η μοντελοποίηση της γεωμετρίας του περιβάλλοντος, καθώς στην απόσταση που διανύει το σήμα κατά την διάδοσή του, θα υπάρξουν διάφορα εμπόδια κάνοντάς το να διαμορφωθεί ανάλογα, (3) η πολυδιαδρομική διάδοση και (4) ο τρόπος που έχει σχεδιαστεί μια κεραία με όλες τις παραμέτρους και τα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που επηρεάζουν την απόδοση του σήματος. Τα μοντέλα αυτά, θα μπορέσουν να έχουν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα μόνο αν χρησιμοποιήσουν πολύ συγκεκριμένες παραμέτρους. Ωστόσο, έτσι αυξάνεται και η πολυπλοκότητά τους και στην συνέχεια το κόστος ανάπτυξης των νέων συστημάτων.

Ο τρόπος με τον οποίο διαδίδεται το σήμα καθώς περνάει μέσω από το περιβάλλον μπορεί να περιγράφει με μαθηματικούς όρους μέσω της συνάρτησης μεταφοράς του καναλιού. Το πως αλλάζει το κανάλι και το σήμα καθορίζεται από κάποιους συντελεστές και υπολογίζεται μέσω των μετρήσεων που αναφερθήκαμε παραπάνω αλλά και μέσω τεχνικών εκτίμησης καναλιού. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τους μαθηματικούς υπολογισμούς που κάναμε, ελέγχουμε αν οι υπολογισμοί συμφωνούν με την πραγματικότητα και το θεωρητικό μας μοντέλο λειτουργεί.

Υπάρχουν δύο μοντέλα καναλιών, τα φυσικά και τα αναλυτικά. Τα φυσικά περιγράφουν το περιβάλλον μέσα στο οποίο διαδίδονται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και εξαρτώνται από φυσικές παραμέτρους όπως τα πλάτη του σήματος, οι γωνίες αναχώρησης (AoDs) και άφιξης (AoAs), οι καθυστερήσεις και οι ιδιότητες πόλωσης. Τα φυσικά μοντέλα χωρίζονται σε δύο είδη, τα ντετερμινιστικά μοντέλα και τα στοχαστικά με βάση τη γεωμετρία (GSCM). Τα ντετερμινιστικά, είναι λιγότερο ευέλικτα καθώς έχουν σχεδιαστεί για συγκεκριμένα περιβάλλοντα με τα φυσικά χαρακτηριστικά τους και λαμβάνουν υπόψη τις θέσεις των αντικειμένων στο περιβάλλον για να υπολογίσουν πώς διαδίδεται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Για κάθε τέτοιο περιβάλλον σχεδιάζονται ξανά εκ νέου, ενώ δυσκολεύονται να προσαρμοστούν σε αστικές ή βιομηχανικές περιοχές αφού η γεωμετρία τους αλλάζει συνεχώς και το περιβάλλον είναι εξαιρετικά πολύπλοκο. Όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητά τους, τόσο ακριβείς κρουστικές αποκρίσεις CIRs μπορούν να παράγουν. Τα GSCM είναι πιο αποτελεσματικά σε σενάρια πολύπλοκων περιβαλλόντων, υψηλής κινητικότητας και είναι βασισμένα σε γεωμετρικές και στατιστικές πληροφορίες για πιο ακριβή αναπαράσταση της διάδοσης του σήματος. Έχουν σχεδιαστεί με λογική

(σχετικά χαμηλή) πολυπλοκότητα και επιτυγχάνουν υψηλή ακρίβεια (σε στοχαστικό επίπεδο), χωρίς ακριβή γνώση της θέσης των αντικειμένων, καθιστώντας τα αξιόπιστα.

Από την άλλη μεριά, τα αναλυτικά μοντέλα βασίζονται σε μαθηματικές περιγραφές της κρουστικής απόκρισης του καναλιού (CIR) μεταξύ πομπού και δέκτη, χρησιμοποιώντας στατιστικά δεδομένα, όπως η RMS εξάπλωση καθυστέρησης, η εξάπλωση Doppler ή τα φάσματα ισχύος. Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται τα correlation-based μοντέλα τα οποία είναι απλούστερα από τα υπόλοιπα καθώς δεν χρειάζεται να γνωρίζουμε το ακριβές φυσικό περιβάλλον και περιγράφουν τα ασύρματα κανάλια χρησιμοποιώντας πιο απλές προσεγγίσεις. Ωστόσο, εφόσον δεν περιγράφουν πλήρως την διαδικασία διάδοσης, μπορεί να προκύψουν προβλήματα ακρίβειας. Έτσι είναι κατάλληλα σε περιπτώσεις που το περιβάλλον διάδοσης είναι απλό και χρειάζονται μόνο γενικές περιγραφές του. Κατά συνέπεια δεν είναι κατάλληλα για εφαρμογής Joint Communications and Sensing.

Για να μειωθεί η πολυπλοκότητα και να απλοποιηθεί η μοντελοποίηση του καναλιού διάδοσης, αντί να χρησιμοποιούνται πολύπλοκα αντικείμενα σκέδασης, αντικαθίσταται από σημειακούς scatterers. Αυτοί αποτελούν σημεία που ανακλούν τα ραδιοκύματα. Στα ντετερμινιστικά μοντέλα, οι scatterers έχουν οριστεί από την αρχή, ενώ στα στοχαστικά μοντέλα, τοποθετούνται με βάση μια τυχαία κατανομή. Στο GSCM μοντέλο, που θα επικεντρωθούμε περισσότερο, εξετάζονται μόνο ανακλάσεις πρώτης τάξης, δηλαδή το σήμα ανακλάται μόνο μία φορά πριν φτάσει στον δέκτη και έτσι αποφεύγονται οι μετρήσεις από τις πολλαπλές ανακλάσεις διευκολύνοντας τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων. Επίσης, θεωρούμε τις επιφάνειες λείες και ομοιόμορφες για τον ίδιο λόγο και έτσι το τελικό σήμα στον δέκτη είναι μόνο το άθροισμα των ανακλάσεων αυτών. Τέλος, το μοντέλο αυτό επιτρέπει την μοντελοποίηση διαφορετικών ειδών κεραίες, κάτι που αποτελεί σημαντικό παράγοντα στα συστήματα MIMO.

Η κρουστική απόκριση του καναλιού (CIR) μπορεί να υπολογιστεί με την εξίσωση:

$$h[m, l] \approx \sum_{l=1}^L n_l e^{-j2\pi v l m} gRC(lT_R - \tau_l)$$

Όπου:

$gRC(lT_R - \tau_l)$ = φίλτρο πομπού που μορφοποιεί το σήμα

n_l = αντιπροσωπεύει την εξασθένηση του σήματος στη διαδρομή l

T_R = χρόνος δειγματοληψίας

Η συνάρτηση μεταφοράς του καναλιού είναι:

$$h[m, q] = \sum_{l=1}^L n_l e^{-j2\pi v l m} e^{-j2\pi \tau_l q}$$

Η συνάρτηση αυτή αναπαριστά τις μεταβολές της συχνότητας λόγω των μετατοπίσεων Doppler και της καθυστέρησης που προκαλούν οι scatterers, αν υποθέσουμε ότι η μοντελοποίηση γίνεται για ένα μικτό χρονικό διάστημα όπου ο δέκτης κινείται με σταθερή

ταχύτητα η οποία αλλάζει γραμμικά την καθυστέρηση του σήματος και προκαλεί σταθερή αλλαγή στη συχνότητα Doppler.

4.6 Μοντελοποίηση Καναλιού

Στην παρούσα ενότητα, περιγράφεται μια προσομοίωση ενός μοντέλου καναλιού, το οποίο στην συνέχεια αναπτύχθηκε σε MATLAB, που αφορά την διάδοση των σημάτων σε ένα περιβάλλον με τυχαία τοποθετημένους scatterers. Για την αναπαράσταση της συμπεριφοράς του καναλιού, λαμβάνονται υπόψη οι θέσεις και οι ταχύτητες πομπού και δέκτη και περιλαμβάνει την διαδικασία διαμόρφωσης του περιβάλλοντος και την τοποθέτηση και την παραμετροποίηση των scatterers. Το μοντέλο καναλιού αυτό βασίζεται στην στοχαστική μοντελοποίηση με βάση την γεωμετρία (GSCM) καθώς η τοποθέτηση των scatterers γίνεται έτσι ώστε να δημιουργείται ένα τυχαία γεωμετρικό περιβάλλον διάδοσης.

1. Βασική ρύθμιση του περιβάλλοντος επικοινωνίας

Ορίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος, όπως η θέση, η κατεύθυνση και η ταχύτητα κίνησης του πομπού και του δέκτη, καθώς και η συχνότητα και το μήκος κύματος. Η θέση του πομπού αρχικά είναι το σημείο (0,0) και για την ενσωμάτωση του φαινομένου Doppler, παράγονται τυχαίες θέσεις για τις ταχύτητες και τις γωνίες κίνησης.

```
%% Initializations
freq = 28e9;
slot_dur = 0.125e-3;
num_scatterers = 10;
num_subcarriers = 3360;
num_slots = 240;
BW = 120e3 * num_subcarriers;
num_elements_tx = 1;
num_elements_rx = 4;

SNRdB = 23;
SNRmargin = 7;
SNR = 10^(SNRdB/10);

% Calculate wavelength
c = 3 * (10^8);
lambda = c/freq;

% Random placement of Rx within distance <= 200 from Tx - Tx is assumed at (0,0)
while 1
    x = 10 + rand(1,1) * 100;
    y = 10 + rand(1,1) * 100;
    d = sqrt(x^2 + y^2);
    if (d <= 200)
        break;
    end
end
```

Εικόνα 43: Ρύθμιση περιβάλλοντος επικοινωνίας.

2. Τοποθέτηση σκεδαστών

Η τοποθέτηση των σκεδαστών γίνεται τυχαία μέσα σε μια συγκεκριμένη περιοχή γύρω από τον πομπό και τον δέκτη, προσομοιώνοντας με αυτόν τον τρόπο ένα πιο ρεαλιστικό περιβάλλον διάδοσης. Υπολογίζονται με τον τρόπο αυτό οι καθυστερήσεις και η εξασθένιση του σήματος. Οι αποστάσεις από το κανάλι υπολογίζονται με βάση τις γεωμετρικές θέσεις των πομπού, δέκτη και σκεδαστών, χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$d = \sqrt{x^2 + y^2}$$

```
% Placement of scatterers
x_scat = zeros(num_scatterers,1);
y_scat = zeros(num_scatterers,1);
d_from_origin = zeros(num_scatterers,1);
d_from_destination = zeros(num_scatterers,1);
d_total = zeros(num_scatterers,1);

for kk = 1:num_scatterers
    while 1
        x_scat(kk) = 1 + rand(1,1) * (d-1)-1;
        y_scat(kk) = 1 + rand(1,1) * (d-1)-1;

        d_from_origin(kk) = sqrt(x_scat(kk)^2 + y_scat(kk)^2);
        d_from_destination(kk) = sqrt((abs(x_scat(kk)-x)^2 + abs(y_scat(kk)-y)^2));

        d_sum = d_from_destination(kk) + d_from_origin(kk);

        if (d_from_origin(kk) < d) && ~ismember(d_sum, d_total(1:kk-1)) && ~any(abs(d_total(1:kk-1)-d_sum)<=2)
            d_total(kk) = d_sum;
            break;
        end
    end
end
```

Εικόνα 44: Τοποθέτηση σκεδαστών.

3. Παραμετροποίηση

Αφού τοποθετηθούν οι scatterers, αποδίδονται ιδιότητες διάδοσης και εξασθένισης σε καθέναν απ' αυτούς. Αποκτούν τυχαίες φάσεις και ισχύ «ανάκλασης» ανάλογα την απόστασή τους από τον πομπό και τον δέκτη. Με αυτόν τον τρόπο, αναπαρίσταται η εξασθένιση του καναλιού και οι επιδράσεις που έχει η πολυδιαδρομική διάδοση.

```

% Compute losses for LoS and multipath
P = (lambda / (4 * pi * d)) ^ 2;
P_all = 0.4*(lambda ./ (4 * pi * (d_from_origin + d_from_destination) )).^ 2;

% Phase shifts due to distance
fash = 2*pi/lambda*d; |
fash_all = 2*pi/lambda*(d_from_origin + d_from_destination);

% From path power to complex gain
% Compute square root for gain
a = sqrt(P); %LoS:
a_all = sqrt(P_all); % Multipath:

% Compute channel gain
s = a * exp(1j*fash); %LoS
s_all = a_all .* exp(1j*fash_all); % Multipath

% Add random phase shift to scatterers
fi = 0 + (2 * pi) * rand(num_scatterers, 10);
fi = sum(fi, 2);

% Then add the random phase shift:
s_all = s_all .* exp(1j*fi);

```

Εικόνα 45: Παραμετροποίηση ιδιοτήτων διάδοσης και εξασθένησης.

4. Υπολογισμός Doppler

Ορίζονται οι ταχύτητες για τον πομπό και τον δέκτη και υπολογίζεται η σχετική ταχύτητα και το Doppler Shift. Επίσης, υπολογίζονται οι σχετικές ταχύτητες μεταξύ των κινούμενων σκεδαστών με τον πομπό και με τον δέκτη, καθώς και το αντίστοιχο Doppler Shift για κάθε διαδρομή. Για τον υπολογισμό των μετατοπίσεων Doppler λόγω της κίνησης του πομπού, του δέκτη και των σκεδαστών χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

$$f_D = \frac{u_{rel}}{\lambda} \cos(\theta_{rel})$$

```

%% Compute relative velocity and Doppler shift
u_MaxTR = 0;
u_Max = 70;
u_T = rand(1,1) * u_MaxTR;
u_R = rand(1,1) * u_MaxTR;

% Random movement directions
f_T = 0 + (2 * pi) * rand(1,1);
f_R = 0 + (2 * pi) * rand(1,1);
% Relative direction of Rx-Tx movement
f_relative_TR = f_R - f_T;

% Velocity components in each axis
u_Tx = u_T * cos(f_T);
u_Ty = u_T * sin(f_T);
u_Rx = u_R * cos(f_R);
u_Ry = u_R * sin(f_R);

relative_velocity_x = u_Rx - u_Tx;
relative_velocity_y = u_Ry - u_Ty;
% Relative velocity
relative_velocity = sqrt((relative_velocity_x ^ 2) + (relative_velocity_y ^ 2));

```

```

% Doppler shift due to movement
direct_freq_doppler = (relative_velocity / lambda) * cos(f_relative_TR);

% Scatterer movement
u_scatterers = -u_Max + rand(num_scatterers,1) * 2*u_Max;
u_scatterers = -45:10:50;
f_scatterers = 2*pi*rand(num_scatterers,1);

% Relative movement angles of scatterers
f_relative_Tscat = f_scatterers - f_T;
f_relative_scatR = f_R - f_scatterers;

% Compute relative velocities of scatterers
u_scatterers_x = u_scatterers(kk).*cos(f_scatterers);
u_scatterers_y = u_scatterers(kk).*sin(f_scatterers);
% From transmitter to scatterer
relative_scatterers_Tx = u_scatterers_x - u_Tx;
relative_scatterers_Ty = u_scatterers_y - u_Ty;
% From scatterer to receiver
relative_scatterers_Rx = u_Rx - u_scatterers_x;
relative_scatterers_Ry = u_Ry - u_scatterers_y;

relative_velocity_scatterers_tx = sqrt((relative_scatterers_Tx.^ 2) + (relative_scatterers_Ty.^ 2));
relative_velocity_scatterers_rx = sqrt((relative_scatterers_Rx.^ 2) + (relative_scatterers_Ry.^ 2));

% Compute Doppler shift due to scatterers
fd_iT = (relative_velocity_scatterers_tx / lambda).* cos(f_relative_Tscat);
fd_iR = (relative_velocity_scatterers_rx / lambda).* cos(f_relative_scatR);

```

Εικόνα 46: Υπολογισμός Doppler.

5. Παραμετροποίηση OFDM και τοποθέτηση πιλότων

Εξετάζεται η πραγματοποίηση λειτουργίας joint communications and sensing σε σύστημα OFDM. Για την καλύτερη εκτίμηση του καναλιού, την ανίχνευση των σκεδαστών και την βελτίωση της ποιότητας του λαμβανόμενου σήματος, παράλληλα με τα σύμβολα επικοινωνίας, δημιουργείται πίνακας OFDM και τοποθετούνται πιλότοι σε προκαθορισμένες θέσεις.

```

%% OFDM Parameters
FFT = 4096;
cplen = 240;
Ts = num_subcarriers * 1 / BW;
Tcp = cplen * 1 / BW;
OFDM_symbol_time = Ts + Tcp;
Tb = slot_dur * num_slots;
num_of_sensing_signals = 2 * 240;
num_ofdm_symbols_per_slot = 14;
mod_rank = 16; % Modulation (e.g., 4, 16, 32, 64)
bit_per_symbol = log2(mod_rank);
num_ofdm_symbols = 10;
total_ofdm_symbols = num_ofdm_symbols_per_slot * num_slots;

% Pilot positions
pilot_steps = 7; % Pilot spacing in subcarriers
pilot_positions_subcarriers = 0:pilot_steps:num_subcarriers-1;
pilot_positions_time = [2, 9]; % Pilot positions in time
total_pilots = length(pilot_positions_time)*length(pilot_positions_subcarriers);

% Generate random data
bits_total = num_subcarriers * bit_per_symbol * total_ofdm_symbols;
data = randi([0, 1], 1, bits_total);

% Create an OFDM symbol matrix
symbol_matrix = zeros(num_subcarriers, num_ofdm_symbols_per_slot);

% Assign QPSK symbols to pilot positions
for slot = pilot_positions_time
    symbol_matrix(pilot_positions_subcarriers+1, slot+1) = qammod(randi([0, 3], length(pilot_positions_subcarriers), 1), 4, 'InputType', 'integer');
end

symbol_matrix = repmat(symbol_matrix, 1, num_slots).';

```

```

% Generate pilot grid for symbol placement
pilot_grid = zeros(num_subcarriers, num_slots*num_ofdm_symbols_per_slot);
for ii = 1 : num_slots
    pilot_grid(pilot_positions_subcarriers+1, (ii-1)*num_ofdm_symbols_per_slot + pilot_positions_time+1) = 1;
end
pilot_grid = pilot_grid';

```

Εικόνα 47: Παραμετροποίηση OFDM και τοποθέτηση πιλότων.

6. Δημιουργία του Καναλιού Μετάδοσης

Υπολογίζονται οι γωνίες άφιξης και αναχώρησης. Δημιουργούνται οι στροφές φάσεις λόγω καθυστέρησης των κυμάτων και οι steering vectors, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν δείχνουν πως μεταδίδεται το σήμα στο περιβάλλον διάδοσης σε σχέση με την στοιχειοκεραία του πομπού και του δέκτη. Στην συνέχεια, δημιουργείται το κανάλι, το οποίο λαμβάνει υπόψη την επίδραση των σκεδαστών στο λαμβανόμενο σήμα και όλες τις διαφορετικές διαδρομές που ακολούθησε το σήμα μέχρι να φτάσει στον δέκτη. Υπολογίζεται η κρουστική απόκριση του καναλιού (CIR), η οποία δείχνει πως αλλάζει το κανάλι λόγω διαλείψεων και καθυστερήσεων αλλά και την χρονομεταβλητότητα του λόγω του φαινομένου Doppler.

```

% Compute AoA and AoD
gwnia_T = atan2(y, x);
gwnia_R = pi + gwnia_T;
gwnia_scatter = atan2(y_scatter, x_scatter);
gwnia_scatter_R = atan2(y_scatter-y, x_scatter-x);

% Compute transmit array steering vectors
d_antenna_tx = (0:num_elements_tx-1)*lambda/2;

steervec_los_tx = exp(-1j * (2 * pi * d_antenna_tx / lambda) * cos(gwnia_T));
steervec_scatter_tx = zeros(num_scatterers, num_elements_tx);
for ii = 1 : num_scatterers
    steervec_scatter_tx(ii,:) = exp(-1j * (2 * pi * d_antenna_tx / lambda) * cos(gwnia_scatter(ii)));
end
steervec_tx = [steervec_los_tx; steervec_scatter_tx];

% Compute receive array steering vectors
d_antenna_rx = (0:num_elements_rx-1)*lambda/2;
steervec_los_rx = exp(-1j * (2 * pi * d_antenna_rx / lambda) * cos(gwnia_R));
steervec_scatter_rx = zeros(num_scatterers, num_elements_rx);
for ii = 1 : num_scatterers
    steervec_scatter_rx(ii,:) = exp(1j * (2 * pi * d_antenna_rx / lambda) * cos(gwnia_scatter(ii)- gwnia_R));
end
steervec_rx = [steervec_los_rx; steervec_scatter_rx];

```

```

% Initialize channel matrix H with time and delay bins
H = zeros(num_elements_rx, num_elements_tx, length(time_vector), num_delay_bins);
steervec_rx_H = steervec_rx';
delay = [delay_los; delay];

% Compute the channel response for each time step and delay bin
for tt = 1:size(time_vector,2)
    s_all_t = s_all(:, tt);
    s_combined = [s(tt); s_all_t]; % Combine LoS and scatterer gains
    low = 0;
    high = delay_bin_size;
    for delaybin = 1:num_delay_bins
        ind = (delay>=low) & (delay<high);
        if sum(ind)>0
            Sigma = diag(s_combined(ind));
            H(:, :, tt, delaybin) = steervec_rx_H(:,ind) * Sigma * steervec_tx(ind,:);
        end
        low = high;
        high = high + delay_bin_size;
    end
end
end

```

Εικόνα 48: Δημιουργία του καναλιού μετάδοσης.

7. Προσθήκη διαμόρφωσης και δημιουργία του πομπού

Τα δεδομένα που θα μεταδοθούν διαμορφώνονται χρησιμοποιώντας την τεχνική QAM και μετατρέπονται σε παράλληλες ροές για να μπορέσουν να μεταδοθούν ταυτόχρονα σε πολλούς υποφορείς/subcarriers. Έπειτα, εκτελείται ο IFFT για την δημιουργία OFDM συμβόλων και προστίθεται κυκλικό πρόθεμα CP για την αποφυγή παρεμβολών ICI και ISI. Τέλος, το σήμα μεταδίδεται, ενώ έχει μετατραπεί πάλι σε σειριακές ροές, πολλαπλασιασμένο με το κανάλι H.

```

%% Transmitter Processing
qam = reshape(data, bit_per_symbol, bits_total/bit_per_symbol); % Reshape bits to symbols
mean_qam = mean(abs(qammod(0:mod_rank-1, mod_rank)).^2); % Compute average symbol power
qam = qammod(qam, mod_rank, 'InputType', 'bit'); % Perform QAM modulation

serial_parallel = reshape(qam, num_subcarriers, []).'; % Parallelize data
serial_parallel(symbol_matrix~=0) = sqrt(mean_qam/2)*symbol_matrix(symbol_matrix~=0);
serial_parallel = serial_parallel/sqrt(mean_qam);

% Apply zero padding for IFFT processing
% Add zero padding
serial_parallel = [zeros(size(serial_parallel,1), (FFT-num_subcarriers)/2), serial_parallel, zeros(size(serial_parallel,1), (FFT-num_subcarriers)/2)];
signal = FFT/sqrt(num_subcarriers)*ifft(serial_parallel, FFT, 2);

% Add cyclic prefix
add_cp = [signal(:, end-cplen+1:end) signal];
add_cp = add_cp.';

% Serialize signal
parallel_serial = add_cp(:);
x_tx = repmat(parallel_serial, 1, size(H,2));

```

Εικόνα 49: Προσθήκη διαμόρφωσης και δημιουργία του πομπού.

8. Υπολογισμός της απόκρισης συχνότητας του καναλιού

Στην συνέχεια, εφαρμόζεται μετασχηματισμός Fourier στην κρουστική απόκριση του καναλιού (CIR), για τον υπολογισμό της συνάρτησης μεταφοράς του καναλιού (CTF). Η σχέση που χρησιμοποιείται είναι η εξής:

$$H(f, t) = \sum_{l=0}^{L-1} h(l, t) e^{-j2\pi f \tau_l}$$

τ_l = καθυστέρηση

$h(l, t)$ = κέρδος καναλιού

l = απόσταση διαδρομής

Εφαρμόζεται διακριτός μετασχηματισμός Fourier, για τον υπολογισμό της απόκρισης συχνότητας καναλιού. Εφόσον, το σήμα έχει μετατραπεί από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας, γίνεται ανάλυση των διαλείψεων λόγω multipath και μετατοπίσεων Doppler.

```
%% CHANNEL:
% H (Rx antennas, Tx antennas, time, delay)

% Initialize arrays for storing received signal, channel responses, and SNR values
sum_y_rx = zeros(length(parallel_serial)+ num_delay_bins-1, num_elements_rx);
sum_Y_rx = zeros(FFT, num_elements_rx, length(time_vector));
Hh = zeros(FFT, num_elements_rx, num_elements_tx, length(time_vector));
sum_Hh = zeros(FFT, num_elements_rx, length(time_vector));
snr_per_subcarrier = zeros(FFT, num_elements_rx, length(time_vector));

% Loop over time vector to calculate the channel response for each time step
for tt = 1:length(time_vector)
    % Loop over receive antennas
    for rx_ant = 1 : size(H,1)
        % Loop over transmit antennas
        for tx_ant = 1 : size(H,2)
            h = squeeze(H(rx_ant,tx_ant,tt,:));
            X = serial_parallel(tt,:);X=X.';
            Htmp = fft(h, FFT);
            Hh(:, rx_ant, tx_ant, tt) = Htmp;
            % Compute received signal in frequency domain
            Y = Htmp.*X;
            sum_Y_rx(:, rx_ant, tt) = Y;
            sum_Hh(:, rx_ant, tt) = sum_Hh(:, rx_ant, tt) + Hh(:, rx_ant, tx_ant, tt);
        end
    end

    % Compute SNR per subcarrier
    snr_per_subcarrier(:, rx_ant, tt) = abs(sum_Hh(:, rx_ant, tt)).^2;
end
display(tt) % Display current time step for progress
end
```

Εικόνα 50: Υπολογισμός της απόκρισης συχνότητας του καναλιού.

9. Δημιουργία του δέκτη

Τα δεδομένα που θα φτάσουν στον δέκτη θα αποδιαμορφωθούν ακολουθώντας την αντίστροφη διαδικασία από τον πομπό για να μας δώσουν τα τελικά δεδομένα. Ωστόσο, αντί της IFFT, θα εφαρμοστεί FFT για την αλλαγή του σήματος από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας για την εξαγωγή των μεταδιδόμενων δεδομένων, τον υπολογισμό της επίδρασης του καναλιού στο σήμα, και την εκτίμηση των θέσεων των σκεδαστών/στόχων στο περιβάλλον.

```

%% Receiver
% Store the received signal for each antenna
received_signal= zeros(FFT, size(serial_parallel,1), num_elements_rx);
for rx_ant = 1:num_elements_rx
    % received_signal(:, :, rx_ant) = sqrt(num_subcarriers)/FFT*fft(squeeze(remove_cp(:, :, rx_ant)), FFT, 1);
    received_signal(:, :, rx_ant) = Rx_signal(:, rx_ant, :);
end

%% DRx:
% Extract the received symbols after removing cyclic prefix
DRx_big = squeeze(received_signal((FFT-num_subcarriers)/2+1:end-(FFT-num_subcarriers)/2, :, :));
DTx_big = serial_parallel(:, (FFT-num_subcarriers)/2+1:end-(FFT-num_subcarriers)/2);
DTx = zeros(num_of_sensing_signals);
DRx = zeros(num_of_sensing_signals, num_of_sensing_signals, num_elements_rx);
counter = 1;
for ii = 3 : 7: num_ofdm_symbols
    DTx(counter, :) = DTx_big(ii, logical(pilot_grid(ii, :)));
    DRx(:, counter, :) = DRx_big(logical(pilot_grid(ii, :)), ii, :);
    counter = counter + 1;
end

DRx = permute(DRx, [2 1 3]);

```

Εικόνα 51: Δημιουργία του δέκτη.

10. Ανίχνευση πιλότων και εφαρμογή ισοστάθμισης

Στη συνέχεια εφαρμόζεται ισοστάθμιση (Equalization) για να βελτιωθεί η απόδοση του δέκτη και να προσαρμοστεί η απόκριση καναλιού διάδοσης, μειώνοντας την επίδραση του καναλιού μέσω της διαίρεσης με την συνάρτηση μεταφοράς του καναλιού (CTF).

```

%% Equalization
x = zeros(size(received_signal));
for rx_ant = 1:num_elements_rx
    for sym = 1 : num_ofdm_symbols
        x(:, sym, rx_ant) = squeeze(received_signal(:, sym, rx_ant)) ./ squeeze(sum_Hh(:, rx_ant, sym));
    end
end

% Calculate range resolution, max range, velocity resolution, max velocity
range_resolution = c / (2 * BW);
max_range = (c * FFT) / (2 * 120e3 * num_subcarriers);
velocity_resolution = c / (2 * freq * Tb);
max_velocity = (c * 120e3 * num_of_sensing_signals) / (2 * freq * total_ofdm_symbols);

```

Εικόνα 52: Ανίχνευση πιλότων και εφαρμογή ισοστάθμισης.

11. Προσθήκη καθυστερήσεων και θορύβου

Για την δημιουργία ενός πιο ρεαλιστικού μοντέλου διάδοσης όπου υπάρχουν καθυστερήσεις και θόρυβος που επηρεάζουν το σήμα, γίνεται προσθήκη καθυστερήσεων και θορύβου λαμβάνοντας υπόψη τον λόγω σήματος προς θόρυβο.

```

% Compute delays
delay_axis = 0: 1/BW: 10/BW;
delay_los = d / c;
delay = (d_from_destination + d_from_origin) / c;
max_delay_length = max([delay_los; delay]);
delay1 = delay-delay_los;
delay_bin_size = 1/BW;
num_delay_bins = ceil(max(delay) / delay_bin_size);
delay_axis = 0: delay_bin_size: (num_delay_bins-1)/BW;

```

```

%% Add noise
% Calculate signal power based on received signal
if num_elements_rx==1
    signal_power = mean(squeeze(mean(abs(sum_Y_rx).^2, 1)));
else
    signal_power = mean(mean(squeeze(mean(abs(sum_Y_rx).^2, 1)),1));
end

sig_pwr_per_subc = mean(abs(sum_Y_rx).^2, 3);

% Compute noise power based on SNR
noise_power = signal_power / SNR;
noise = sqrt(noise_power/2) * (randn(size(sum_Y_rx)) + 1i * randn(size(sum_Y_rx)));

snr_per_subcarrier = snr_per_subcarrier./noise_power;
snr_per_subcarrier = 10*log10(snr_per_subcarrier);

% Add noise to received signal
Rx_signal = sum_Y_rx + noise;
num_ofdm_symbols = size(serial_parallel,1);

```

Εικόνα 53: Προσθήκη καθυστερήσεων και θορύβου.

12. Υπολογισμός διαδρομών και σφάλματος εντοπισμού

Αφού γίνει η επεξεργασία του σήματος με IFFT και FFT, το σήμα αναλύεται με νέους μετασχηματισμούς στο πεδίο της καθυστέρησης και Doppler. Με αυτή την διαδικασία προσδιορίζονται οι διαδρομές που ακολούθησε το σήμα και συγκρίνονται με τις διαδρομές που έχουν οριστεί. Με την σύγκρισή αυτή εκτιμάτε η απόδοση της ανίχνευσης, δηλαδή αν υπήρξαν missed detection ή false alarm και πόση διαφορά απόστασης υπάρχει μεταξύ εκτιμώμενης και πραγματικής θέσης σκεδαστών. Επίσης, για την απόδοση της διαδικασίας αυτής, υπολογίζεται και η διαφορά την εκτιμώμενων από των πραγματικών τιμών στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας.

```

D = zeros(size(DRx));
for ii = 1 : num_elements_rx
    D(:, :, ii) = DRx(:, :, ii)./DTx;
end

% Apply IFFT and DFT for processing
D_idft = ((ifft(D, [], 2)));
D_dft = fftshift(fft(D_idft, [], 1), 1);

```

Εικόνα 54: Ανάλυση σήματος στο πεδίο καθυστέρησης και Doppler.

```

D = (D_dft(:, :, 1));
% Compute the magnitude squared and convert to dB
A = 10*log10(abs(D).^2);
% Threshold to display the results
A(A<max(max(A))-SNRdB*1.5) = -300;

% Apply Gaussian smoothing
A_smooth = imgaussfilt(A, 3); % Sigma = 1 (adjust as needed)

% Find the local maxima of the smoothed results
maximaMask = imregionalmax(A_smooth);
[row, col] = find(maximaMask);

% Display the results
imagesc(A_smooth); hold on;
plot(col, row, 'r*', 'MarkerSize', 10); % Mark local maxima
colorbar;
title('Local Maxima After Gaussian Smoothing');

```

Εικόνα 55: Απεικόνιση καναλιού αφού έχουν οριστεί τα τοπικά μέγιστα και υπολογιστεί οι καθυστερήσεις.

```

% Set SNR threshold for detection
snr_thres = SNRdB - SNRmargin;
for rx_ant = 1 : num_elements_rx
    % Extract the received symbols for the current antenna
    remove_first_subcarriers = squeeze(x((FFT-num_subcarriers)/2+1:end - (FFT-num_subcarriers)/2, :, rx_ant));
    tx_symbols = squeeze(serial_parallel(:, (FFT-num_subcarriers)/2+1:end - (FFT-num_subcarriers)/2)).';
    % Compute SNR per subcarrier for detection
    snr_per_sub = squeeze(snr_per_subcarrier((FFT-num_subcarriers)/2+1:end - (FFT-num_subcarriers)/2, rx_ant, :));
    ind = (snr_per_sub > snr_thres);
    ind2 = ind & pilot_grid;

    % Perform QAM demodulation on the received symbols
    qam_demodulation = qamdemod(sqrt(mean_qam)*remove_first_subcarriers(ind2), mod_rank, 'OutputType', 'bit');
    qam_tx = qamdemod(sqrt(mean_qam)*tx_symbols(ind2), mod_rank, 'OutputType', 'bit');

    % Calculate the error rate based on demodulated symbols
    errors = sum(qam_demodulation ~= qam_tx);
    error_rate = errors / sum(sum(ind2));
end

% Sorting the estimated values for delay and frequency
sorted_delay_real = sort(delay);
estimated = sort(FFT/num_subcarriers*col/BW);
f_est = sort(-1/slot_dur + (row-1)/slot_dur/num_slots);
sorted_fd = sort([fd_iT+fd_iR; 0]);

% Compute the error in delay and frequency estimation
err = 0;
err1 = 0;
for ii = 1 : length(estimated)
    val = min(abs(sorted_delay_real - estimated(ii)));
    val1 = min(abs(f_est(ii) - sorted_fd));
    err = err + val;
    err1 = err1 + val1;
end
err = err/length(estimated);
err1 = err1/length(estimated);
dist_err = err*3e8;
freq_err = err1;
keyboard

% Calculate the probability of false alarm and missed detection based on path estimates
real_num_of_paths = 1 + num_scatterers;
estimated_num_of_scatterers = length(estimated);

if real_num_of_paths > estimated_num_of_scatterers
    prob_false_alarm = 0;
    prob_missed_detection = (real_num_of_paths - estimated_num_of_scatterers)/estimated_num_of_scatterers;
elseif real_num_of_paths < estimated_num_of_scatterers
    prob_false_alarm = (estimated_num_of_scatterers - real_num_of_paths)/estimated_num_of_scatterers;
    prob_missed_detection = 0;
else
    prob_missed_detection = 0;
    prob_false_alarm = 0;
end

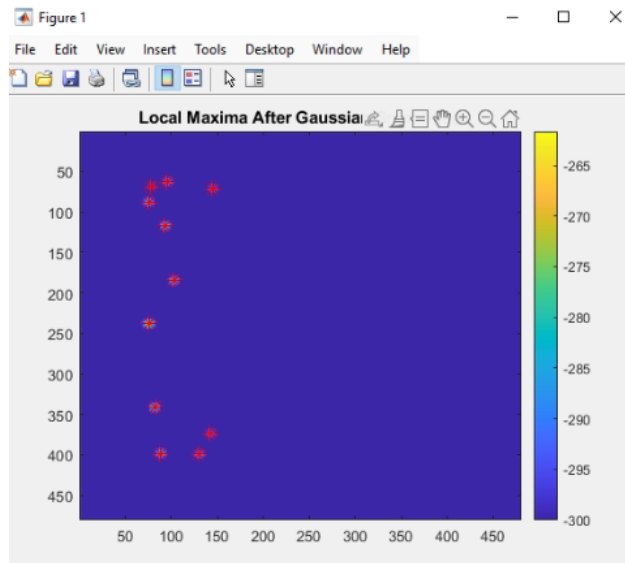
```

Εικόνα 56: Υπολογισμός της απόδοσης της ανίχνευσης και των πιθανοτήτων missed detection και false alarm.

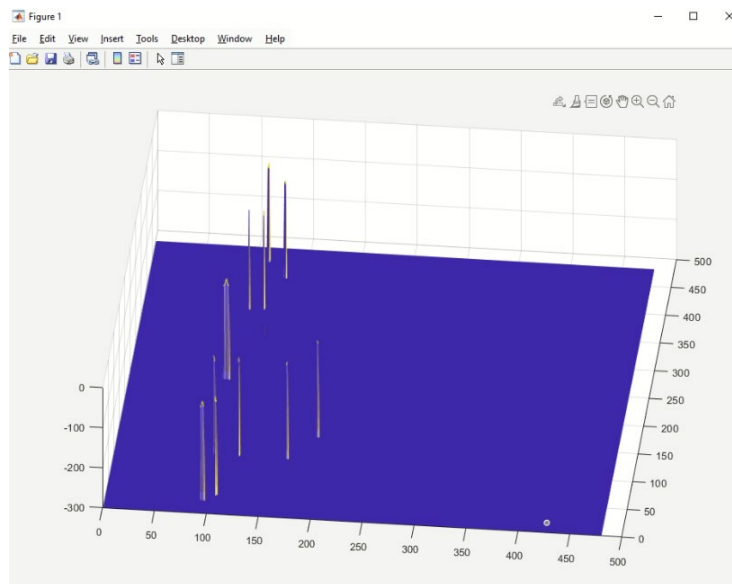
4.7 Αποτελέσματα Δοκιμών

Στόχος των δοκιμών είναι ο έλεγχος της επίδρασης του αριθμού των σκεδαστών, του SNR και της δυναμικής περιοχής του σήματος.

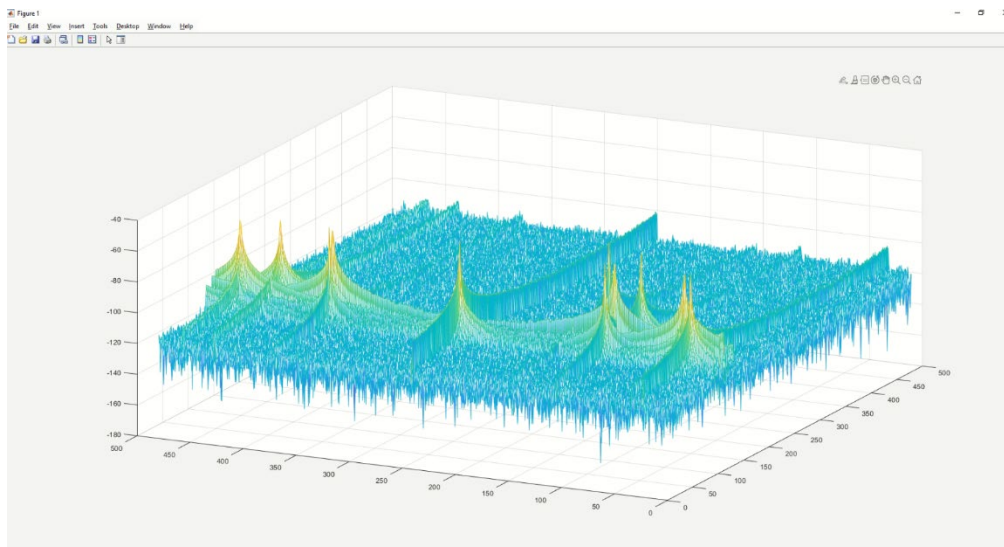
1. Οι δοκιμές ξεκινάνε μεταβάλλοντας τον αριθμό των σκεδαστών, με SNR = 23 και κατώφλι ανίχνευσης $\text{threshold} = A(A < \max(\max(A)) - 20) = -300$:



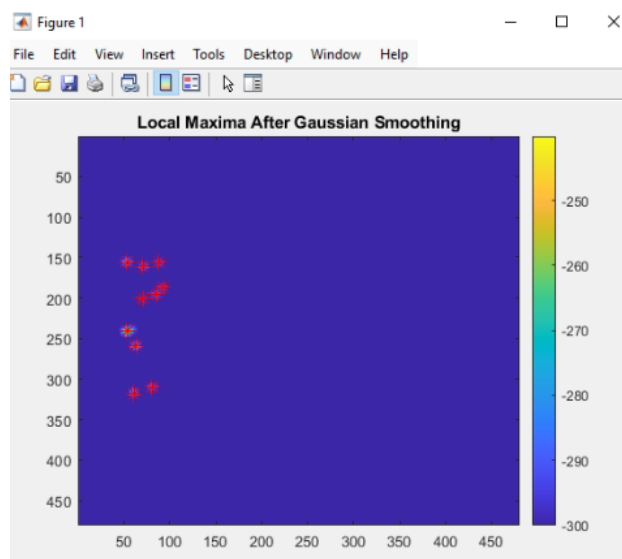
Εικόνα 57: Αναπαράσταση των *peaks* για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα.



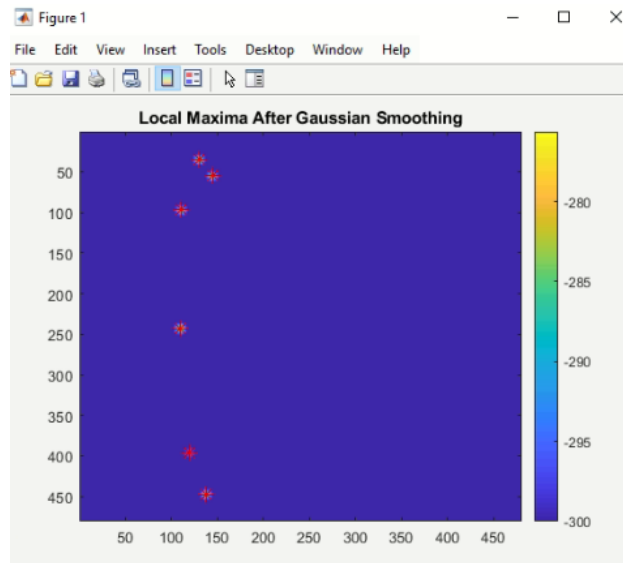
Εικόνα 58: Αναπαράσταση των *peaks* για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα.



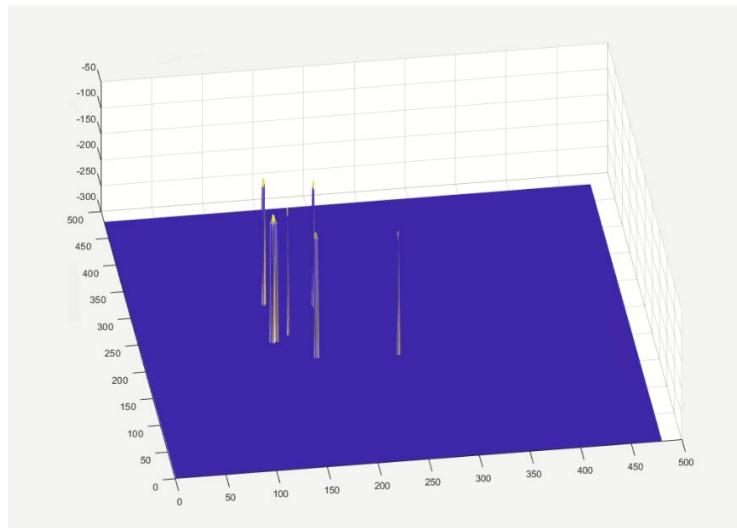
Εικόνα 59: Αναπαράσταση των *peaks* για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα.



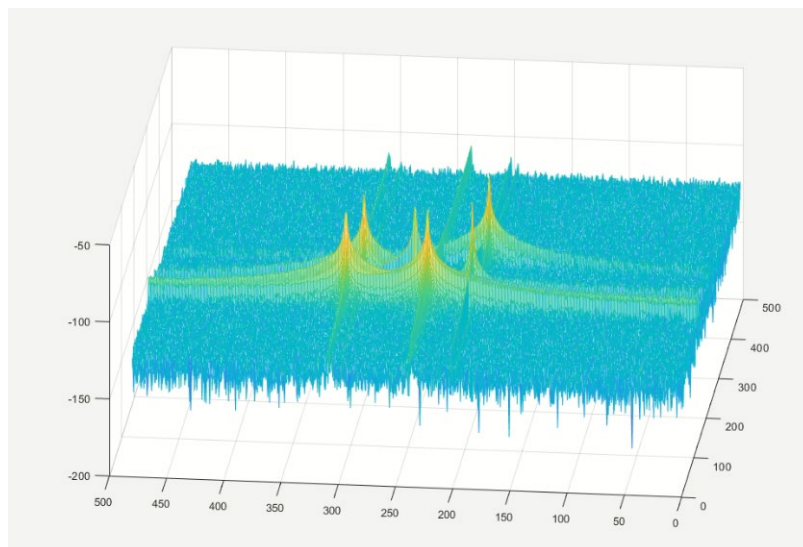
Εικόνα 60: Αναπαράσταση των *peaks* για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με μία χαμένη ανίχνευση.



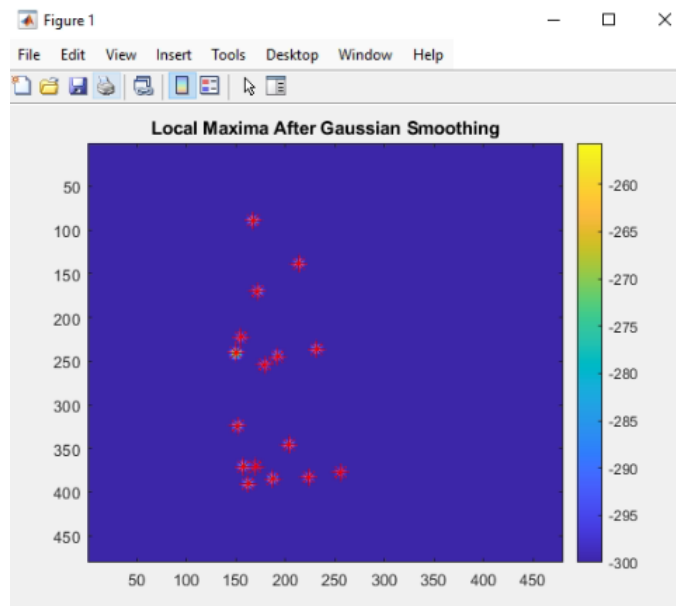
Εικόνα 61: Αναπαράσταση των *peaks* για τους 5 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα.



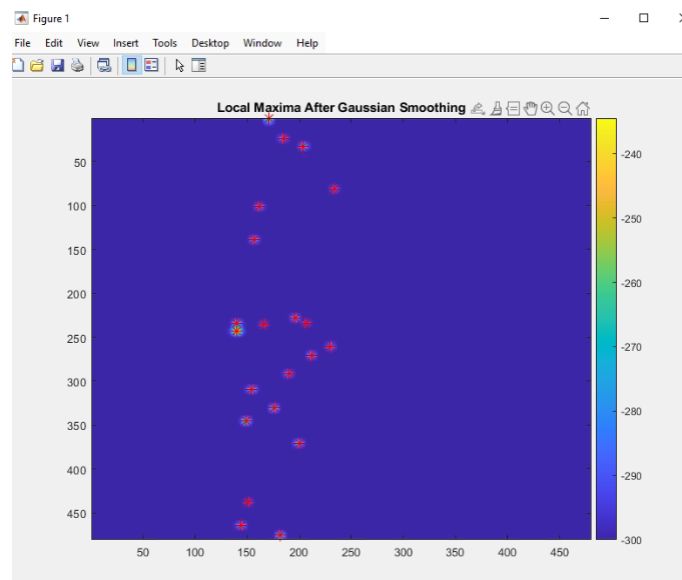
Εικόνα 62: Αναπαράσταση των *peaks* για τους 5 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα.



Εικόνα 63: Αναπαράσταση των *peaks* για τους 5 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα.



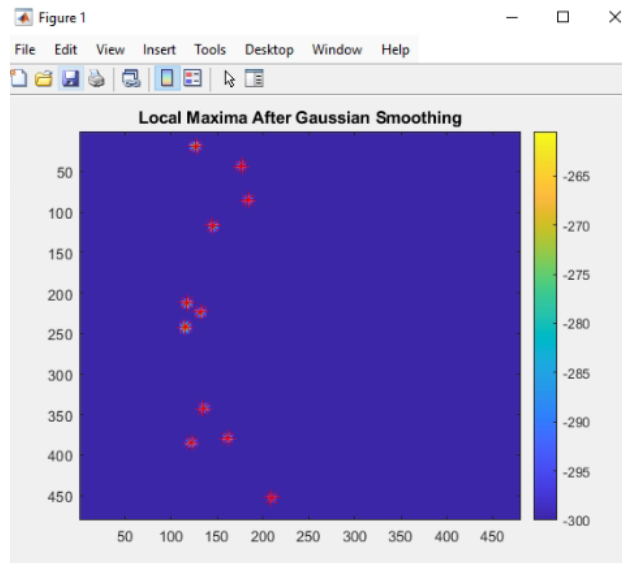
Εικόνα 64: Αναπαράσταση των *peaks* για τους 15 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα.



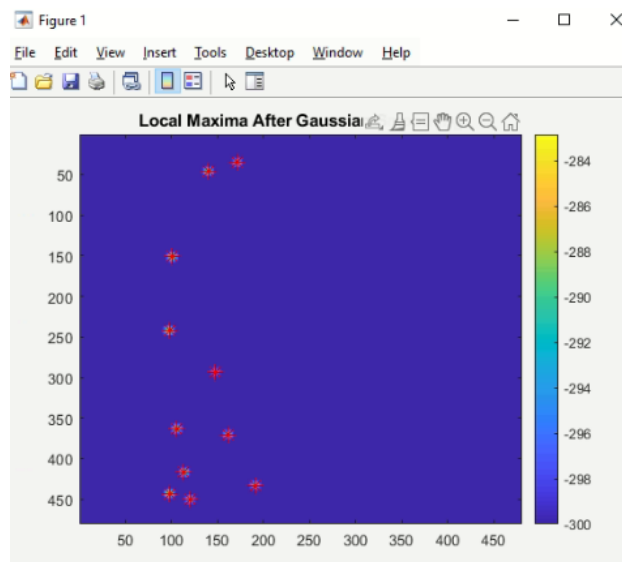
Εικόνα 65: Αναπαράσταση των *peaks* για τους 20 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα.

Παρατηρείται από τα διαγράμματα ότι το κανάλι βρίσκει τις περισσότερες φορές όλα τα *peaks*. Ωστόσο, μπορεί να υπάρξουν φορές που θα γίνει λάθος μέτρηση και ένα σήμα μπορεί να χαθεί. Αυτό μπορεί να συμβεί αν το *threshold* που εφαρμόζεται κόβει κάποιο σήμα που έπεσε κάτω από τις τιμές του, αλλά κυρίως όταν δυο σκεδαστές βρίσκονται πολύ κοντά και ο αλγόριθμος θεωρεί ότι πρόκειται για ένα μόνο σκεδαστή.

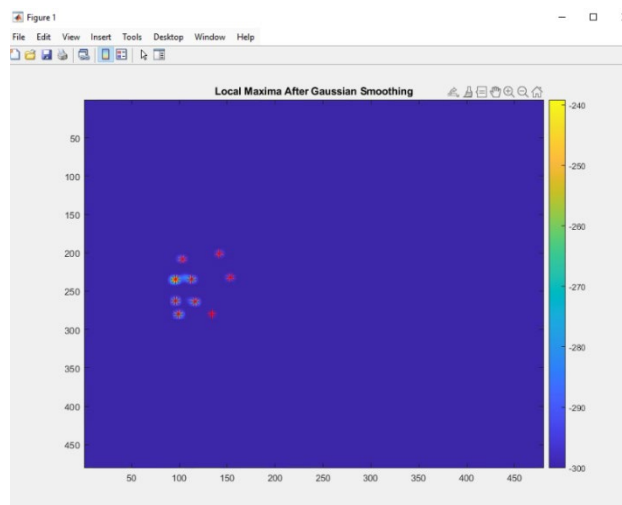
2. Στην συνέχεια, ο αριθμός των σκεδαστών μένει σταθερός στους 10, όπως και το *threshold*, και μεταβάλουμε τις τιμές του SNR:



Εικόνα 66: Αναπαράσταση των *peaks* για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με SNR 5.



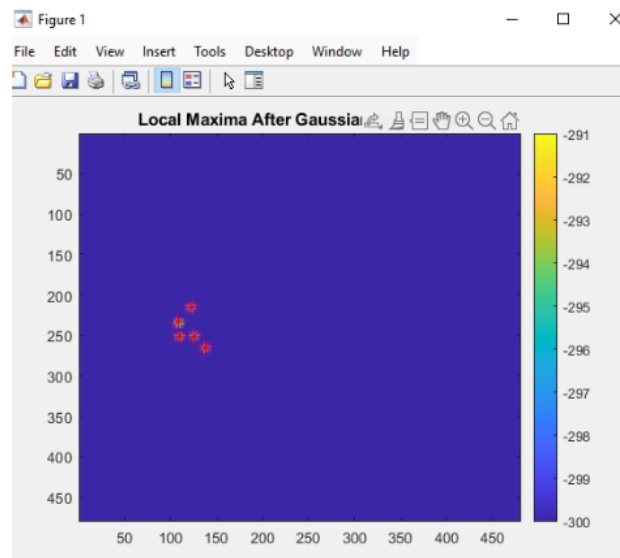
Εικόνα 67: Αναπαράσταση των *peaks* για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με SNR 50.



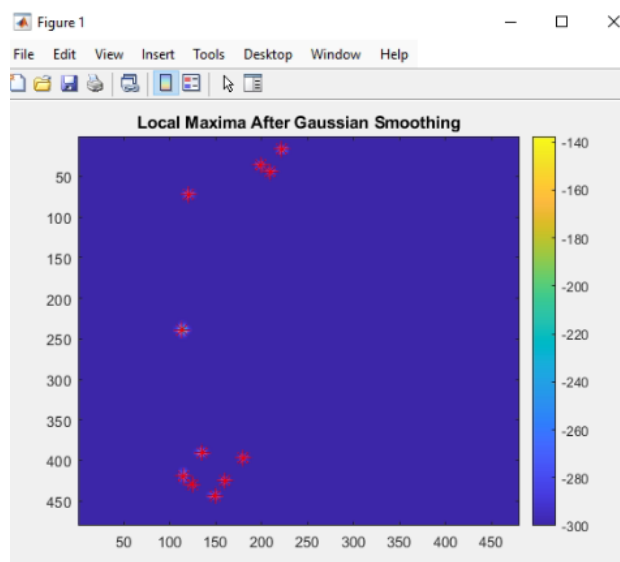
Εικόνα 68: Αναπαράσταση των *peaks* για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με SNR 100.

Παρατηρείται από τα διαγράμματα ότι για SNR 5 με 50 περίπου, το αποτέλεσμα δεν αλλάζει. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα είναι ανθεκτικό στον θόρυβο ή ότι οι τιμές του threshold δεν επηρεάζουν τις χρήσιμες πληροφορίες. Ωστόσο, για SNR 50 περίπου και πάνω, όπως στην εικόνα 12, δεν εμφανίζονται όλα τα peaks. Άρα, το σύστημα επηρεάζεται από την έλλειψη θορύβου, αρχίζει να θεωρεί κορυφές ως θόρυβο, και το threshold επηρεάζει την απόδοση αφού κόβει χρήσιμη πληροφορία.

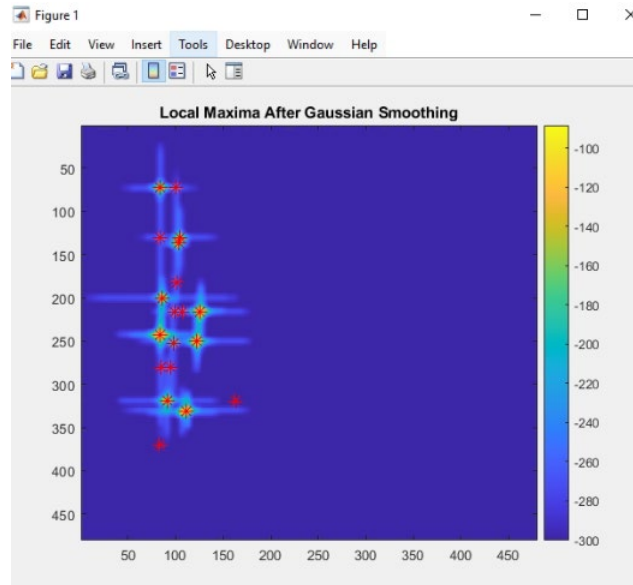
3. Έπειτα, ο αριθμός του SNR και των σκεδαστών μένουν σταθερά και μεταβάλλεται το threshold:



Εικόνα 69: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με threshold 5.



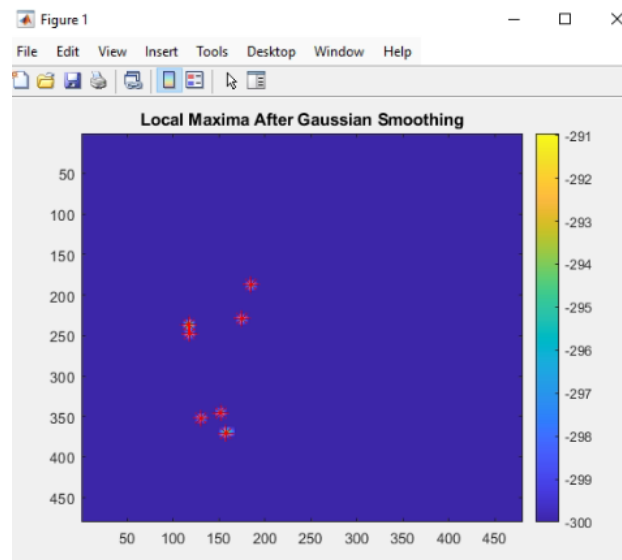
Εικόνα 70: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με threshold 30.



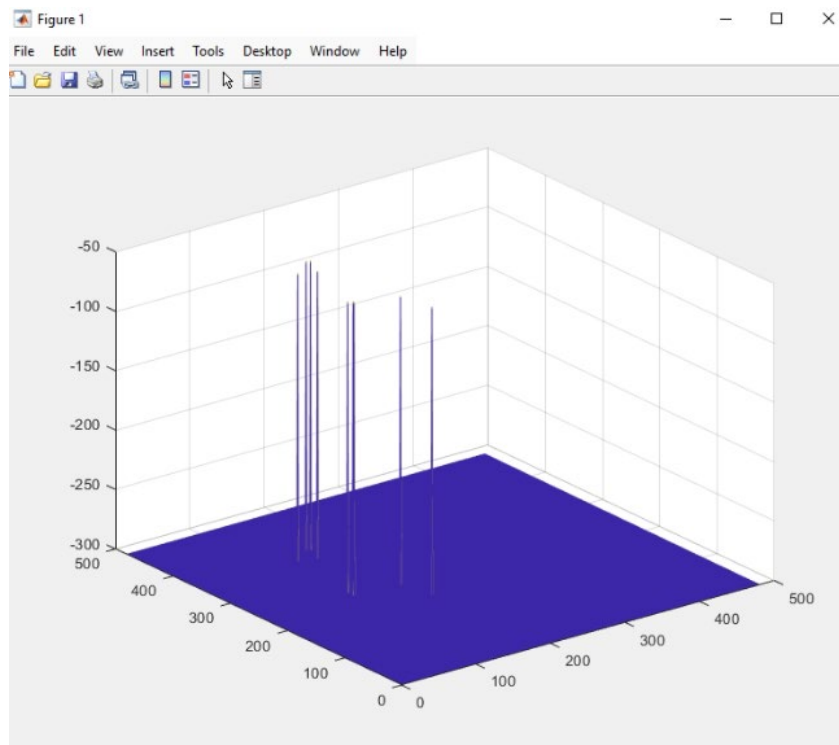
Εικόνα 71: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με threshold 50.

Παρατηρείται από τα διαγράμματα ότι για τιμές threshold 5 με 30 περίπου, το σύστημα δεν επηρεάζεται και εμφανίζεται μόνο η χρήσιμη πληροφορία χωρίς false alarms. Ωστόσο, για τιμές μεγαλύτερες του 30 ανιχνεύονται περισσότερα peaks (false alarms) καθώς το κατώφλι είναι χαμηλό και αναγνωρίζονται τιμές θορύβου ως σκεδαστές.

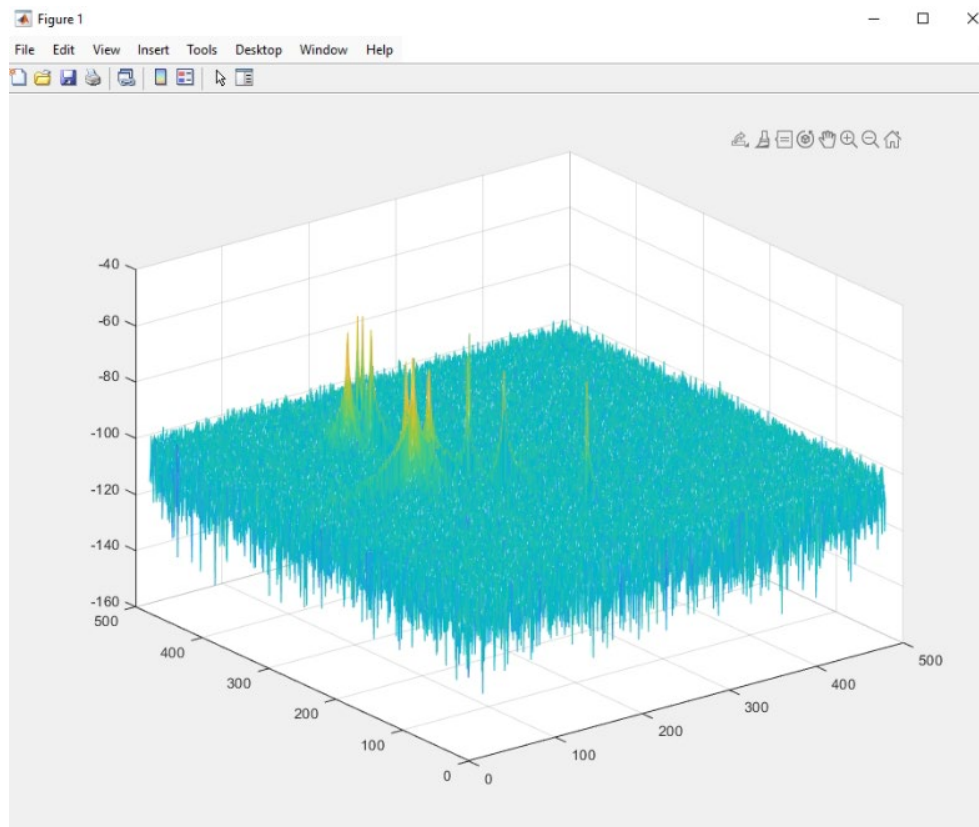
4. Τέλος, γίνεται μεταβολή του threshold με βάση το SNR π.χ. αντικατάσταση του $A(A < \max(\max(A)) - 20) = -300$ με $A(A < \max(\max(A)) - \text{SNR}_{\text{db}}) = -300$:



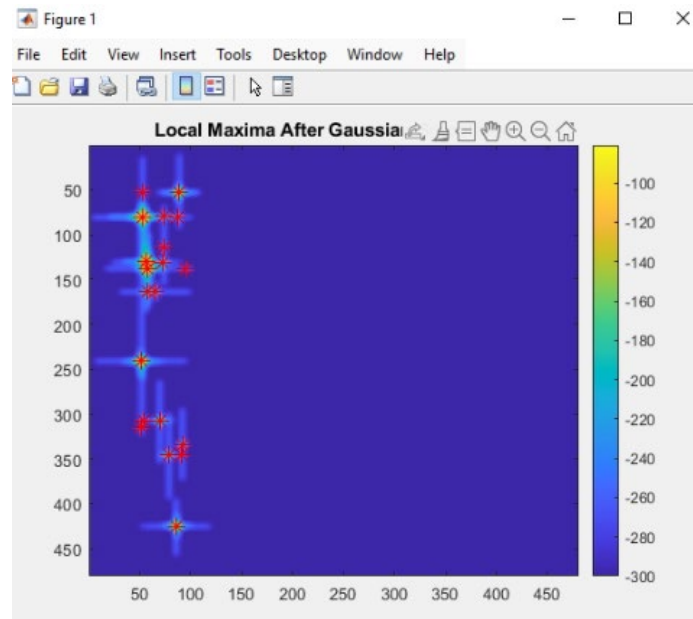
Εικόνα 72: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με threshold με βάση το SNR 5.



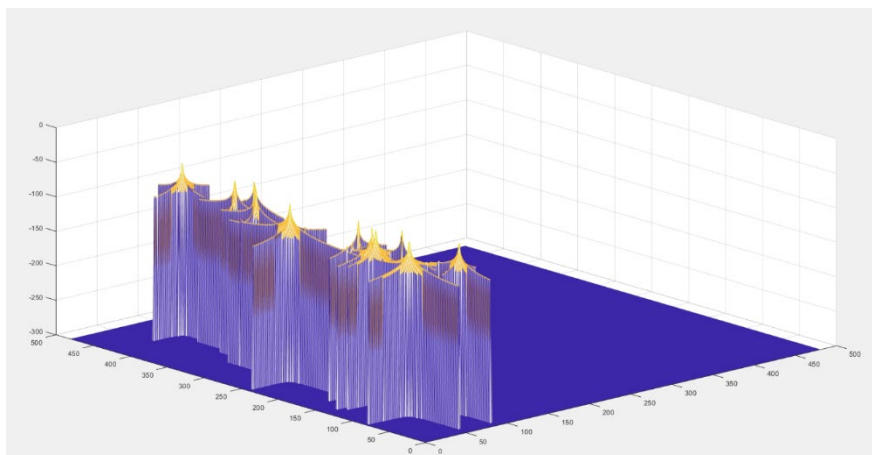
Εικόνα 73: Αναπαράσταση των *peaks* για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με *threshold* με βάση το SNR 5.



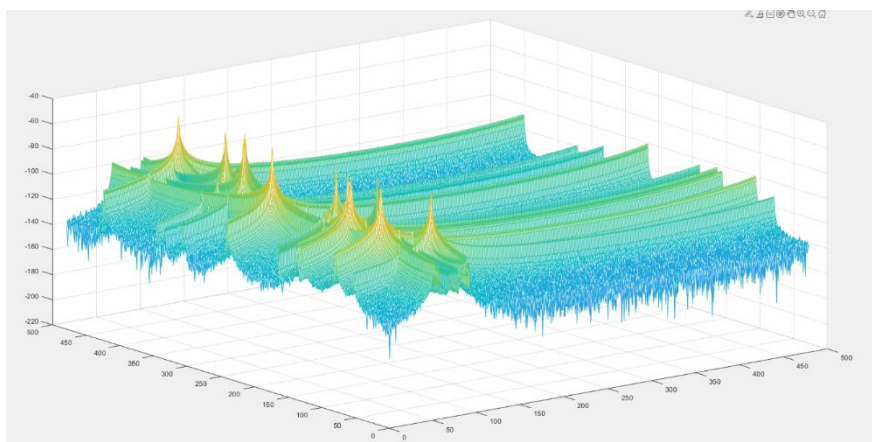
Εικόνα 74: Αναπαράσταση των *peaks* για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με *threshold* με βάση το SNR 5.



Εικόνα 75: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με threshold με βάση το SNR 50.



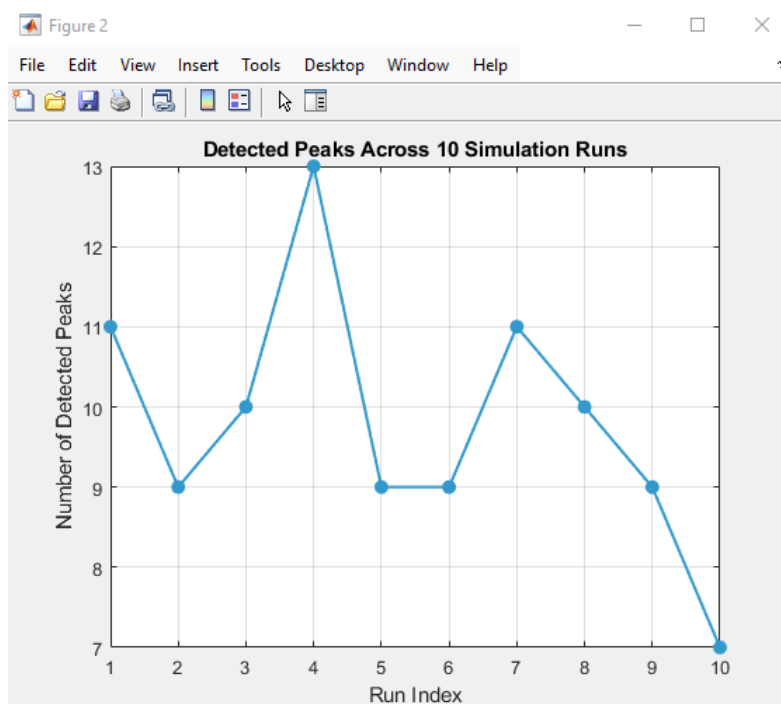
Εικόνα 76: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με threshold με βάση το SNR 50.



Εικόνα 77: Αναπαράσταση των peaks για τους 10 σκεδαστές και για το απευθείας σήμα, με threshold με βάση το SNR 50.

Παρατηρείται από τα διαγράμματα ότι ένα υψηλό κατώφλι ελαχιστοποιεί τους ψευδείς συναγερμούς, ενώ ένα χαμηλό κατώφλι αυξάνει τον κίνδυνο ψευδών ανιχνεύσεων. Ένας υψηλότερος λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR), αυξάνει την πιθανότητα ανίχνευσης, ενώ μειώνει την πιθανότητα ψευδών συναγερμών και ένας χαμηλότερος λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR), μειώνει την πιθανότητα ανίχνευσης, ενώ αυξάνει την πιθανότητα ψευδών συναγερμών.

Τέλος, μετά την επανάληψη εκτέλεσης της προσομοίωσης, παρατηρείται ότι τις περισσότερες φορές το σύστημα έχει βρει επιτυχώς τις 11 κορυφές που έχουν οριστεί στο πρώτο σενάριο με την βέλτιστη απόδοση, καθιστώντας το σύστημα σταθερό. Υπήρξε και περίπτωση που το σύστημα βρήκε 14 κορυφές που οφείλεται στη στοχαστικής φύση του καναλιού. Ακόμα, σε μερικές περιπτώσεις βρέθηκαν μόνο 9 κορυφές που οφείλεται στις περισσότερες περιπτώσεις σε κοντινούς σκεδαστές που αναγνωρίζονται ως ένας.



Εικόνα 78: Ανίχνευση peaks σε 10 επαναλήψεις.

Συμπεράσματα

Η διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στην μελέτη και μοντελοποίηση συστημάτων Joint Communication and Radar (JCAS) και στην ανάλυση των επιδράσεων του καναλιού διάδοσης και άλλων παραγόντων, στην απόδοση των συστημάτων αυτών. Στα πλαίσια αυτά, αναπτύχθηκε, εξομοιώθηκε και αξιολογήθηκε ένας αλγόριθμος από κοινού ανίχνευσης και επικοινωνίας, βασισμένος στην διαμόρφωση OFDM – σε μια κυματομορφή που ομοιάζει με το 5G στις χιλιοστομετρικές συχνότητες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι παίζει σημαντικό ρόλο ο αριθμός των σκεδαστών και οι τιμές του SNR και του threshold. Έτσι, κρίσιμη αποτελεί η σωστή μοντελοποίηση του καναλιού διάδοσης και η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων για να υπάρξει το σύστημα JCAS αποδοτικό και αξιόπιστο. Οι δοκιμές για ένα πιο ολοκληρωμένο σύστημα ανίχνευσης και διάδοσης θα μπορούσαν μελλοντικά να επεκταθούν σε MIMO συστήματα αλλά και σε διαφορετικά περιβάλλοντα, προσαρμόζοντας δυναμικά τις τιμές του threshold.

Βιβλιογραφία

- [1]. Geng, Y. (2023, March). A novel waveform design for OFDM-based joint sensing and communication system. In *2023 IEEE 3rd International Symposium on Joint Communications & Sensing (JC&S)* (pp. 1-6). IEEE.
- [2]. Kakkavas, A., Wymeersch, H., Seco-Granados, G., García, M. H. C., Stirling-Gallacher, R. A., & Nossek, J. A. (2021). Power allocation and parameter estimation for multipath-based 5G positioning. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20(11), 7302-7316.
- [3]. Malanowski, M., & Kulpa, K. (2011). Target Detection in Continuous-Wave Noise Radar in the Presence of Impulsive Noise. *Acta Physica Polonica A*, 119(4), 467-472.
- [4]. Huang, T., Shlezinger, N., Xu, X., Liu, Y., & Eldar, Y. C. (2020). MAJoRCom: A dual-function radar communication system using index modulation. *IEEE transactions on signal processing*, 68, 3423-3438.
- [5]. Zhang, J. A., Rahman, M. L., Wu, K., Huang, X., Guo, Y. J., Chen, S., & Yuan, J. (2021). Enabling joint communication and radar sensing in mobile networks—A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 24(1), 306-345.
- [6]. Zhang, J. A., Liu, F., Masouros, C., Heath, R. W., Feng, Z., Zheng, L., & Petropulu, A. (2021). An overview of signal processing techniques for joint communication and radar sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 15(6), 1295-1315.
- [7]. Wei, Z., Qu, H., Wang, Y., Yuan, X., Wu, H., Du, Y., ... & Feng, Z. (2023). Integrated sensing and communication signals toward 5G-A and 6G: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(13), 11068-11092.
- [8]. D'Amante, I. (2023). *Geometry based stochastic radio channel modelling for railway communications* (Doctoral dissertation, Technische Universität Wien).
- [9]. Liyanaarachchi, S. D., Barneto, C. B., Riihonen, T., & Valkama, M. (2020, June). Joint OFDM waveform design for communications and sensing convergence. In *ICC 2020-2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [10]. Tsai, J. A., Buehrer, R. M., & Woerner, B. D. (2004). BER performance of a uniform circular array versus a uniform linear array in a mobile radio environment. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 3(3), 695-700.
- [11]. <https://www.ll.mit.edu/outreach/online-course-radar-introduction-radar-systems>
- [12]. Γεώργιος Κ. Καραγιαννίδης, Δρ. Κοραλία, Ν. Παππή (2021). Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα.
- [13]. Simon R. Saunders, Alejandro Aragon-Zavala, Βουγιούκας Δ. (2017). Κεραίες και Διάδοση για Ασύρματα Συστήματα Επικοινωνιών.
- [14]. Μιχάλης Ε. Θεολόγου (2021). Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών.
- [15]. Κανάτας Αθανάσιος, Πάντος Γεώργιος, Ασύρματες Επικοινωνίες (3^η έκδοση)
- [16]. Skolnik, Merrill I., Εισαγωγή στα συστήματα Ραντάρ, 2013
- [17]. Σάγος Γεώργιος, Συστήματα Ραντάρ και Ηλεκτρονικού Πολέμου, 2018
- [18]. Li, Ye Geoffrey, and Gordon L. Stuber, eds. *Orthogonal frequency division multiplexing for wireless communications*. Springer Science & Business Media, 2006.