



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

**“ Reconfigurable Intelligent Surfaces - μοντελοποίηση και
ανάλυση επίδοσης ”**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΦΟΙΤΗΤΡΙΑΣ ΖΑΓΑΛΙΩΤΗ ΦΩΤΕΙΝΗ Α.Μ. 321/2019054

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΛΙΑΤΣΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Τριμελής Επιτροπή: Κωνσταντίνος Μαλιάτσος,
Χαράλαμπος Σκιάνης,
Δημήτριος Σκούτας

ΣΑΜΟΣ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ, 2024

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας επιτυχώς την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας αυτής, κ. Μαλιάτσο Κωνσταντίνο, για την εμπιστοσύνη, την καθοδήγηση και την βοήθεια που μου παρείχε σε όλο το διάστημα αυτής μου της προσπάθειας.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	8
Abstract.....	9
Κεφάλαιο 1 ^ο : Από το 5G στο 6G.....	10
1.1 Εισαγωγή στην τεχνολογία 5G	10
1.2 Εισαγωγή στην τεχνολογία 6G	11
1.3 Σύγκριση απόδοσης μεταξύ 5G και 6G	13
Κεφάλαιο 2 ^ο : Εισαγωγή στην θεωρία	14
2.1 Reconfigurable Intelligent Surface - RIS	14
2.1.1 Πώς λειτουργεί η αναδιαμορφώσιμη έξυπνη επιφάνεια;.....	18
2.1.2 Εφαρμογές RIS.....	19
2.1.2.1 Ασύρματες Επικοινωνίες.....	19
2.1.2.2 Ανίχνευση RF	20
2.1.2.3 Βασικές αρχές ασύρματων επικοινωνιών με τη βοήθεια RIS.....	21
2.1.2.3.1 Ανακλαστικός τύπος.....	21
2.1.2.4 Μοντέλο απώλειας διαδρομής μεγάλης κλίμακας.....	24
2.1.2.5 Μοντέλο καναλιού Δυαδικής Οπισθοσκέδασης (Dyadic Backscatter).....	25
2.2 Στοιχειοκεραίες	26
2.2.1 Ο αριθμός των στοιχείων της στοιχειοκεραίας	27
2.2.2 Η σχετική απόσταση μεταξύ των στοιχείων	27
2.2.3 Η γεωμετρική διάταξη της στοιχειοκεραίας συνολικά	28
2.2.4 Η διέγερση (πλάτος και φάση) των μεμονωμένων στοιχείων.....	28
2.2.5 Βασική Θεωρία Στοιχειοκεραιών	29
2.2.5.1 Γενικά.....	29
2.2.5.2 Γραμμικές Στοιχειοκεραίες.....	29
2.2.5.3 Ομοιόμορφες γραμμικές στοιχειοκεραίες.....	30
2.2.5.4 Ορθογωνική συστοιχία Κεραιών.....	30
2.2.6 Διαλείψεις Μικρής κλίμακας	33
2.2.6.1 Τύποι μικρής κλίμακας διαλείψεων (Small-scale fading)	34
2.2.6.2 Διαλείψεις Μεγάλης κλίμακας (Large scale fading).....	36
2.3 Μοντέλα διαλείψεων μικρής κλίμακας (Small-scale fading models)	37
2.3.1 Rayleigh	37

2.3.2 Rice (Nakagami – n)	39
2.3.3 Διασπορά Doppler και Χρόνος Συνοχής.....	40
2.3.3.1 Διασπορά Doppler	40
2.3.3.2 Ο χρόνος συνοχής.....	40
Κεφάλαιο 3ο: Μαθηματική μοντελοποίηση καναλιού	41
3.1 Απώλειες μετάδοσης στον ελεύθερο χώρο (Free – space transmission loss)	41
3.2 Διασπορά Doppler και Χρόνος Συνοχής.....	43
3.2.1 Διασπορά Doppler	43
3.3 LOS – NLOS	46
3.3.1 LOS.....	46
3.3.1.1 Ορισμός	46
3.3.1.2 Προκλήσεις και περιορισμοί.....	47
3.3.1.3 Στρατηγικές μετριάσμού	47
3.3.2 NLOS	47
3.3.3 Μεγάλης Κλίμακας Μοντέλα Απώλειας Διαδρομής.....	48
3.4 Τύποι κεραιών για τα mm – Waves	49
3.4.1 Ομοιόμορφες γραμμικές στοιχειοκεραίες - ULA	49
3.4.2 Ομοιόμορφες ορθογωνικές στοιχειοκεραίες - (Uniform Rectangular Array, URA).....	50
3.5 Διάνυσμα Πολλαπλότητας Συστοιχίας (array manifold vector) ή Διάνυσμα Καθοδήγησης (steering vector).....	51
3.5.1 Διαφορική Γεωμετρία - Παράμετροι της Επιφάνειας.....	52
3.6 Γεωμετρικά Στοχαστικά Μοντέλα Καναλιών (GBSCM)	55
3.6.1 Εισαγωγή	55
3.6.2 Κατηγορίες GBSCM και Μοντελοποίηση	56
3.6.3 Ένα SISO Μοντέλο Αναφοράς V2V Δύο Δαχτυλιδιών	60
Κεφάλαιο 4ο: Γενετικός Αλγόριθμος	63
4.1 Εισαγωγή	63
4.2 Πλεονεκτήματα Γενετικών Αλγορίθμων	65
4.3 Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός Γενετικού Αλγορίθμου	67
4.3.1 Κωδικοποίηση	67
4.3.2 Αντικειμενική Συνάρτηση.....	68
4.3.3 Γενετικές Διαδικασίες.....	68

4.3.4 Αναπαραγωγή	68
4.3.5 Διασταύρωση	69
4.3.6 Μετάλλαξη	69
4.4 Ανάλυση και Εφαρμογή Γενετικού Αλγορίθμου για Ρύθμιση του RIS.....	70
4.5 Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου.....	71
Κεφάλαιο 5^ο: Ανάλυση του κώδικα και αποτελέσματα.....	75
5.1 Εισαγωγή	75
5.2 Ανάλυση Προσομοίωσης.....	75
5.2.1 Εισαγωγή καναλιού	75
5.2.2 Αποστάσεις.....	77
5.2.3 Doppler	79
5.2.4 Path delays	79
5.2.5 Συμπερίληψη ενός Uniform Linear Array (ULA).....	80
5.2.6 Υπολογισμός του Σηματοθορυβικού λόγου (SNR).....	81
5.2.7 Υπολογισμός του Καναλιού από Πομπό προς RIS & από RIS προς κάθε Δέκτη	82
5.3 Αποτελέσματα.....	82

Πίνακας Εικόνων		
Εικόνα 2.1	Επαναδιαμορφώσιμη ευφυής επιφάνεια (RIS).[4]	17
Εικόνα 2.2	Εφαρμογές της RIS για ασύρματες επικοινωνίες. [6]	20
Εικόνα 2.3	Εφαρμογές της RIS για ανίχνευση ραδιοσυχνοτήτων. [6]	21
Εικόνα 2.4	Εικονογραφήσεις για την απόκριση ενός ανακλαστικού στοιχείου RIS. [6]	22
Εικόνα 2.5	Εικονογραφήσεις για την απόκριση ενός μεταδοτικού στοιχείου RIS. [6]	22
Εικόνα 2.6	Εικονογραφήσεις για την απόκριση ενός υβριδικού στοιχείου RIS. [6]	23
Εικόνα 2.7	Επιδράσεις υλοποίησης σε απώλεια διαδρομής μεγάλης κλίμακας: (a) Ηλεκτρικά μικρό μέγεθος. (b) Ηλεκτρικά μεγάλο μέγεθος. [6]	24
Εικόνα 2.8:	Τυπικές διατάξεις στοιχειοκεραίων.	26
Εικόνα 2.9	Γραμμική στοιχειοκεραία	29
Εικόνα 2.10:	Ορθογωνική στοιχειοκεραία.	31
Εικόνα 2.11	Το πλάτος δέσμης μίας ορθογώνιας συστοιχίας	32
Εικόνα 2.12	Μοντέλο δύο διαδρομών με ανάκλαση στο έδαφος. [7]	36
Εικόνα 2.13	Γεωμετρία περίθλασης από αιχμηρό εμπόδιο. Με T συμβολίζεται ο πομπός και με R ο δέκτης, ενώ το αιχμηρό εμπόδιο εμποδίζει την διαδρομή οπτικής επαφής. [7]	37
Εικόνα 3.1	Ακίνητη πηγή – Ακίνητος παρατηρητής. [9]	44
Εικόνα 3.2	Ακίνητη πηγή – κινούμενος παρατηρητής. [9]	45
Εικόνα 3.3	Επικοινωνία μεταξύ δύο πομποδεκτών χωρίς να υπάρχει εμπόδιο μεταξύ τους (Line of Sight – LOS). [11]	46
Εικόνα 3.4	Επικοινωνία μεταξύ δύο πομποδεκτών όταν υπάρχει εμπόδιο μεταξύ τους (Non - Line of Sight – NLOS). [11]	48
Εικόνα 3.5	Ομοιόμορφη γραμμική στοιχειοκεραία. [14]	49
Εικόνα 3.6	Ομοιόμορφη ορθογωνική στοιχειοκεραία. [14]	50
Εικόνα 3.7	Μία γενική διαδικασία μοντελοποίησης ενός GBSCM. [16]	59
Εικόνα 3.8	Ένα SISO V2V μοντέλο αναφοράς δύο δαχτυλιδιών. [16]	61
Εικόνα 4.5.1	Καλύτερη επίδοση για 100 generations	71
Εικόνα 4.5.2	Καλύτερη επίδοση αντικειμενικής συνάρτησης για 1000 generations	72
Εικόνα 4.5.3	Καλύτερη επίδοση αντικειμενικής συνάρτησης για μέγεθος πληθυσμού 1000	73
Εικόνα 4.5.4	Καλύτερη επίδοση αντικειμενικής συνάρτησης για ρυθμό μετάλλαξης 0.05	74
Εικόνα 4.5.5	Καλύτερη επίδοση αντικειμενικής συνάρτησης για ρυθμό μετάλλαξης 0.05	74
Εικόνα 5.1	Γεωμετρία καναλιού στο matlab	76
Εικόνα 5.2	Αποστάσεις μεταξύ πομπών και δεκτών.	77
Εικόνα 5.3	Αποστάσεις μεταξύ Πομπού-RIS RIS-δέκτη	78
Εικόνα 5.4	Sum rate για όλες τις περιπτώσεις σε 200 εκτελέσεις του κώδικα	83
Εικόνα 5.5	Οπτικοποίηση του sum rate με χρήση cdf plot	84
Εικόνα 5.6	Οπτικοποίηση του SNR με χρήση cdf plot	85

Πίνακας Εικόνων		
Εικόνα 2.1	Επαναδιαμορφώσιμη ευφυής επιφάνεια (RIS).[4]	18
Εικόνα 2.2	Εφαρμογές της RIS για ασύρματες επικοινωνίες. [6]	20
Εικόνα 2.3	Εφαρμογές της RIS για ανίχνευση ραδιοσυχνοτήτων. [6]	21
Εικόνα 2.4	Εικονογραφήσεις για την απόκριση ενός ανακλαστικού στοιχείου RIS. [6]	22
Εικόνα 2.5	Εικονογραφήσεις για την απόκριση ενός μεταδοτικού στοιχείου RIS. [6]	22
Εικόνα 2.6	Εικονογραφήσεις για την απόκριση ενός υβριδικού στοιχείου RIS. [6]	23
Εικόνα 2.7	Επιδράσεις υλοποίησης σε απώλεια διαδρομής μεγάλης κλίμακας: (a) Ηλεκτρικά μικρό μέγεθος. (b) Ηλεκτρικά μεγάλο μέγεθος. [6]	24
Εικόνα 2.8	Τυπικές διατάξεις στοιχειοκεραίων.	26
Εικόνα 2.9	Γραμμική στοιχειοκεραία	29
Εικόνα 2.10:	Ορθογωνική στοιχειοκεραία.	31
Εικόνα 2.11	Το πλάτος δέσμης μίας ορθογώνιας συστοιχίας	32
Εικόνα 2.12	Μοντέλο δύο διαδρομών με ανάκλαση στο έδαφος. [7]	36
Εικόνα 2.13	Γεωμετρία περίθλασης από αιχμηρό εμπόδιο. Με T συμβολίζεται ο πομπός και με R ο δέκτης, ενώ το αιχμηρό εμπόδιο εμποδίζει την διαδρομή οπτικής επαφής. [7]	37
Εικόνα 3.1	Ακίνητη πηγή – Ακίνητος παρατηρητής. [9]	44
Εικόνα 3.2	Ακίνητη πηγή – κινούμενος παρατηρητής. [9]	45
Εικόνα 3.3	Επικοινωνία μεταξύ δύο πομποδεκτών χωρίς να υπάρχει εμπόδιο μεταξύ τους (Line of Sight – LOS). [11]	47
Εικόνα 3.4	Επικοινωνία μεταξύ δύο πομποδεκτών όταν υπάρχει εμπόδιο μεταξύ τους (Non - Line of Sight – NLOS). [11]	48
Εικόνα 3.5	Ομοιόμορφη γραμμική στοιχειοκεραία. [14]	50
Εικόνα 3.6	Ομοιόμορφη ορθογωνική στοιχειοκεραία. [14]	51
Εικόνα 3.7	Μία γενική διαδικασία μοντελοποίησης ενός GBSCM. [16]	59
Εικόνα 3.8	Ένα SISO V2V μοντέλο αναφοράς δύο δαχτυλιδιών. [16]	61
Εικόνα 4.5.1	Καλύτερη επίδοση για 100 generations	71
Εικόνα 4.5.2	Καλύτερη επίδοση αντικειμενικής συνάρτησης για 1000 generations	72
Εικόνα 4.5.3	Καλύτερη επίδοση αντικειμενικής συνάρτησης για μέγεθος πληθυσμού 1000	73
Εικόνα 4.5.4	Καλύτερη επίδοση αντικειμενικής συνάρτησης για ρυθμό μετάλλαξης 0.05	74
Εικόνα 4.5.5	Καλύτερη επίδοση αντικειμενικής συνάρτησης για ρυθμό μετάλλαξης 0.05	74
Εικόνα 5.1	Γεωμετρία καναλιού στο matlab	76
Εικόνα 5.2	Αποστάσεις μεταξύ πομπών και δεκτών.	77
Εικόνα 5.3	Αποστάσεις μεταξύ Πομπού-RIS RIS-δέκτη	78
Εικόνα 5.4	Sum rate για όλες τις περιπτώσεις σε 200 εκτελέσεις του κώδικα	84
Εικόνα 5.5	Οπτικοποίηση του sum rate με χρήση cdf plot	85
Εικόνα 5.6	Οπτικοποίηση του SNR με χρήση cdf plot	86

Περίληψη

Στην εν λόγω διπλωματική εργασία εξετάζεται η απόδοση ενός συστήματος επικοινωνίας που χρησιμοποιεί Αναδιαμορφώσιμες Έξυπνες Επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces - RIS) με σκοπό τη βελτίωση του λόγου Σήματος προς Θόρυβο (Signal-to-Noise Ratio - SNR) και τη μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων (sum rate). Το περιεχόμενο της εργασίας ξεκινά με την εισαγωγή, όπου γίνεται αναφορά στη μετάβαση από την τεχνολογία 5G στην 6G. Η εξέλιξη αυτή χαρακτηρίζεται από νέες απαιτήσεις για ταχύτητα, αξιοπιστία και ευελιξία, καθώς και από την ανάγκη ενσωμάτωσης τεχνολογικών καινοτομιών όπως οι RIS.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά τις Αναδιαμορφώσιμες Έξυπνες Επιφάνειες, εξηγώντας τον τρόπο λειτουργίας τους και τις βασικές αρχές που τις διέπουν. Θα αναλυθούν τα χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες αυτών των επιφανειών στη βελτίωση της απόδοσης της ασύρματης επικοινωνίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο, ακολουθεί η μαθηματική μοντελοποίηση του καναλιού επικοινωνίας με RIS. Παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις και οι παράμετροι που περιγράφουν τη λειτουργία του συστήματος, προσφέροντας μια αναλυτική προσέγγιση για την κατανόηση του καναλιού.

Το τέταρτο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην ανάπτυξη και εφαρμογή ενός γενετικού αλγορίθμου για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων του συστήματος. Αναλύεται η διαδικασία της υλοποίησης του αλγορίθμου και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, γίνεται λεπτομερής ανάλυση του κώδικα που χρησιμοποιείται για τις προσομοιώσεις και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Η ανάλυση περιλαμβάνει γραμμή προς γραμμή επεξήγηση του κώδικα, συνοδευόμενη από στιγμιότυπα οθόνης για τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων και την ερμηνεία των ευρημάτων όσο αφορά το sum rate και το snr.

Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι να δημιουργηθεί ένα αναλυτικό πλαίσιο που θα εξηγεί τον κώδικα και τα αποτελέσματα με τρόπο που επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης των RIS στην απόδοση των ασύρματων δικτύων, προσδιορίζοντας τις βέλτιστες συνθήκες χρήσης του.

Abstract

In this thesis, we will examine the performance of a communication system that utilizes Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) to enhance the Signal-to-Noise Ratio (SNR) and maximize the sum rate. The content of the thesis begins with the introduction, where the transition from 5G to 6G technology is discussed. This transition is characterized by new requirements for speed, reliability, and flexibility, as well as the need to integrate technological innovations such as RIS.

In the second chapter, the theoretical background of Reconfigurable Intelligent Surfaces will be presented, explaining their operating principles and the fundamental concepts that govern them. The characteristics and capabilities of these surfaces in enhancing wireless communication performance will be analyzed.

The third chapter will follow with the mathematical modeling of the communication channel with RIS. The key equations and parameters that describe the system's behavior will be introduced, offering an analytical approach to understanding the channel dynamics.

The fourth chapter will focus on the development and application of a genetic algorithm to optimize the system's parameters. The implementation process of the algorithm will be detailed, and the results of the simulations will be presented.

In the fifth chapter, a detailed analysis of the code used for simulations will be conducted, along with a presentation of the results. This analysis will include a line-by-line explanation of the code, accompanied by screenshots for graphical representation and interpretation of the findings.

The purpose of this thesis is to create a comprehensive framework that explains the code and results in a way that facilitates a deeper understanding of how RISs impact the performance of wireless networks, identifying the optimal conditions for their use.

Κεφάλαιο 1^ο: Από το 5G στο 6G

1.1 Εισαγωγή στην τεχνολογία 5G

Η νέα γενιά τεχνολογιών επικοινωνίας, γνωστή ως 5G, προσφέρει ακόμη μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές, μειωμένη καθυστέρηση και τη δυνατότητα σύνδεσης πολλαπλών συσκευών ταυτόχρονα. Αυτό επιφέρει την εμφάνιση νέων εφαρμογών, όπως το Internet of Things (IoT), τα αυτόνομα οχήματα και η επαυξημένη πραγματικότητα. [1]

Αν και τα δίκτυα 4G έχουν σημειώσει μεγάλη πρόοδο στη μετάδοση δεδομένων στα πολυμέσα, όπως είναι το βίντεο, ο ήχος και οι εικόνες, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις, όπως για παράδειγμα, η υψηλή ταχύτητα μετάδοσης που απαιτείται από τις συνδέσεις συσκευών αλλά και αυξημένες απαιτήσεις μεταφοράς δεδομένων σε περιοχές με μεγάλο αριθμό χρηστών. Σε σύγκριση με το 4G, το 5G όχι μόνο θα ικανοποιήσει αυτές τις τεχνικές απαιτήσεις, αλλά μπορεί επίσης να υποστηρίξει τρία σημαντικά σενάρια επικοινωνίας:

- τη βελτιωμένη/ενισχυμένη ευρυζωνική σύνδεση κινητής τηλεφωνίας (enhanced mobile broadband – eMBB),
- τις μαζικές επικοινωνίες μηχανών (massive machine type communications – mMTC) και
- τις εξαιρετικά αξιόπιστες και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνίες (ultra-reliable and low latency communications – uRLLC).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα 5G δίκτυα προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές τεχνολογιών επικοινωνίας, όπως:

- αυξημένες ταχύτητες
- μειωμένη καθυστέρηση
- βελτιωμένη απόδοση σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα χρηστών και
- τη δυνατότητα σύνδεσης μεγάλου αριθμού συσκευών.

Αυτό επιτρέπει την εφαρμογή του 5G σε μια σειρά από εφαρμογές όπως:

- το Internet of Things (IoT),
- τα αυτόνομα οχήματα,
- εφαρμογές επαυξημένης και εικονικής πραγματικότητας, και πολλά άλλα.

Η τεχνολογία του 5G φέρνει πολλά οφέλη:

- αυξημένη παραγωγικότητα και αποτελεσματικότητα,
- βελτιωμένη εμπειρία χρήστη και ποιότητα ζωής, και
- νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες και καινοτομία.

Η 5G αντιμετωπίζει επίσης πολλές προκλήσεις, όπως:

- η ανάγκη για εκτεταμένη υποδομή δικτύου,
- η ανάγκη για συμβατότητα με τις προηγούμενες γενιές τεχνολογιών,
- η ανάγκη για ασφάλεια των δεδομένων και την προστασία της ιδιωτικότητας
- προκλήσεις σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας, την κάλυψη, την αξιοπιστία, το υψηλό κόστος υλοποίησης
- η κυβερνοασφάλεια και η προστασία δεδομένων αποτελούν επίσης σημαντικές προκλήσεις, καθώς το 5G φέρνει νέες απειλές και ευπάθειες. [1]

1.2 Εισαγωγή στην τεχνολογία 6G

Η ταχεία εξέλιξη των ασύρματων τεχνολογιών επικοινωνιών και η αυξημένη χρήση δεδομένων στα κινητά δίκτυα τα τελευταία χρόνια απαιτούν τη βελτίωση των δικτύων κινητών επικοινωνιών, προκειμένου να γίνουν πιο αποδοτικά και αξιόπιστα. Αν και τα 5G δίκτυα προσφέρουν υψηλές ταχύτητες, μεγαλύτερη χωρητικότητα, μειωμένη καθυστέρηση και βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση, οι αυξανόμενες απαιτήσεις για μαζική συνδεσιμότητα, χαμηλή καθυστέρηση και υψηλές ταχύτητες, καθώς και το κορεσμένο φάσμα συχνοτήτων, απαιτούν την ανάπτυξη μιας νέας γενιάς κινητών δικτύων. [1]

Η λύση για την αντιμετώπιση των αυξανόμενων απαιτήσεων είναι η επόμενη γενιά των κινητών επικοινωνιών, η έκτη γενιά (6G). Αν και τα δίκτυα αυτά βρίσκονται σε πολύ πρώιμο στάδιο έρευνας, υπόσχονται πραγματικά ολοκληρωμένες, αδιάλειπτες και αποδοτικές υπηρεσίες, με ριζικές καινοτομίες που θα ξεπεράσουν τα όρια των σημερινών δικτύων. Αναμένονται τεράστιες ταχύτητες δεδομένων της τάξης των terabit/δευτερόλεπτο, υπέρ-χαμηλές καθυστερήσεις κάτω του 1 millisecond, υποστήριξη για μαζική διασύνδεση τρισεκατομμυρίων συσκευών και εφαρμογή πιο αποδοτικών τεχνολογιών μετάδοσης. Ωστόσο, για να επιτευχθούν όλα αυτά, απαιτούνται καινοτομίες σε πολλαπλά επίπεδα του δικτύου, όπως η χρήση των terahertz επικοινωνιών, η εκμετάλλευση του αχρησιμοποίητου εύρους συχνοτήτων στις χιλιοστομετρικές συχνότητες καθώς και άνω των 100 GHz, σε

συνδυασμό με την υιοθέτηση προηγμένων ασύρματων τεχνικών όπως η μαζική MIMO και η ευφυής επεξεργασία σήματος μέσω τεχνητής νοημοσύνης [1].

Από το 2018, οι μελετητές έχουν αρχίσει να επικεντρώνονται στον ορισμό του 6G και στις εφαρμογές του. Με αυτόν τον ρυθμό, η βιομηχανία αναμένει ότι το 6G θα εισέλθει σε εμπορική χρήση γύρω στο 2030. Το 5G και το 6G αναπτύσσονται παράλληλα, αλλά το 6G απέχει ακόμα πολύ από την ανάπτυξη και χρήση. Με αναφορά στο 5G, υπάρχουν τέσσερα κύρια σενάρια επικοινωνίας στο 6G, ευρυζωνική κινητή λειτουργία και χαμηλή καθυστέρηση (mobile broad bandwidth and low latency – MBBL), μαζική ευρυζωνική επικοινωνία μηχανών (massive low-latency machine-type – mBBMT) και μαζική επικοινωνία μηχανών χαμηλής καθυστέρησης (massive low-latency machine-type – mLLMT) και 6G-Lite. Σε γενικές γραμμές, η παγκόσμια έρευνα για την τεχνολογία 6G βρίσκεται ακόμη σε διερευνητική φάση εκκίνησης και η συγκεκριμένη κατεύθυνση εφαρμογής είναι ακόμα ανοιχτή. [2]

Επιπλέον, με την άφιξη των 6G δικτύων, αναμένονται ριζικές αλλαγές που επηρεάζουν όχι μόνο τις δυνατότητες ευρυζωνικής πρόσβασης, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο αλληλοεπιδρούμε με τον κόσμο γύρω μας. Η ζωή και η εργασία θα υποστούν σημαντικές αλλαγές, καθώς νέες εφαρμογές θα αναπτυχθούν λόγω των υψηλών ταχυτήτων δεδομένων, της χαμηλής καθυστέρησης, της μεγάλης χωρητικότητας και της χρήσης προηγμένων τεχνολογιών όπως η τεχνητή νοημοσύνη και η ολογραφία. Κάποιες από τις καινοτόμες εφαρμογές και υπηρεσίες περιλαμβάνουν την Επαυξημένη και Εικονική Πραγματικότητα (AR/VR), τον τηλεχειρισμό και την (ολογραφική) τηλεπαρουσία, τη ρομποτική και τον αυτοματισμό, τα έξυπνα οχήματα και τις μεταφορές, την ενισχυμένη κινητικότητα και νέες εφαρμογές πολυμέσων.[1]

Γίνεται, λοιπόν, κατανοητό, ότι η εφαρμογή των δικτύων 6G θα επιφέρει πολλά οφέλη, όπως υψηλές ταχύτητες δεδομένων, βελτιωμένη συνδεσιμότητα και επαναστατικές εξελίξεις σε τομείς όπως η ιατρική, η αυτοκίνηση και η ψυχαγωγία. Ωστόσο, μαζί με αυτά τα οφέλη, υπάρχουν και σημαντικές οικονομικές, τεχνολογικές, κοινωνικές και ηθικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την υιοθέτηση του 6G με υπευθυνότητα και βιωσιμότητα. Ορισμένες από αυτές τις προκλήσεις περιλαμβάνουν την ασφάλεια και την κυβερνοασφάλεια, την προστασία δεδομένων, τη διαχείριση δικτύου και πόρων, καθώς και την ενέργεια και τη βιωσιμότητα. Τέλος, κοινωνικές προκλήσεις περιλαμβάνουν το ψηφιακό χάσμα, τις ηθικές και κοινωνικές επιπτώσεις, καθώς και τις αλλαγές στην αγορά εργασίας. [1]

1.3 Σύγκριση απόδοσης μεταξύ 5G και 6G

Σύμφωνα με το [2], τα κυψελωτά δίκτυα 5G είναι σημαντικά πιο προηγμένα από τα δίκτυα 4G σύμφωνα με μια σειρά από βασικές παραμέτρους απόδοσης (key performance indications– KPIs). Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τον μέσο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, στο 5G φτάνει τα 0,1 Gbps, που είναι 10 φορές ταχύτερο από το 4G. Επιπλέον, ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων στο 5G έχει επίσης αυξηθεί κατά 20 φορές από 1 Gbps στο 4G. Χάρη στην εισαγωγή του χιλιοστομετρικού φάσματος και της τεχνολογίας MIMO, η χωρητικότητα του δικτύου 5G είναι σχεδόν 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή του δικτύου 4G. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι η λανθάνουσα καθυστέρηση λόγω μετάδοσης μειώνεται από 10ms σε 1ms. Ως εκ τούτου, το χρονικό διάστημα μεταφοράς (transport time interval - TTL) στο σύστημα επικοινωνίας 5G είναι πολύ μικρό. Σε σύγκριση με το 5G, ορισμένες νέες τεχνολογίες θα εισαχθούν στο 6G ώστε να υποστηρίξουν τις υψηλές απαιτήσεις του μελλοντικού δικτύου μετά το 2030. Το δίκτυο 6G θα βελτιώσει τους αρχικούς δείκτες του 5G κατά 10 – 100 φορές. Συγκεκριμένα, ο ρυθμός δεδομένων θα ξεπερνά τα 100 Gbit/s στο 6G. Εντωμεταξύ, ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων θα αυξηθεί επίσης από 20 Gbit/s στο 5G σε 1 Tbit/s στο 6G. Επιπλέον, θα υπάρχουν δύο τύποι δεικτών στα κυψελωτά δίκτυα 6G, ο δείκτης που βασίζεται στην τεχνολογία και την απόδοση (π.χ. jitter - αστάθεια καθυστέρησης) και οι δείκτες βιωσιμότητας και κοινωνίας (π.χ. διαφάνεια, προσβασιμότητα, δικαιοσύνη σε όλους, κλπ). Έτσι, η βελτίωση των KPIs στο δίκτυο 6G θα επιταχύνει την ψηφιοποίηση της οικονομίας και της κοινωνίας.

Κεφάλαιο 2^ο: Εισαγωγή στην θεωρία

2.1 Reconfigurable Intelligent Surface - RIS

Οι Hongliang Z. et al., [6], αναφέρουν ότι σε σύγκριση με τα δίκτυα 5G, τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας 6G αναμένεται να παρέχουν πολύ υψηλότερη αποδοτικότητα φάσματος/ενέργειας/κόστους, υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, 10 φορές χαμηλότερο λανθάνοντα χρόνο, 100 φορές μεγαλύτερη πυκνότητα σύνδεσης, περισσότερη ευφυΐα για πλήρη αυτοματισμό, ακρίβεια γεωγραφικής θέσης (μικρότερη από εκατοστά), κάλυψη σχεδόν 100% και συγχρονισμός σε χιλιοστό του δευτερολέπτου.

Οι παραπάνω απαιτήσεις έφεραν τρεις βασικές προκλήσεις:

- Ισοζύγιο μεταξύ χαμηλού κόστους υλικού και υψηλής χωρικής ανάλυσης: Στις επικοινωνίες 5G, υπάρχουν τρεις τύποι τεχνικών για την επίτευξη υψηλής χωρικής ανάλυσης:
 - οι επικοινωνίες υψηλής συχνότητας: είναι ευκολότερη η δημιουργία στενών δεσμών ακτινοβολίας κεραιών στη ζώνη υψηλής συχνότητας, ωστόσο, απαιτούνται αποκλειστικές αλυσίδες ραδιοσυχνοτήτων (RF), των οποίων το κόστος αυξάνεται ραγδαία καθώς αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών.
 - τα μαζικά συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (massive MIMO): ένας τεράστιος αριθμός κεραιών με μετατόπιση φάσης η κάθε μία (για στενές δέσμες και πολλαπλούς χρήστες), επιφέρει σημαντικό κόστος στην ανάπτυξη του δικτύου.
 - η εξαιρετικά πυκνή δικτύωση: Ο συντονισμός μεταξύ των πυκνά αναπτυγμένων σταθμών βάσης (BS), μπορεί να επιτύχει υψηλή χωρική ανάλυση, ωστόσο απαιτεί εξαιρετικά υψηλό κόστος ανάπτυξης και συντονισμού. [6]
- Ισοζύγιο μεταξύ ευέλικτης ανάπτυξης δικτύου και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας: Εάν τα σημεία πρόσβασης (APs) ή τα BSs είναι σταθερά, όπως η επίγεια υποδομή, δεν υπάρχει εγγύηση προσαρμογής σε δυναμικές κινήσεις χρηστών, καθώς δεν είναι οικονομικά αποδοτική η ανάπτυξη άφθονων σημείων πρόσβασης για την υποστήριξη ακραίων καταστάσεων. Από την άλλη πλευρά, εάν τα APs/BSs κινούνται όπως τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV), απαιτείται επιπλέον κατανάλωση ενέργειας πρόωσης για αυτά τα κινητά Aps/BSs. [6]
- Διένεξη μεταξύ ευκολίας και ανίχνευσης υψηλής ακρίβειας: Η ανίχνευση και ο εντοπισμός είναι σημαντικές περιπτώσεις χρήσης στο μελλοντικό

6G. Μια πιθανή λύση είναι η ανάπτυξη συσκευών Internet-of-Things (IoT) για τη λήψη των αποτελεσμάτων ανίχνευσης. Ωστόσο, το μέγεθος αυτών των συσκευών συνήθως σχετίζεται αρνητικά με την ακρίβεια ανίχνευσης. Επομένως, το μη αμελητέο μέγεθος και το βάρος αυτών των συσκευών IoT επιφέρουν πρακτικά προβλήματα, ειδικά για εφαρμογές υγείας. Ένα άλλο πιθανό σχήμα είναι η υποβοηθούμενη από το MIMO ανίχνευση ραδιοσυχνοτήτων όπου τα αντικείμενα ανιχνεύονται με την αναγνώριση της επίδρασης των αντικειμένων στα ασύρματα σήματα (Joint Communications and Sensing). Ωστόσο, τα ανεπιθύμητα και μη ελεγχόμενα περιβάλλοντα διάδοσης σήματος οδηγούν σε χαμηλή ακρίβεια ανίχνευσης. [6]

Ως εκ τούτου, οι καινοτόμες αναδυόμενες τεχνολογίες πρέπει να είναι ταυτόχρονα χαμηλού κόστους στην κατασκευή, να έχουν εύκολη και ευέλικτη ανάπτυξη και να είναι συμβατές με τις απαιτήσεις 6G σε υπηρεσίες επικοινωνιών και ανίχνευσης. Ευτυχώς, οι πρόσφατες εξελίξεις στα μετα-υλικά έδωσαν μια τέτοια ευκαιρία.

Σύμφωνα με το [6], οι αναδιαμορφώσιμες έξυπνες επιφάνειες (RIS), επίσης γνωστές ως μεγάλες ευφυείς επιφάνειες, που αποτελούνται από μια σειρά από στοιχεία μετα-υλικών, έχουν δείξει την ικανότητά τους να αντιμετωπίζουν τις παραπάνω προκλήσεις και να προσδίδουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Οι RISs είναι οικονομικά αποδοτικές στην κατασκευή και την εγκατάσταση: είναι κατασκευασμένες από μετα-υλικά, τα οποία είναι **σχεδόν παθητικές συσκευές**. Με άλλα λόγια, δεν απαιτούν επιπλέον κυκλώματα ή ισχύ για την επεξεργασία σημάτων. Από την άλλη πλευρά, οι RIS μπορούν να κατασκευαστούν σε διαφορετικά σχήματα, και να ενσωματωθούν, ενδεικτικά, στις προσόψεις κτιρίων, σε εσωτερικούς τοίχους και σε διαφημιστικές πινακίδες στην άκρη του δρόμου, πράγμα που μπορεί να διευκολύνει την ανάπτυξη του 6G.
- Οι RIS μπορούν να ελέγχουν και να προσαρμόζουν ευνοϊκά τα περιβάλλοντα διάδοσης ραδιοκυμάτων: μπορούν να προσαρμόσουν τα περιβάλλοντα μετάδοσης σήματος ρυθμίζοντας τη φάση και το πλάτος των προσπίπτοντων σημάτων. Μέσω της εισαγωγής εικονικών συνδέσεων οπτικής επαφής (LoS), οι RIS μπορούν να ελέγχουν την ισχύ των λαμβανόμενων σημάτων σύμφωνα με τις απαιτήσεις της υπηρεσίας.
- Οι RIS είναι σε θέση να παρέχουν ανίχνευση υψηλής ακρίβειας: Λόγω της ικανότητας παροχής του ευνοϊκού περιβάλλοντος διάδοσης, οι RIS μπορούν να αυξήσουν τις διαφορές μεταξύ δύο γειτονικών αντικειμένων

στα ασύρματα σήματα, βελτιώνοντας έτσι την ανάλυση ανίχνευσης ραδιοσυχνοτήτων. [6]

Σύμφωνα με την αναφορά [4], οι αναδιαμορφώσιμες έξυπνες επιφάνειες (RIS) αποτελούν μια προγραμματιζόμενη κατασκευή επιφάνειας, ικανή να ελέγχει την ανάκλαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω της μεταβολής των ηλεκτρικών και μαγνητικών ιδιοτήτων της. Η «στρατηγική» τοποθέτησή τους στον ραδιοδίαυλο ανάμεσα σε έναν πομπό και έναν δέκτη επιτρέπει τον έλεγχο του τρόπου με τον οποίο το σήμα ανακλάται κατά τη διαδρομή του. Με τη χρήση των RIS, είναι δυνατή η κατεύθυνση του σήματος προς τον δέκτη, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η λήψη ή η ποιότητα της σύνδεσης.

Όπως επισημαίνεται, στα συμβατικά ασύρματα συστήματα, ο ραδιοδίαυλος αντιμετωπίζεται ως ένας παράγοντας που δεν ελέγχεται, προκαλώντας συνήθως αλλοιώσεις στα μεταδιδόμενα σήματα. Καθώς τα σήματα διέρχονται από διάφορες επιφάνειες, εμφανίζονται τυχαίες ανακλάσεις σε διάφορες κατευθύνσεις, προκαλώντας επικοινωνιακές ή καταστροφικές συμβολές. Η RIS έρχεται να δώσει λύση, επιτρέποντας τον έλεγχο των επιφανειών στον ραδιοδίαυλο και κατευθύνοντας τα εκπεμπόμενα σήματα σε μια προκαθορισμένη πορεία, ενισχύοντας την αξιοπιστία και την ενεργειακή αποδοτικότητα των ασύρματων δικτύων. Αυτή η τεχνολογία διευρύνει την εμβέλεια και επιτρέπει την παράκαμψη εμποδίων, παρέχοντας σήμα σε απομακρυσμένα ή δύσκολα προσβάσιμα σημεία.

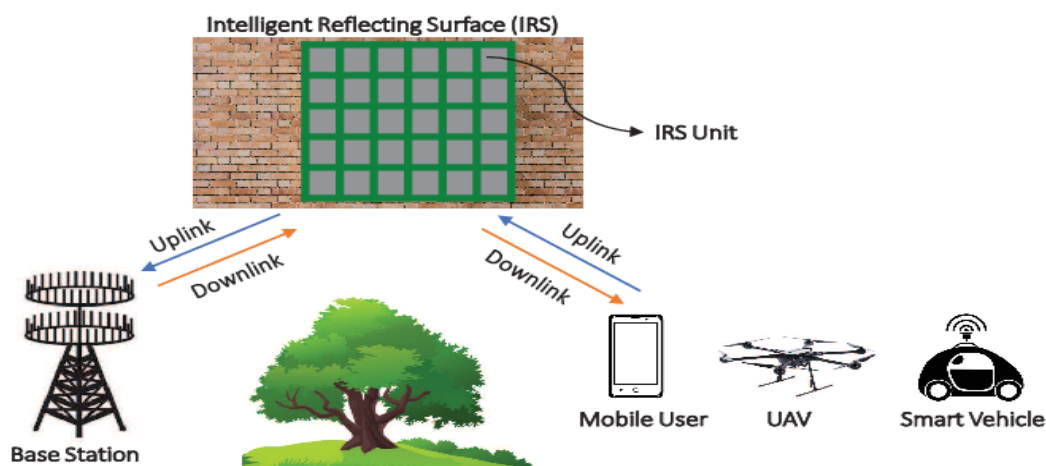
Επιπρόσθετα [4], υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι για την ανάπτυξη μιας RIS που επιτρέπει τον έλεγχο των χαρακτηριστικών των σημάτων και των μηχανισμών διάδοσης, δηλ. ανάκλαση, διάθλαση, απορρόφηση, εστίαση, πόλωση, κλπ. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται είτε σε συμβατικές στοιχειοκεραίες είτε σε μεταεπιφάνειες.

Μεταεπιφάνειες: Πρόκειται για ηλεκτρικά λεπτές και πυκνές δισδιάστατες συστοιχίες δομικών στοιχείων, των οποίων οι ιδιότητες καθορίζονται από τα επιμέρους «μετα-κύτταρα» ή «μετα-άτομα». Το μέγεθος κάθε τέτοιου κυττάρου είναι σημαντικά μικρότερο από το αντίστοιχο μήκος κύματος του σήματος. Εκτός από τον έλεγχο της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, οι μεταεπιφάνειες μπορούν να αξιοποιηθούν για σύνθετες λειτουργίες, όπως διαμόρφωση πληροφορίας ή/και εκτέλεση μαθηματικών διεργασιών. Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύουν ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς για σύντομα χρονικά διαστήματα [4].

Στοιχειοκεραίες (συστοιχίες κεραιών): Μια απλούστερη προσέγγιση για την ανάπτυξη RIS μπορεί να βασιστεί σε ηλεκτρικά συντονιζόμενες ανακλαστικές

συστοιχίες κεραιών, οι οποίες επιτρέπουν την ευέλικτη ρύθμιση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Έτσι, στο πλαίσιο μιας RIS, οι συγκεκριμένες στοιχειοκεραίες λειτουργούν ουσιαστικά ως «καθρέφτες» σημάτων. Επιπλέον, ένας μεγάλος αριθμός παθητικών στοιχείων κεραίας χαμηλού κόστους μπορεί να αξιοποιηθεί για τον σχηματισμό μιας RIS, καθώς αυτά τα στοιχεία αντανακλούν τα σήματα χωρίς να χρειάζεται η χρήση αλυσίδων ραδιοσυχνοτήτων (RF chains), όπως συμβαίνει στα παραδοσιακά συστήματα πολλαπλών εισόδων και πολλαπλής εξόδου (MIMO), όπου απαιτούνται πολλαπλές κεραίες για εκπομπή και λήψη.

Το ETSI, [5], αναφέρει ότι οι επαναδιαμορφώσιμες ευφυείς επιφάνειες (RIS) αντιστοιχούν σε μια επίπεδη επιφάνεια που αποτελείται από κυψέλες μονάδων, των οποίων οι ιδιότητες μπορούν να ελεγχθούν δυναμικά για να «συντονίσουν» τα προσπίπτοντα ασύρματα σήματα μέσω ανάκλασης, διάθλασης, εστίασης, ευθυγράμμισης, διαμόρφωσης ή απορρόφησης. Η RIS μπορεί ενδεχομένως να αναπτυχθεί για χρήση σε εσωτερικό χώρο όσο και για εξωτερική χρήση, συμπεριλαμβανομένων γραφείων, αεροδρομίων, εμπορικών κέντρων, φωτιστικών και διαφημιστικών πινακίδων, και μπορεί να πάρει οποιοδήποτε σχήμα ή να ενσωματωθεί σε αντικείμενα. Τα χαρακτηριστικά του μπορεί επίσης να οδηγήσουν σε χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, καθιστώντας τη RIS μια βιώσιμη τεχνολογική λύση. Η RIS μπορεί να διαμορφωθεί ώστε να λειτουργεί σε οποιοδήποτε μέρος του ραδιοφάσματος, συμπεριλαμβανομένων συχνοτήτων από κάτω από 6 GHz έως THz, και μπορεί να αξιοποιήσει εργαλεία Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning) (ML) και γενικά της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence) (AI) για να επιτρέψει τη βελτιστοποιημένη λειτουργία των συστημάτων. [5]



Εικόνα 2.1:Επαναδιαμορφώσιμη ευφυής επιφάνεια (RIS).[4]

Τα προβλεπόμενα σενάρια για εφαρμογές των RIS ποικίλλουν, από περιπτώσεις όπου μία μόνο RIS τοποθετείται σε τοίχο ώστε να κατευθύνει σήματα που

προέρχονται από μια προκαθορισμένη κατεύθυνση, π.χ. σταθμό βάσης, μέχρι την περιγραφή ενός περιβάλλοντος όπου καλύπτονται σχεδόν όλες οι επιφάνειες (τοίχοι, έπιπλα, ρούχα κ.λπ.) με RIS κατασκευασμένο με μετα-επιφάνεια. Κατά κύριο λόγο αναμένεται δομές RIS να χρησιμοποιηθούν για την εκτροπή των σημάτων προς την επιθυμητή κατεύθυνση.

2.1.1 Πώς λειτουργεί η αναδιαμορφώσιμη έξυπνη επιφάνεια;

Σύμφωνα με το [4], οι αναδιαμορφώσιμες έξυπνες επιφάνειες σε πρώτη φάση απορροφούν ένα σήμα που προσπίπτει αυτές, το οποίο σε δεύτερη φάση επεξεργάζεται από μικροελεγκτή και στη συνέχεια θα αναπαραχθεί πάλι ώστε να μεταδοθεί μέσω των στοιχειοκεραίων ή των μεταεπιφανειών προς επιλεγμένες διευθύνσεις. Έτσι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση της διαθεσιμότητας σημάτων κινητής τηλεφωνίας ή γεωεντοπισμού (Global Navigation Satellite System) GNSS σε περιοχές όπου δεν είναι φυσικά προσβάσιμα. Μπορεί να επιτευχθεί μέγιστη απόδοση του δικτύου, αξιοποιώντας τις εκτροπές των σημάτων ώστε να μειωθεί η απόσταση που διανύουν μέχρι τον δέκτη.

Σημειώνεται ότι σήματα σε υψηλές συχνότητες δεν μπορούν να διαδοθούν σε μεγάλες αποστάσεις ούτε να διαπεράσουν εμπόδια, σε αντίθεση με τα σήματα κάτω των 6 GHz που τυπικά χρησιμοποιούνται στα δίκτυα κινητής όπως το 3G, το 4G και το sub-6GHz 5G. Όμως στο 5G, και κατά κύριο λόγο στο 6G, αξιοποιούνται ζώνες συχνοτήτων που περιλαμβάνουν τη χιλιοστομετρική ζώνη (mmWave) και τα THz, καθιστώντας τα RISs ακόμη πιο απαραίτητα. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται η τεχνητή καθοδήγηση των σημάτων μέσω των έξυπνων επιφανειών, ώστε να φτάσουν στο εσωτερικό κτιρίων ή άλλων κατασκευών. Παράλληλα, σε ορισμένες περιπτώσεις κρίνεται σκόπιμο να εφαρμοστεί επιπλέον αλλαγή διαμόρφωσης καθ' όσον, η οποία μπορεί επίσης να υποστηριχθεί με τη χρήση RIS [4].

Η RIS προβλέπεται να είναι μια νέα αναδυόμενη ασύρματη τεχνολογία για τον έλεγχο των ραδιοσημάτων μεταξύ πομπού και δέκτη με δυναμικό και στοχευμένο τρόπο, μετατρέποντας το ασύρματο περιβάλλον σε υπηρεσία. Αυτό έχει παρακινήσει μια σειρά από πιθανές νέες περιπτώσεις χρήσης που στοχεύουν:

- i) στη βελτίωση των διαφόρων δεικτών-κλειδιά-απόδοσης συστήματος (KPI) και
- ii) στην υποστήριξη νέων εφαρμογών και δυνατοτήτων ασύρματης τεχνολογίας.

Αυτές περιλαμβάνουν βελτιώσεις στη χωρητικότητα, την κάλυψη, τη θέση, την ασφάλεια και τη βιωσιμότητα, καθώς και την υποστήριξη βελτιωμένης ανίχνευσης,

την ασύρματη μεταφορά ενέργειας και δυνατότητες χαρακτηρισμού ή χρήσης του περιβάλλοντος οπισθοσκέδασης (backscattering). [5]

2.1.2 Εφαρμογές RIS

Σύμφωνα με το [6], λόγω της ικανότητας ελέγχου του περιβάλλοντος διάδοσης, οι RIS έχουν δείξει τις δυνατότητές τους σε ποικίλες εφαρμογές. Οι τυπικές εφαρμογές των RIS μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ευρέως σε δύο τύπους: ασύρματες επικοινωνίες και τηλεπισκόπηση/ανίχνευση μέσω ραδιοσυχνοτήτων.

2.1.2.1 Ασύρματες Επικοινωνίες

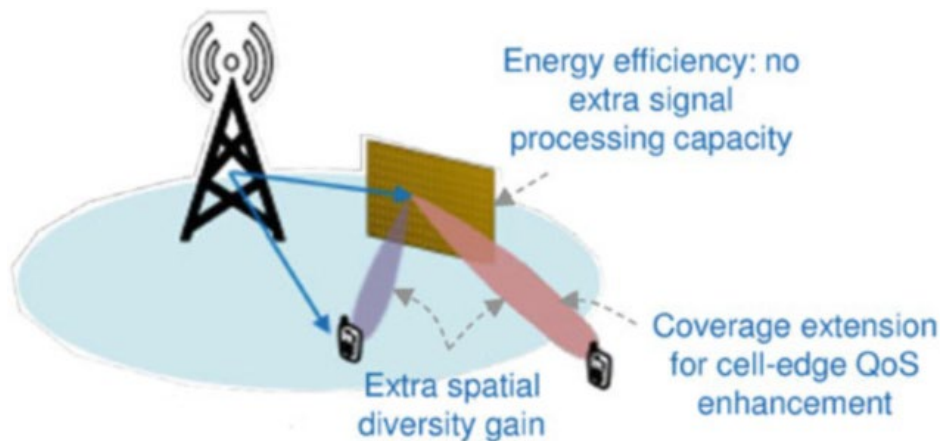
Αναφέρεται ότι οι RISs μπορεί να έχουν, μεταξύ άλλων, τις ακόλουθες εφαρμογές σε ασύρματες επικοινωνίες και δίκτυα (Δείτε Εικόνα 2.2) [6]:

- Βελτίωση της απόδοσης του φάσματος: Εφόσον κάθε στοιχείο RIS μπορεί να παρέχει μια επιπλέον σύνδεση επικοινωνίας, η RIS μπορεί να προσφέρει επιπλέον κέρδος χωρικής διαφοροποίησης εκμεταλλευόμενη αυτά τα κανάλια.

- Επέκταση κάλυψης: Με την τοποθέτηση της RIS στο άκρο της κυψέλης ή κοντά στη νεκρή ζώνη, δηλαδή την περιοχή στην οποία η ποιότητα των υπηρεσιών (Quality of Services – QoS) των απευθείας συνδέσεων μεταξύ των χρηστών και του σταθμού βάσης (Base Station – BS) δεν είναι ικανοποιητική, η RIS μπορεί να χρησιμεύσει ως παθητικός αναμεταδότης (relay) για προώθηση σημάτων σε αυτούς τους χρήστες.

- Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης: Δεδομένου ότι η ανάπτυξη των RIS δεν απαιτεί επιπλέον ενεργό υλικό (που καταναλώνει ενέργεια), οι RISs αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο που μπορεί να βελτιώσει τις ενεργειακές επιδόσεις, ενώ παράλληλα αυξάνει τον ρυθμό δεδομένων διατηρώντας παράλληλα την ίδια ποσότητα κατανάλωσης ενέργειας.

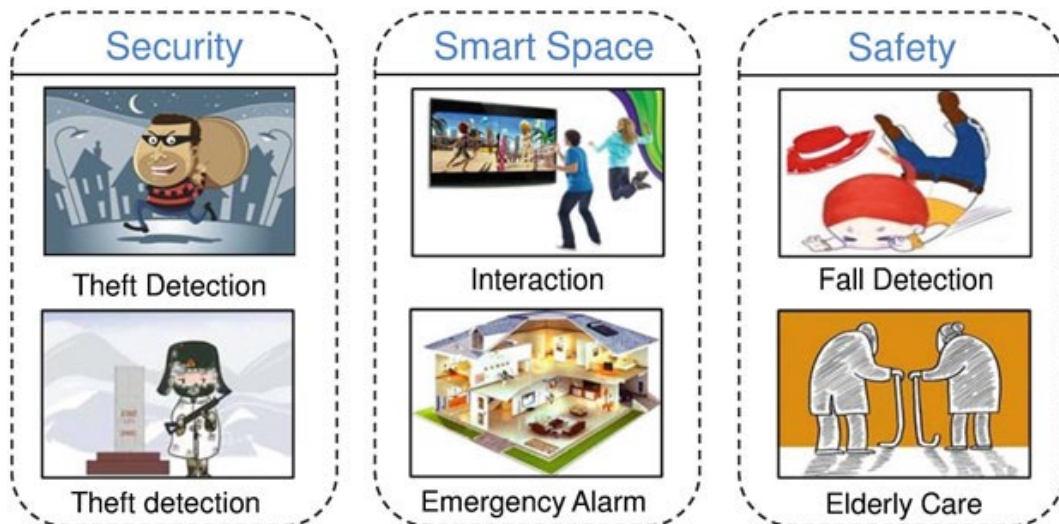
Επιπλέον, στο [6] αναφέρεται, ότι από την άλλη πλευρά, όταν επιλεγθούν οι μετατοπίσεις φάσης των στοιχείων της RIS, η RIS θα είναι διαφανής για το BS και τους χρήστες. Με άλλα λόγια, μια RIS θα είναι συμβατή με τις υπάρχουσες τεχνικές ή συστήματα επικοινωνίας, και έτσι, είναι δυνατό να ενσωματωθεί με υπάρχουσες τεχνικές επικοινωνίας.



Εικόνα 2.2: Εφαρμογές της RIS για ασύρματες επικοινωνίες. [6]

2.1.2.2 Ανίχνευση RF

Το περιβάλλον μας αυτή την εποχή καλύπτεται από ασύρματα σήματα. Αυτά τα πανταχού παρόντα σήματα παρέχουν ευκαιρίες για τηλεπισκόπηση/ανίχνευση μέσω ραδιοσυχνοτήτων, χωρίς να απαιτείται οπτική επαφή με τους ανιχνευόμενους στόχους. Σύμφωνα με την Εικόνα 2.3, η ανίχνευση μέσω ραδιοσυχνοτήτων έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στην μυστικότητα, τον έξυπνο χώρο και την ασφάλεια. Ορισμένες παραδοσιακές μέθοδοι στην ανίχνευση μέσω ραδιοσυχνοτήτων, όπως η ανίχνευση WiFi και το ραντάρ mmWave (χιλιοστομετρικών συχνοτήτων), χρησιμοποιούν την πρόσκρουση του στόχου σε σήματα WiFi ή δέσμες mmWave, όπου η ακρίβεια ανίχνευσης περιορίζεται από τις συνθήκες του καναλιού. Οι RISs έχουν δείξει την ικανότητά τους να προσαρμόζουν το περιβάλλον διάδοσης που μπορεί να βελτιώσει περαιτέρω την ακρίβεια ανίχνευσης. Με την αλλαγή των μετατοπίσεων φάσης της RIS, οι διαφορές μεταξύ της πρόσκρουσης δύο γειτονικών αντικειμένων ή μπλοκ αντικειμένων στα ασύρματα σήματα μπορούν να βελτιωθούν και έτσι να βελτιωθεί η ακρίβεια ανίχνευσης. Η ίδια ιδέα μπορεί εύκολα να επεκταθεί στην περίπτωση χρήσης όπου χρησιμοποιούνται ασύρματα σήματα για εντοπισμό και τηλεπισκόπηση (radar).



Εικόνα 2.3: Εφαρμογές της RIS για ανίχνευση ραδιοσυχνοτήτων. [6]

2.1.2.3 Βασικές αρχές ασύρματων επικοινωνιών με τη βοήθεια RIS

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένες βασικές αρχές που σχετίζονται με τις ασύρματες επικοινωνίες με τη βοήθεια RIS, όπως είναι η απόκριση RIS στα σήματα πρόσπτωσης και στα μοντέλα καναλιών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιηθεί ο ανακλαστικός τύπος, ενώ για βιβλιογραφικούς σκοπούς αναφέρονται επίσης ο μεταδοτικός και ο υβριδικός τύπος.

2.1.2.3.1 Ανακλαστικός τύπος

Σύμφωνα με την Εικόνα 2.4, έστω x το προσπίπτον σήμα και y το ανακλώμενο σήμα μέσω ενός στοιχείου RIS. Ως εκ τούτου, ισχύει:

$$y = \Gamma \cdot e^{-j\theta} \cdot x$$

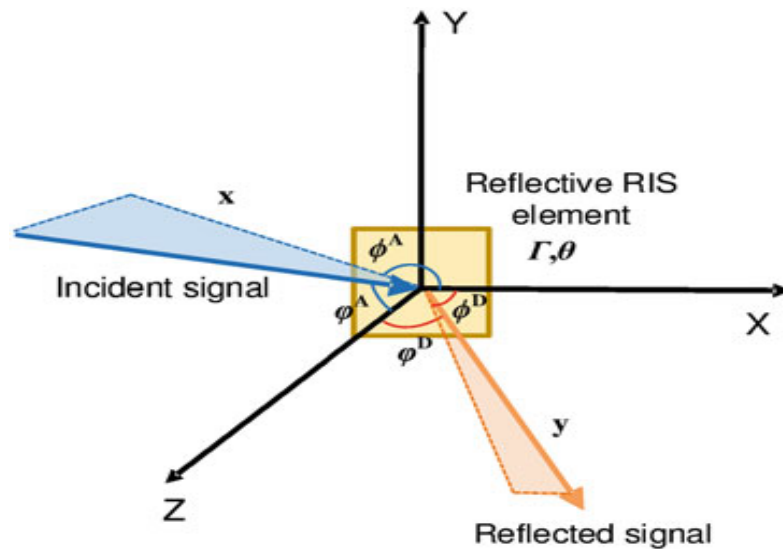
όπου

- j : είναι η φανταστική μονάδα, δηλαδή $j^2 = -1$.
- $\Gamma \in [0, 1]$: είναι το πλάτος της απόκρισης RIS όπου $\Gamma = 1$ υποδηλώνει ότι τα προσπίπτοντα σήματα ανακλώνται πλήρως ενώ $\Gamma = 0$ σημαίνει ότι τα σήματα απορροφώνται πλήρως.

Με άλλα λόγια, η απόκριση ενός ανακλαστικού στοιχείου RIS μπορεί να γραφτεί ως:

$$n = \Gamma \cdot e^{-j\theta}$$

Επομένως, έχοντας πληροφορία των (Γ, θ) , από την τελευταία εξίσωση μπορεί να υπολογιστεί η απόκριση ενός ανακλαστικού στοιχείου RIS.



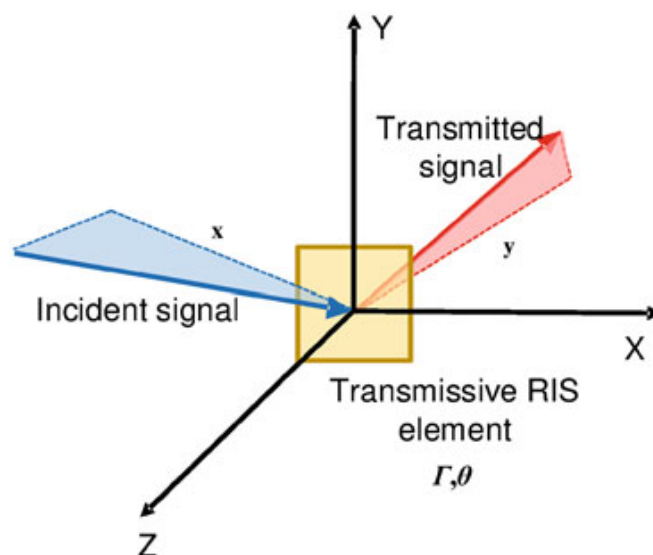
Εικόνα 2.4: Εικονογραφήσεις για την απόκριση ενός ανακλαστικού στοιχείου RIS. [6]

2.2.1.1.1 Μεταδοτικός Τύπος

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.5, παρόμοια με τον ανακλαστικό τύπο, η απόκριση ενός μεταδοτικού στοιχείου RIS μπορεί επίσης να εκφραστεί με τη μορφή:

$$n = \Gamma \cdot e^{-j\theta}$$

Η μόνη διαφορά είναι ότι τα προσπίπτοντα σήματα διεισδύουν πλήρως στο στοιχείο RIS όταν $\Gamma = 1$. [6]



Εικόνα 2.5: Εικονογραφήσεις για την απόκριση ενός μεταδοτικού στοιχείου RIS. [6]

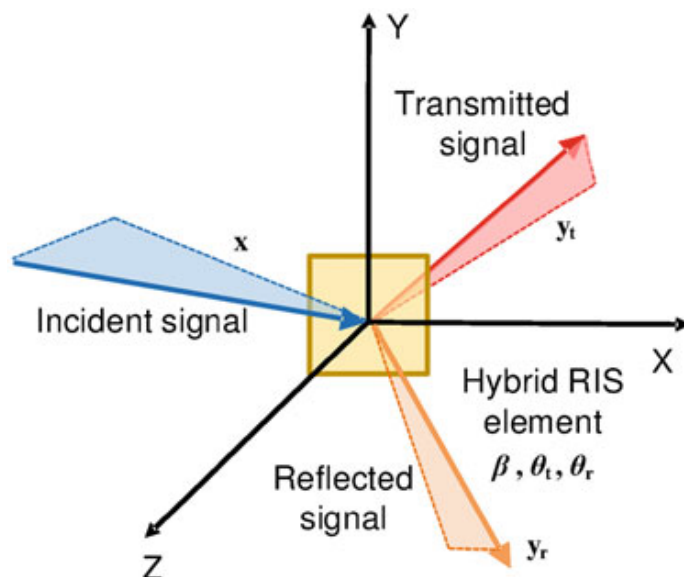
2.2.1.1.2 Υβριδικός τύπος

Σύμφωνα με το [6], το υβριδικό στοιχείο RIS έχει τη λειτουργία τόσο των ανακλαστικών όσο και των μεταδοτικών τύπων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6. Επομένως, η RIS θα χωρίσει πρώτα την ενέργεια των προσπίπτοντων σημάτων σε δύο μέρη: στην ενέργεια για τα σήματα που μεταδίδονται (μέσω αυτής) και στην ενέργεια για τα ανακλαστικά σήματα. Στο [6], για να ποσοτικοποιήσουν τον ενεργειακό διαχωρισμό, εισάγουν μια μετρική $\beta \in [0, +\infty)$, η οποία είναι η αναλογία ισχύος των ανακλώμενων σημάτων προς τα μεταδιδόμενα σήματα. Επομένως, με την υπόθεση της μη διαρροής ενέργειας για αναμετάδοση σήματος, η απόκριση των στοιχείων RIS στα ανακλώμενα και μεταδιδόμενα σήματα μπορούν να εκφραστούν αντίστοιχα. Από τις εξισώσεις:

$$n_r = \sqrt{\frac{\beta}{1+\beta}} \cdot e^{-j\theta_r}$$

$$n_t = \sqrt{\frac{\beta}{1+\beta}} \cdot e^{-j\theta_t}$$

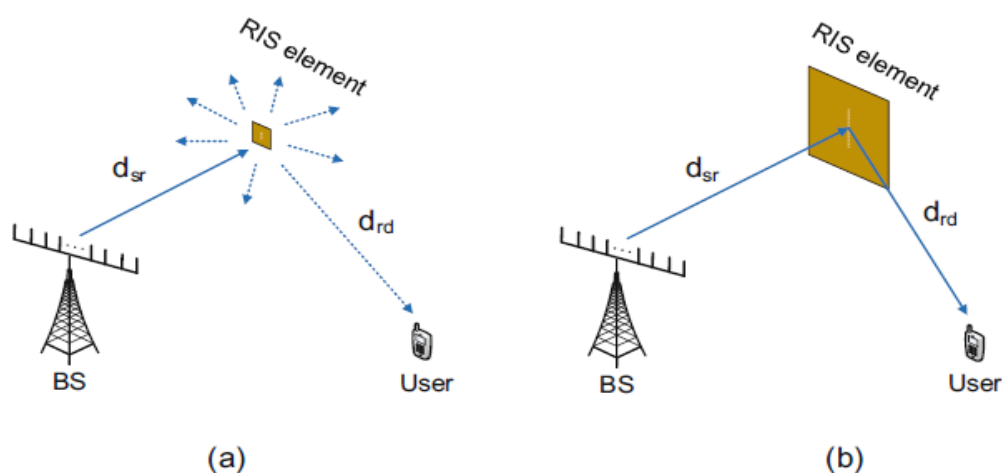
Συμπεραίνεται ότι ο υβριδικός τύπος θα μετατραπεί στον ανακλαστικό τύπο για $\beta = +\infty$ και στον μεταδοτικό τύπο όταν $\beta = 0$. Επίσης, επισημαίνεται ότι η μετατόπιση φάσης μεταξύ προσπίπτοντος και ανακλώμενου σήματος θ_r θα μπορούσε να είναι διαφορετική από τη μετατόπιση φάσης μεταξύ προσπίπτοντος και εκπεμπόμενου σήματος θ_t . Έτσι, έχοντας την πληροφορία των $(\beta, \theta_r, \theta_t)$ θα ήταν εφικτός ο υπολογισμός της συνολικής απόκρισης ενός υβριδικού στοιχείου RIS.



Εικόνα 2.6: Εικονογραφήσεις για την απόκριση ενός υβριδικού στοιχείου RIS. [6]

2.1.2.4 Μοντέλο απώλειας διαδρομής μεγάλης κλίμακας

Ένα σημαντικό ζήτημα που σχετίζεται με τη μοντελοποίηση καναλιών είναι ο τρόπος μοντελοποίησης των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας ή απωλειών διαδρομής διάδοσης από έναν πομπό σε έναν δέκτη μέσω της RIS. Έστω ένα στοιχείο RIS όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7:Επιδράσεις υλοποίησης σε απώλεια διαδρομής μεγάλης κλίμακας: (a) Ηλεκτρικά μικρό μέγεθος. (b) Ηλεκτρικά μεγάλο μέγεθος. [6]

Στο [6], αναφέρεται ότι στην περίπτωση που το στοιχείο έχει μικρό μέγεθος, (Εικόνα 2.7a), το στοιχείο λειτουργεί ως διάχυτη διασπορά. Συγκεκριμένα, λαμβάνει μόνο ένα σημείο στο προσπίπτον μέτωπο κύματος και στη συνέχεια το διασκορπίζει διάχυτα προς όλες τις κατευθύνσεις γύρω από το στοιχείο με αποτέλεσμα περαιτέρω απώλεια ισχύος προς τον δέκτη. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση που το στοιχείο έχει μεγάλο μέγεθος, (Δείτε Εικόνα 2.7b), κάθε στοιχείο λειτουργεί ως λείος ανακλαστήρας. Λαμβάνει ένα τμήμα του προσπίπτοντος μετώπου κύματος και το ανακατευθύνει σύμφωνα με μια προγραμματιζόμενη γωνία ανάκλασης. Δεν υπάρχει περαιτέρω εξάπλωση του μετώπου κύματος στη RIS. Συνήθως αναφέρεται ως ανώμαλη ανάκλαση. Ως εκ τούτου, στην περίπτωση (b), η απώλεια διαδρομής μέσω του στοιχείου RIS θα είναι ανάλογη με τη συνολική απόσταση, $d_{sr} + d_{rd}$, δηλαδή:

$$PL_{reflected} \propto \frac{1}{(d_{sr} + d_{rd})^a}$$

όπου:

- a είναι ο εκθέτης απώλειας διαδρομής.

Στην περίπτωση (α), η απώλεια διαδρομής θα είναι ανάλογη με το γινόμενο των αποστάσεων, d_{sr} και d_{rd} , δηλαδή:

$$PL_{scattered} \propto \frac{1}{(d_{sr} \cdot d_{rd})^a}$$

Είναι προφανές ότι η διαφορά στην απώλεια διαδρομής μεταξύ των δύο περιπτώσεων μπορεί να είναι τεράστια. Παρόλο που η περίπτωση (b) μπορεί να παρέχει καλύτερη οδό για τις επικοινωνίες μακρινών αποστάσεων, η περίπτωση (α) μπορεί να προσφέρει περισσότερη ελευθερία και υψηλότερη χωρική ανάλυση λόγω περισσότερων στοιχείων και μπορεί να εφαρμοστεί σε σταθερό χώρο, και επομένως υιοθετείται ευρέως σε πρακτικές εφαρμογές.

2.1.2.5 Μοντέλο καναλιού Δυαδικής Οπισθοσκέδασης (Dyadic Backscatter)

Κάθε στοιχείο στη RIS τυπικά μπορεί να θεωρηθεί ως μια κανονική ομοιοκατευθυντική διασπορά που υπόκειται στις επιπτώσεις της εξασθένησης και υπάρχει η δυνατότητα χρήσης του λεγόμενου καναλιού δυαδικής οπισθοσκέδασης για να μοντελοποιηθεί το κανάλι μέσω της RIS. Χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο, η απόκριση του καναλιού μέσω της RIS, η H_{RIS} , μπορεί να γραφτεί ως

$$H_{RIS} = F \cdot Q \cdot G$$

όπου:

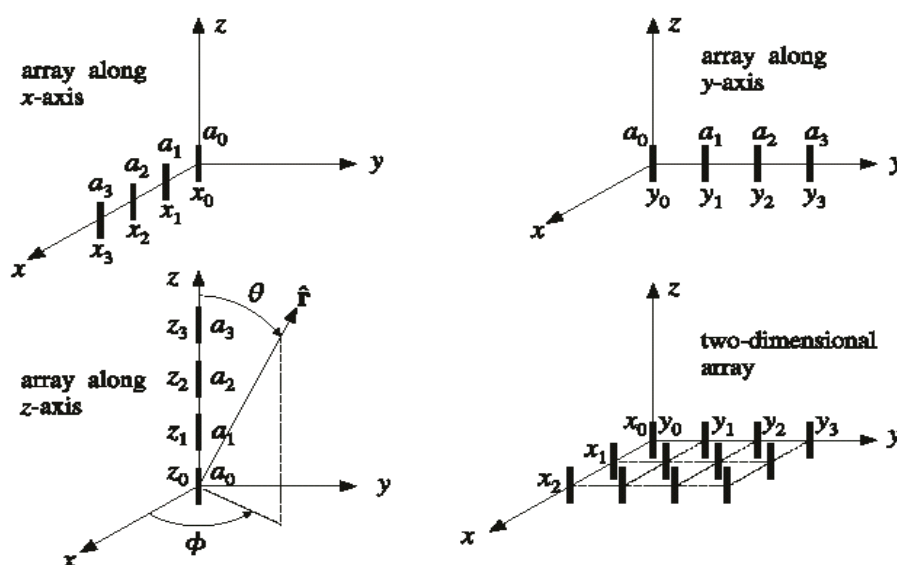
- F είναι το κανάλι από τη RIS στο δέκτη,
- G είναι το κανάλι από τον πομπό στη RIS.
- Ο πίνακας, Q, αντιπροσωπεύει την αλληλεπίδραση της RIS με τη μεταδιδόμενη κυματομορφή. Υποθέτοντας ότι δεν υπάρχει σύζευξη μεταξύ των στοιχείων RIS, το Q θα πρέπει να είναι διαγώνιος πίνακας του οποίου το διαγώνιο στοιχείο θα πρέπει να είναι η απόκριση κάθε στοιχείου.

Από την τελευταία εξίσωση, για οποιαδήποτε υποτιθέμενη στατιστική κατανομή για τα στοιχεία των G και F, η συνολική κατανομή καναλιών θα δίνεται από την κατανομή των γινομένων τους. Γενικά, αυτό το είδος διαδοχικής διάλειψης είναι γνωστό ότι έχει πιο επιζήμια αποτελέσματα στην απόδοση σε σύγκριση με την απλή κανονική διάλειψη. Ωστόσο, η αύξηση του αριθμού των στοιχείων RIS βελτιώνει τα χαρακτηριστικά διαλείψεων (fading).

2.2 Στοιχειοκεραίες

Κατά κανόνα, τα μεμονωμένα κεραιοστοιχεία έχουν διαγράμματα ακτινοβολίας που παρουσιάζουν χαμηλή κατευθυντικότητα. Σε πολλές εφαρμογές όμως, που π.χ. υλοποιούν ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων, απαιτείται υψηλή κατευθυντικότητα. Αύξηση αυτής μπορεί να πραγματοποιηθεί αν μεγαλώσουμε τις ηλεκτρικές διαστάσεις του ακτινοβολητή (π.χ. αύξηση του $L = \frac{l}{\lambda}$), αλλά και αυτή η προσέγγιση παρουσιάζει κάποια όρια και μειονεκτήματα, όπως την εμφάνιση δευτερευόντων λοβών ή την υπερβολική αύξηση του μεγέθους των κεραιών. [3]

Μια εναλλακτική και αποδοτική μέθοδος για την δημιουργία κατευθυντικών κεραιών εκπομπής και λήψης, είναι η χρήση πολλαπλών κεραιοστοιχείων, σχεδιασμένα ώστε να έχουν κατάλληλα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και τοποθετημένα σε κατάλληλα επιλεγμένη γεωμετρική διάταξη. Η ιδέα είναι να τοποθετηθούν οι κεραίες έτσι ώστε να παράγουν ενισχυτική υπέρθεση σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση και να αναιρούνται μεταξύ τους σε άλλες κατευθύνσεις. Αυτό το σύστημα κεραιών ονομάζεται στοιχειοκεραία και συνήθως αποτελείται από κεραίες του ίδιου τύπου για ευκολότερη σχεδίαση και κατασκευή. [3]



Εικόνα 2.8: Τυπικές διατάξεις στοιχειοκεραιών.

Η διαμόρφωση του διαγράμματος ακτινοβολίας σε μια στοιχειοκεραία συναρτάται πρωτίστως με ορισμένους βασικούς παράγοντες:

- Το επιμέρους διάγραμμα ακτινοβολίας των ανεξάρτητων στοιχείων της.
- τη γεωμετρική διάταξη (π.χ. γραμμική, κυκλική, σφαιρική),

- τη μεταξύ τους απόσταση,
- καθώς και το πλάτος ή/και τη φάση του ρεύματος που διεγείρει τα κεραιοστοιχεία.

Μια στοιχειοκεραία αποτελείται από N αυτόνομους δέκτες, οι οποίοι τοποθετούνται ώστε να σχηματίζουν ένα συγκεκριμένο γεωμετρικό σχήμα. Λόγω της διάταξης αυτής, το ηλεκτρικό της μέγεθος υπερβαίνει εκείνο ενός μόνο δέκτη, με αποτέλεσμα τη δημιουργία εξαιρετικά κατευθυντικών διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Παράλληλα, η πολλαπλότητα των δεκτών επιτρέπει να επιτευχθεί ενδεδειγμένος έλεγχος του διαγράμματος, ώστε να μειωθούν οι πλευρικοί λοβοί και να εισαχθούν μηδενισμοί ή μέγιστα σε επιλεγμένες διευθύνσεις.

Το συνολικό πεδίο εκπομπής ή λήψης προκύπτει από την αλληλεπίδραση του διαγράμματος ακτινοβολίας κάθε στοιχείου με τον λεγόμενο «array factor» (παράγοντας συστοιχίας), ο οποίος αντικατοπτρίζει τη χωρική απόκριση στα λαμβανόμενα σήματα και συναρτάται στενά με τη γεωμετρική σχέση των στοιχείων. Για να διαμορφωθούν κατευθυντικά διαγράμματα, είναι απαραίτητο τα πεδία των επιμέρους στοιχείων να ενισχύονται στις επιθυμητές κατευθύνσεις και να μειώνουν την ενέργεια που εκπέμπεται σε άλλες. Σε μια στοιχειοκεραία με ομοιόμορφα στοιχεία, πέντε βασικές παράμετροι ελέγχου διαμορφώνουν το συνολικό διάγραμμα ακτινοβολίας [7].

2.2.1 Ο αριθμός των στοιχείων της στοιχειοκεραίας

Ο αριθμός των κεραιών σε μια στοιχειοκεραία καθορίζει το πόσο ευέλικτο είναι το σύστημα στον έλεγχο της κατευθυντικότητας. Συγκεκριμένα, όταν υπάρχουν N στοιχεία, μπορούν να ελεγχθούν έως και $N-1$ σημεία όπου η ακτινοβολία μηδενίζεται (μηδενισμοί), ή να δημιουργηθούν συνολικά N κορυφές στο διάγραμμα ακτινοβολίας, είτε κύριες είτε δευτερεύουσες. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος πάνω στο πού εκπέμπεται ή αποκόπτεται το σήμα. [3]

2.2.2 Η σχετική απόσταση μεταξύ των στοιχείων

Η απόσταση μεταξύ των στοιχείων επηρεάζει τη συσχέτιση των ακτινοβολούμενων πεδίων τους. Αυτή η απόσταση σχετίζεται με το μέγεθος της στοιχειοκεραίας και υπολογίζεται σε μήκη κύματος και κατά συνέπεια της συχνότητας λειτουργίας. Η εφαρμογή για την οποία χρησιμοποιείται η στοιχειοκεραία παίζει ρόλο, με ορισμένες να απαιτούν μεγαλύτερες αποστάσεις για διαφορισιμότητα και άλλες μικρότερες για δέσμη διαμόρφωσης. Τέλος, ο

διαθέσιμος χώρος επηρεάζει επίσης την επιλογή απόστασης μεταξύ των στοιχείων [3].

2.2.3 Η γεωμετρική διάταξη της στοιχειοκεραίας συνολικά

Η γεωμετρία μιας στοιχειοκεραίας προκύπτει από τον τρόπο διάταξης των επί μέρους στοιχείων της. Παρότι οι ακριβείς θέσεις των στοιχείων μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τις απαιτήσεις, οι συνηθέστερες διαμορφώσεις είναι: (α) ευθύγραμμη διάταξη, (β) τοποθέτηση κατά μήκος της περιφέρειας ενός κύκλου (κυκλική στοιχειοκεραία) και (γ) επίπεδη διάταξη σε πλέγμα (π.χ. ορθογωνική). Η συγκεκριμένη γεωμετρία προσδιορίζει τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν τα πεδία που εκπέμπονται από τα στοιχεία και, κατά συνέπεια, επηρεάζει σημαντικά τα χαρακτηριστικά του διαγράμματος ακτινοβολίας. Ενδεικτικά, σε γραμμικές ή επίπεδες διατάξεις, όταν η μεταξύ των στοιχείων απόσταση υπερβαίνει το μήκος κύματος, δημιουργούνται περισσότεροι από έναν κύριοι λοβοί. Γι' αυτόν τον λόγο, οι γραμμικές στοιχειοκεραίες χρησιμοποιούνται κυρίως για τομεακή κάλυψη, ενώ οι κυκλικές ή εξαγωνικές διατάξεις εξασφαλίζουν αδιάλειπτη κάλυψη 360° [3].

2.2.4 Η διέγερση (πλάτος και φάση) των μεμονωμένων στοιχείων

Τα εισερχόμενα σήματα πολλαπλασιάζονται με έναν ειδικό συντελεστή, τον συντελεστή βάρους σε κάθε στοιχείο και στην συνέχεια προστίθενται ώστε να δημιουργηθεί το τελικό διάγραμμα ακτινοβολίας. Οι συντελεστές αυτοί συνήθως είναι μιγαδικοί αριθμοί, ώστε να μπορούν ταυτόχρονα να εκφράζουν το πλάτος και την καθυστέρηση χρόνου (φάση) του σήματος που λαμβάνει το κάθε στοιχείο ξεχωριστά. Τα βάρη διαχωρίζονται σε :

- Σταθερά : Τα διαγράμματα δημιουργούνται και παραμένουν σταθερά, όπως συμβαίνει στις κεραίες με εναλλασσόμενες δέσμες (switched beam antennas) παράγοντας όχι μόνο ένα και ταυτόσημα διαγράμματα ακτινοβολίας.
- Δυναμικά : Τα διαγράμματα σε αυτή την περίπτωση είναι μεταβλητά. Δηλαδή, προσαρμόζονται δυναμικά ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις σε πραγματικό χρόνο.

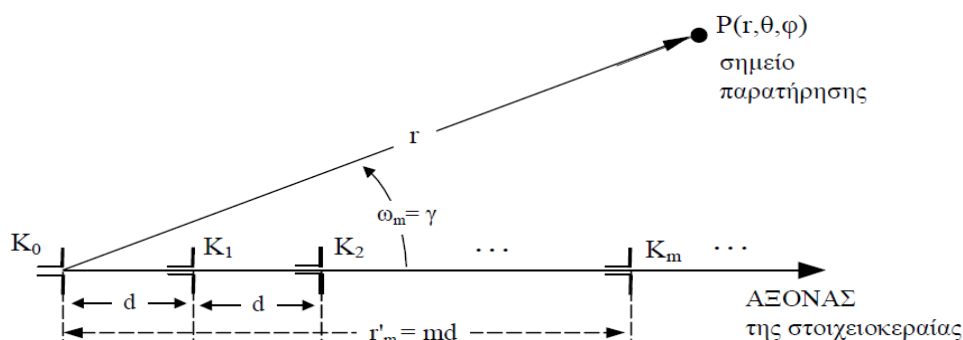
2.2.5 Βασική Θεωρία Στοιχειοκεραιών

2.2.5.1 Γενικά

Η συνδυασμένη λειτουργία πολλαπλών κεραιών που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους και εκπέμπουν το ίδιο σήμα μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση τόσο κατά την εκπομπή όσο και κατά τη λήψη. Επιπλέον, μια τέτοια διάταξη παρέχει χαρακτηριστικά που δεν είναι δυνατόν να επιτευχθούν με τη χρήση μιας μόνο κεραιάς. Το αποτέλεσμα αυτό προκύπτει μέσω της κατάλληλης επιλογής του τύπου των κεραιών, της γεωμετρικής διάταξης και του τρόπου τροφοδοσίας τους και διέγερση τους, σχηματίζοντας έτσι μια σύνθετη διάταξη που ονομάζεται στοιχειοκεραία ή συστοιχία κεραιών. Συνήθως, οι κεραιές που απαρτίζουν τη συστοιχία είναι όμοιες μεταξύ τους και έχουν κοινό προσανατολισμό

2.2.5.2 Γραμμικές Στοιχειοκεραίες

Ονομάζονται γραμμικές στοιχειοκεραίες εκείνες που έχουν όλα τα στοιχεία τους τοποθετημένα πάνω σε μια ευθεία, με σταθερή απόσταση d μεταξύ τους. Αυτή η μορφή στοιχειοκεραίας είναι απλή αλλά πολύ χρήσιμη, και η γεωμετρία της παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.9. Στο σχήμα, το πρώτο στοιχείο της στοιχειοκεραίας λαμβάνεται ως αρχή των συντεταγμένων [3].



Εικόνα 2.9: Γραμμική στοιχειοκεραία.

Σε αυτή την περίπτωση, για κάθε στοιχείο K_m της διάταξης, η γωνία ω_m συμπίπτει με τη γωνία γ , που σχηματίζει το διάνυσμα θέσης ενός αυθαίρετου σημείου παρατήρησης P με τον άξονα αναφοράς της στοιχειοκεραίας. Παράλληλα, η απόσταση r'_m του κάθε στοιχείου είναι ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του βήματος d , το οποίο ορίζεται ως:

$$r'_m = md, \quad m = 0, 1, 2, \dots, M-1$$

όπου M ο αριθμός των κεραιοστοιχείων της συστοιχίας.

Επιπλέον, συχνά παρατηρείται μια σταθερή διαφορά φάσης μεταξύ των ρευμάτων που τροφοδοτούν διαδοχικά στοιχεία της διάταξης. Σε αυτήν την περίπτωση, οι συντελεστές που καθορίζουν την ένταση των ρευμάτων για κάθε στοιχείο μπορούν να εκφραστούν γενικά με τη μορφή:

$$C_m = A_m e^{j \cdot m \cdot \delta}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, M - 1$$

όπου

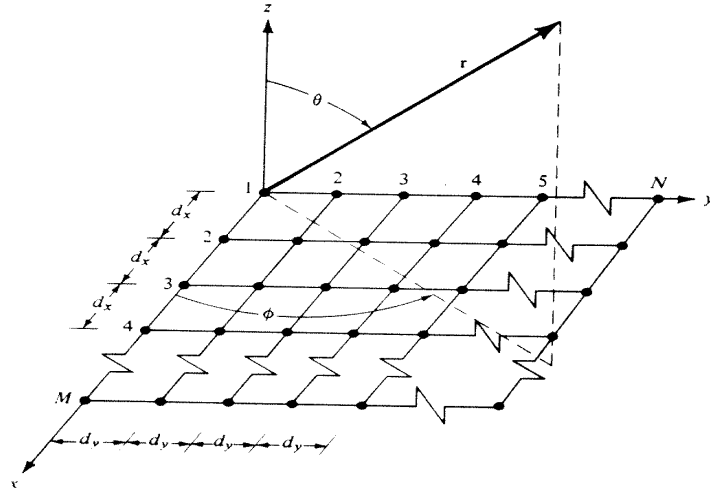
- δ : η σταθερή διαφορά φάσης μεταξύ των ρευμάτων διαδοχικών στοιχείων a_n και
- A_m : οι ρευματικοί συντελεστές που εφαρμόζονται σε κάθε σήμα που διαρρέει την εκάστοτε κεραία, οι οποίοι μπορεί να είναι είτε πραγματικοί είτε μιγαδικοί.

2.2.5.3 Ομοιόμορφες γραμμικές στοιχειοκεραίες

Οι γραμμικές στοιχειοκεραίες ονομάζονται ομοιόμορφες όταν όλα τα στοιχεία τους τροφοδοτούνται με ρεύματα ίσου πλάτους. Συγκεκριμένα, οι ρευματικοί συντελεστές για κάθε στοιχείο είναι ίσοι : $A_0 = \dots = A_m = \dots = A_{M-1} = A$. Η μοναδική διαφορά μεταξύ των ρευμάτων είναι η σταθερή διαφορά φάσης δ μεταξύ κάθε ζευγαριού στοιχείων.

2.2.5.4 Ορθογωνική συστοιχία Κεραιών

Οι επίπεδες συστοιχίες παρέχουν συμμετρικά σχέδια με χαμηλούς πλευρικούς λοβούς και πολύ υψηλή κατευθυντικότητα σε σχέση με τα μεμονωμένα στοιχεία τους. Αρχικά, μπορούν να κατευθύνουν την κύρια δέσμη προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Αυτού του είδους οι κεραίες είναι κυρίως χρήσιμες σε παρακολούθηση ραντάρ, τηλεπισκόπηση, επικοινωνίες και άλλες εφαρμογές.



Εικόνα 2.10: Ορθογωνική στοιχειοκεραία.

Ο παράγοντας κεραίας (ArrayFactor - AF) για μια γραμμική συστοιχία στοιχείων M κατά μήκος του άξονα x ορίζεται ως εξής:

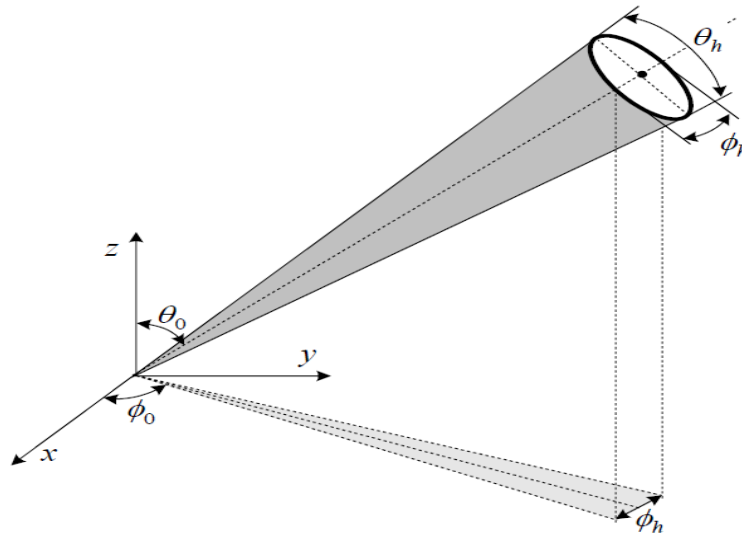
$$AF_{x1} = \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j \cdot (m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)}$$

όπου

- $\sin \theta \cos \phi = \cos \gamma_x$ είναι το κατευθυντικό συνημίτονο σε σχέση με τον άξονα x , με την γωνία γ_x να αντιπροσωπεύει την γωνία μεταξύ του διανύσματος r και του άξονα x . Κάθε στοιχείο της κεραίας απέχει από το προηγούμενο κατά απόσταση d_x και έχει μια σταθερή μετατόπιση φάσης β_x .
- Η παράμετρος I_{m1} εκφράζει το πλάτος της διέγερσης για το στοιχείο που βρίσκεται στη θέση με συντεταγμένες: $x = (m-1)d_x$, $y = 0$. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.10, το στοιχείο αυτό ανήκει στη m -οστή γραμμή και στην πρώτη στήλη της συστοιχίας. Σημειώνεται ότι η 1^η γραμμή αντιστοιχεί σε $x = 0$. [3]

Όταν N συστοιχίες τοποθετηθούν σε ζυγές αποστάσεις κατά μήκος του άξονα y , σχηματίζεται ένας ορθογώνιος πίνακας. Θεωρούμε ότι οι αποστάσεις μεταξύ των στοιχείων είναι ίσες και ισούνται με d_y ενώ η μετατόπιση φάσης κατά μήκος κάθε σειράς είναι β_y . Η κατανομή ρεύματος κατά μήκος των στοιχείων κάθε σειράς είναι κανονικοποιημένη, ενώ οι απόλυτες τιμές του πλάτους ρεύματος σε κάθε πίνακα αντιστοιχούν στον συντελεστή I_{1n} ($n = 1, \dots, N$).

Το πλάτος δέσμης μίας ορθογώνιας συστοιχίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.11.



Εικόνα 2.11: Το πλάτος δέσμης μίας ορθογώνιας συστοιχίας.

Για μια εκτεταμένη επίπεδη συστοιχία, όταν η κύρια δέσμη της κατευθύνεται κοντά στην διαγώνιο της ευρείας πλευράς, το επίπεδο ανύψωσης Half-Power Beam Width HPBW υπολογίζεται ως εξής :

$$\theta_h = \frac{1}{\cos\theta_0 \sqrt{\Delta\theta_x^{-2} \cos^2\varphi_0 + \Delta\theta_y^{-2} \sin^2\varphi_0}}$$

όπου

- Η παράμετρος $\Delta\theta_x$ είναι το HPBW μίας γραμμικής συστοιχίας M στοιχείων με κατανομή πλάτους πανομοιότυπη με εκείνη των γραμμικών συστοιχιών του άξονα x.
- Η παράμετρος $\Delta\theta_y$ είναι το HPBW μίας γραμμικής συστοιχίας στοιχείων N με ίδια κατανομή πλάτους με εκείνη των γραμμικών συστοιχιών του άξονα y.
- Το ζεύγος γωνιών (θ_0, φ_0) ορίζει την κατεύθυνση προς την οποία στρέφεται η κύρια δέσμη.

Το αζιμούθιο HPBW είναι το HPBW, το οποίο βρίσκεται στο ορθογώνιο επίπεδο του επιπέδου ανύψωσης και περιέχει το μέγιστο και δίνεται από τη σχέση:

$$\varphi_h = \frac{1}{\cos\theta_0 \sqrt{\Delta\theta_x^{-2} \sin^2\varphi_0 + \Delta\theta_y^{-2} \cos^2\varphi_0}}$$

Σε περίπτωση τετραγωνικής διάταξης, όπου το πλήθος των στοιχείων είναι ίδιο και στους δύο άξονες ($M = N$), και η κατανομή του πλάτους είναι επίσης ίδια, προκύπτουν οι ακόλουθες απλοποιήσεις:

$$\theta_h = \frac{\Delta\theta_x}{\cos\theta_0} = \frac{\Delta\theta_y}{\cos\theta_0}$$

$$\varphi_h = \Delta\theta_x = \Delta\theta_y$$

Η στερεά γωνία δέσμης Ω_A της εν λόγω διάταξης μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά από το γινόμενο των δύο HPBW:

$$\Omega_A = \theta_h \varphi_h$$

Η κατευθυντικότητα της επίπεδης ορθογώνιας συστοιχίας εκφράζεται από την εξίσωση:

$$D_0 = 4\pi \frac{|AF(\theta_0, \varphi_0)|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi |AF(\theta, \varphi)|^2 \sin\theta d\theta d\varphi}$$

Για περιπτώσεις μεγάλων και ευρέων συστοιχιών, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να προσεγγιστεί απλοποιημένα ως εξής:

$$D_0 = \pi D_x D_y \cos\theta_0$$

όπου

- D_x : αντιστοιχεί στη κατευθυντικότητα της γραμμικής συστοιχίας κατά μήκος του άξονα x
- D_y : είναι η κατευθυντικότητα στον άξονα y

Εναλλακτικά, εφόσον είναι γνωστή η στερεά γωνία δέσμης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η παρακάτω προσεγγιστική σχέση για την κατευθυντικότητα:

$$D_0 \approx \frac{\pi^2}{\Omega_A [\text{rad}^2]}$$

2.2.6 Διαλείψεις Μικρής κλίμακας

Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας αναφέρονται στη γρήγορη μεταβολή του πλάτους ενός ραδιοσήματος σε μικρό χρονικό διάστημα ή μικρή απόσταση διαδρομής. Οι συγκεκριμένες διαλείψεις προκύπτουν από τη συμβολή πολλαπλών εκδοχών του ίδιου σήματος, που φτάνουν στον δέκτη με διαφορετικές καθυστερήσεις. Στην κεραία λήψης, τα κύματα των διαφόρων οδεύσεων αθροίζονται, δημιουργώντας ένα σήμα με ευρεία διασπορά ως προς το πλάτος και τη φάση. Το μέγεθος της διασποράς καθορίζεται από την κατανομή της ισχύος και της χρονικής άφιξης των επιμέρους κυμάτων, καθώς και από το διαθέσιμο εύρος ζώνης του σήματος [7].

Οι πολλαπλές οδεύσεις στο ραδιοκανάλι προκαλούν τρεις σημαντικές επιδράσεις:

- γρήγορες αλλαγές στην ισχύ του σήματος για μικρή απόσταση διάδοσης ή χρονική διάρκεια,
- τυχαία διαμόρφωση συχνότητας λόγω μετατοπίσεων Doppler σε διάφορα σήματα πολλαπλών οδεύσεων και
- χρονική διασπορά (ηχώ) λόγω καθυστερήσεων διάδοσης πολλαπλών οδεύσεων.

Στις πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, οι διαλείψεις προκαλούνται επειδή το ύψος των κεραιών είναι μικρότερο από τις γύρω δομές, εμποδίζοντας την οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Ακόμα και αν υπάρχει οπτική επαφή, οι ανακλάσεις από το έδαφος και τις δομές προκαλούν πολλαπλές οδεύσεις των ραδιοκυμάτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σήμα που λαμβάνεται να περιέχει πολλαπλά επίπεδα κύματα με τυχαία κατανομημένα πλάτη, φάσεις και γωνίες άφιξης. Αυτές οι πολλαπλές οδεύσεις μπορεί να προκαλέσουν παραμόρφωση ή εξασθένηση στο λαμβανόμενο σήμα, ακόμα και όταν ο δέκτης είναι στατικός, λόγω κινούμενων αντικειμένων στο ραδιο-κανάλι. [7]

Η μεταβολή της συχνότητας προκύπτει από τη σχετική κίνηση πομπού-δέκτη ή/και των σκεδαστών και αποδίδεται στο φαινόμενο της διασποράς Doppler. Στις διαλείψεις μικρής κλίμακας συνεισφέρουν η πολυοδική διάδοση, η σχετική ταχύτητα ανάμεσα σε πομπό και δέκτη, καθώς και οι ταχύτητες αντικειμένων στο περιβάλλον. Οι ίδιοι αυτοί παράγοντες καθορίζουν και το εύρος ζώνης που μπορεί να υποστηρίξει το μεταδιδόμενο σήμα [7].

2.2.6.1 Τύποι μικρής κλίμακας διαλείψεων (Small-scale fading)

Το είδος της εξασθένησης μικρής κλίμακας που συναντάται σε ένα ασύρματο ραδιοκανάλι καθορίζεται από το μείγμα ιδιοτήτων του εκπεμπόμενου σήματος και του ίδιου του καναλιού. Παράμετροι όπως η ενεργός διασπορά καθυστέρησης (RMS delay spread) και η διασπορά Doppler προσδιορίζουν ποιος μηχανισμός διαλείψεων θα κυριαρχήσει. Οι μηχανισμοί χρονικής και συχνотικής διασποράς παράγουν συνολικά τέσσερις διακριτές επιδράσεις, ανάλογα με τη φύση του σήματος, τα χαρακτηριστικά του μέσου και τη σχετική ταχύτητα πομπού-δέκτη. Με άλλα λόγια, η πολυοδική καθυστέρηση εισάγει διασπορά στον χρόνο και εξασθένηση επιλεκτική ως προς τη συχνότητα, ενώ η διασπορά Doppler προκαλεί χρονική μεταβλητότητα και διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τον χρόνο. Οι δύο παραπάνω μηχανισμοί δρουν ανεξάρτητα μεταξύ τους [7].

Για την πληρέστερη περιγραφή ενός πολυδιαδρομικού καναλιού χρησιμοποιούνται ακόμη δύο χρήσιμα μεγέθη:

- Χρόνος συνοχής (coherence time T_c) – το χρονικό διάστημα στο οποίο οι παράμετροι του καναλιού μπορούν να θεωρηθούν σχεδόν σταθερές.
- Εύρος ζώνης συνοχής (coherence bandwidth B_c) – το φάσμα συχνοτήτων μέσα στο οποίο οι αποκρίσεις του καναλιού παραμένουν ισχυρά συσχετισμένες.

Συσχετίζοντας την περίοδο συμβόλου με τον χρόνο συνοχής και το εύρος ζώνης του σήματος με το εύρος ζώνης συνοχής, προκύπτουν τέσσερις χαρακτηριστικοί τύποι διαλείψεων μικρής κλίμακας, όπως συνοψίζεται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: τύποι διαλείψεων μικρής κλίμακας. [7]

Διαλείψεις Μικρής κλίμακας (Με βάση τη διασπορά χρονικής καθυστέρησης πολλαπλών διαδρομών)	
Επίπεδες διαλείψεις (Flat fading)	Διαλείψεις επιλεκτικές με τη συχνότητα (Frequency selective fading)
1. BW σήματος < BW συνοχής καναλιού	1. BW σήματος > BW συνοχής καναλιού
2. Χρονική διασπορά < Περίοδος συμβόλου	2. Χρονική διασπορά > Περίοδος συμβόλου
Διαλείψεις Μικρής κλίμακας (Με βάση τη διασπορά Doppler)	
Ταχείες διαλείψεις (Fast fading)	Αργές διαλείψεις (Slow fading)
1. Υψηλή διασπορά Doppler	1. Χαμηλή διασπορά Doppler
2. Χρόνος συνοχής < Περίοδος συμβόλου	2. Χρόνος συνοχής > Περίοδος συμβόλου
3. Η διακύμανση καναλιού είναι ταχύτερη από τις μεταβολές σήματος βασικής ζώνης	3. Η διακύμανση καναλιού είναι πιο αργή από τις παραλλαγές σήματος ζώνης βάσης

Επίπεδες διαλείψεις (Flat fading)

Σε περιπτώσεις όπου το κανάλι διάδοσης παρουσιάζει σταθερή ενίσχυση και γραμμική απόκριση φάσης για ένα μεγαλύτερο εύρος ζώνης από αυτό του μεταδιδόμενου σήματος, τότε το λαμβανόμενο σήμα θα υποστεί flat fading ή επίπεδη εξασθένιση. Στα συγκεκριμένα είδη καναλιών, οι πολλαπλές οδεύσεις του

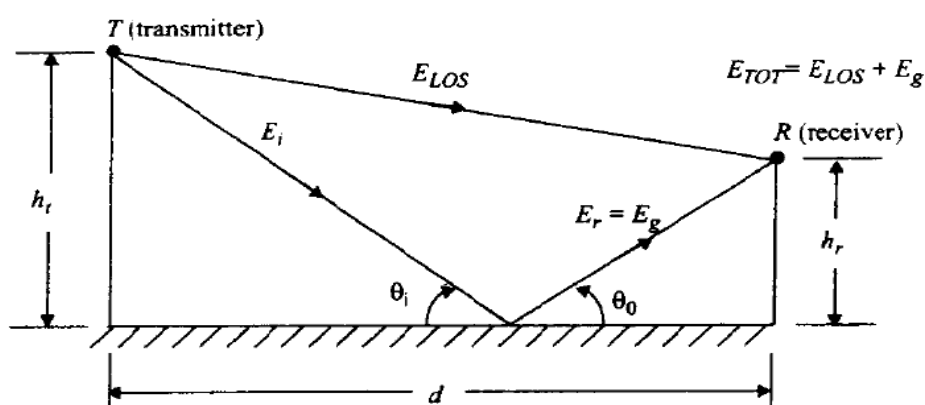
σήματος δεν αλλοιώνουν το φάσμα του, ωστόσο η ισχύς που τελικά λαμβάνεται μπορεί να παρουσιάζει διακυμάνσεις με την πάροδο του χρόνου. Αυτές οι μεταβολές προκαλούνται από τις μεταβολές του συνολικού κέρδους του καναλιού, λόγω συμβολών μεταξύ των διαφορετικών οδεύσεων.

Τα κανάλια αυτού του τύπου αναφέρονται συχνά και ως κανάλια μεταβλητού πλάτους ή κανάλια στενής ζώνης, καθώς το φάσμα του μεταδιδόμενου σήματος θεωρείται μικρότερο σε σχέση με το εύρος ζώνης του ίδιου του καναλιού. Ένα βασικό χαρακτηριστικό των flat fading καναλιών είναι η πιθανότητα εμφάνισης βαθιών διαλείψεων (deep fades), που καθιστούν αναγκαία τη χρήση αυξημένης εκπεμπόμενης ισχύος, προκειμένου να διατηρηθεί ικανοποιητικό επίπεδο αξιοπιστίας στη μετάδοση και χαμηλό ποσοστό σφαλμάτων (bit error rate).

Ο στατιστικός προσδιορισμός του στιγμιαίου κέρδους στα συγκεκριμένα κανάλια παίζει ουσιαστικό ρόλο στον σχεδιασμό ραδιοεπικοινωνιακών συνδέσεων. Η πιο κοινή κατανομή που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη μεταβολή του πλάτους στις περιπτώσεις αυτές είναι η Rayleigh. Σύμφωνα με το μοντέλο Rayleigh flat fading, θεωρείται πως η απολαβή του καναλιού μεταβάλλεται χρονικά και ακολουθεί κατανομή Rayleigh, η οποία αποτυπώνει την τυχαία φύση της διάδοσης σε περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών.

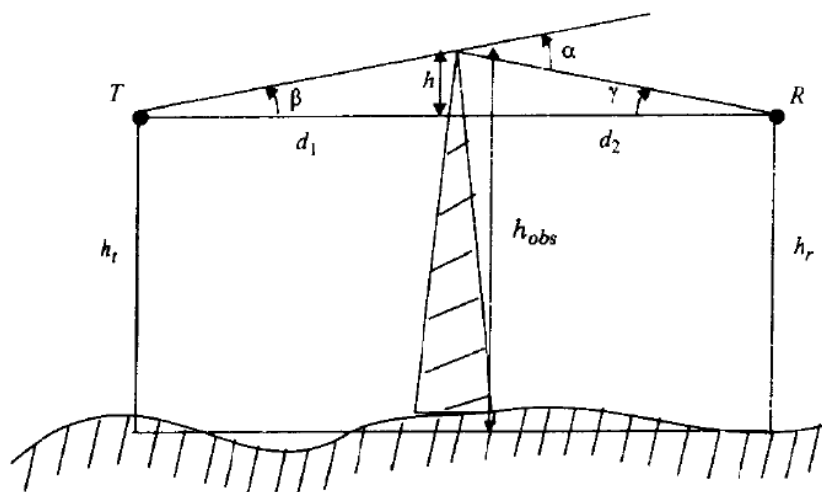
2.2.6.2 Διαλείψεις Μεγάλης κλίμακας (Large scale fading)

Οι τρεις βασικοί μηχανισμοί που επηρεάζουν τη μετάδοση σε ένα ασύρματο σύστημα επικοινωνίας είναι η ανάκλαση, η περίθλαση και η σκέδαση. Η ανάκλαση συμβαίνει όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε ένα αντικείμενο που είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με το μήκος κύματος του. Αυτό μπορεί να συμβεί σε διάφορες επιφάνειες, όπως η επιφάνεια της γης, κτίρια και τοίχοι [7].



Εικόνα 2.12: Μοντέλο δύο διαδρομών με ανάκλαση στο έδαφος. [7]

Η περίθλαση συμβαίνει όταν ένα κύμα συγκρούεται με μια τραχεία επιφάνεια, εμποδίζοντας τη διαδρομή του μεταξύ πομπού και δέκτη. Τα δευτερεύοντα κύματα που προκαλούνται από αυτήν την επιφάνεια μπορεί να υπάρχουν ακόμα στο οπίσθιο τμήμα του εμποδίου, ακόμα και με έλλειψη οπτικής επαφής μεταξύ των δυο άκρων της ζεύξης (πομπού και δέκτη). Όταν οι συχνότητες είναι υψηλές, το αποτέλεσμα της περίθλασης εξαρτάται από τη γεωμετρία του αντικειμένου, καθώς και από το πλάτος, τη φάση και την πόλωση του κύματος που προσπίπτει στο σημείο που πραγματοποιείται η περίθλαση.



Εικόνα 2.13: Γεωμετρία περίθλασης από αιχμηρό εμπόδιο. Με T συμβολίζεται ο πομπός και με R ο δέκτης, ενώ το αιχμηρό εμπόδιο εμποδίζει την διαδρομή οπτικής επαφής. [7]

Η σκέδαση προκαλείται όταν το μέσο μετάδοσης του κύματος αποτελείται από μικρά αντικείμενα σε σχέση με το μήκος του κύματος και όταν υπάρχει μεγάλος αριθμός εμποδίων ανά μονάδα όγκου. Τα σκεδαζόμενα κύματα προέρχονται από τραχιές επιφάνειες και μικρά αντικείμενα.

2.3 Μοντέλα διαλείψεων μικρής κλίμακας (Small-scale fading models)

2.3.1 Rayleigh

Η κατανομή Rayleigh είναι συχνά χρησιμοποιούμενη για την προσομοίωση διαλείψεων πολλαπλής διαδρομής χωρίς οπτική επαφή (Line of Sight - LOS). Επίσης, χρησιμοποιείται για τη διάδοση ανακλώμενων και διαθλώμενων διαδρομών από την τροπόσφαιρα, την ιονόσφαιρα και ασύρματων ζεύξεων μεταξύ πλοίων. Το μοντέλο Rayleigh σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα ταιριάζει σε ασύρματα κινητά συστήματα χωρίς διαδρομή LOS. Επιπλέον, παρατηρήσεις στο φάσμα συχνοτήτων έδειξαν ότι η περιβάλλουσα του ραδιο-σήματος ακολουθεί τη Rayleigh κατανομή σε

μεγάλες αποστάσεις, όπου το σήμα είναι στατικό. Το μιγαδικό σήμα στο δέκτη μοντελοποιείται ως Gaussian διεργασία, προερχόμενο από διάθλαση, ανάκλαση ή σκέδαση σε αντικείμενα γύρω από το δέκτη. Όταν το i -οστό ($i = 1, 2, \dots, K$) κύμα φθάσει στο δέκτη υπό γωνία θ_i σε σχέση με τη διεύθυνση κίνησης του δέκτη, η συχνότητά του αλλάζει από f_c σε $f_c + f_i$ όπου:

$$f_i = f_d \cdot \cos(\theta_i)$$

και μέγιστη συχνότητα Doppler:

$$f_d = \frac{u}{c} \cdot f_c$$

όπου:

- u η ταχύτητα κίνησης του δέκτη,
- c η ταχύτητα του φωτός στο κενό και
- f_c η συχνότητα του φέροντος κύματος.

Τα κύματα έχουν ομοιόμορφη κατανομή φάσης από 0 έως 2π και θεωρούνται στατιστικά ανεξάρτητα από τα πλάτη. Για παράδειγμα, η κίνηση ενός οχήματος προκαλεί μετατόπιση Doppler σε κάθε κύμα, η οποία είναι ίση με:

$$\omega_n = \beta \cdot u \cdot \cos(a_n)$$

όπου:

- $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης συχνότητας φέροντος.
- a_n η σχετική γωνία κίνησης του οχήματος σε σχέση με την ευθεία από το σταθμό εκπομπής.

Αφού τα πλάτη της συμφασικής και της κάθετης συνιστώσας του σήματος θεωρούμε ότι είναι Gaussian, έχουν συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας της μορφής:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot b}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2 \cdot b}}$$

όπου:

- x το πλάτος της συμφασικής ή κάθετης συνιστώσας και

- $b = \frac{E_0^2}{2}$ η μέση ισχύς.

Η περιβάλλουσα του σήματος είναι:

$$r = \sqrt{A_c^2 + A_s^2}$$

και όπως έδειξε ο Rice [7], η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του r είναι:

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{b} \cdot e^{-\frac{r^2}{2b}}, & r \geq 0 \\ 0, & r < 0 \end{cases}$$

που είναι ο τύπος της πυκνότητας Rayleigh.

Η κατανομή της φάσης είναι ομοιόμορφη, επομένως:

$$p(\theta) = \frac{1}{2 \cdot \pi}, \quad 0 \leq \theta \leq 2 \cdot \pi$$

2.3.2 Rice (Nakagami – n)

Η κατανομή Rice, γνωστή επίσης και ως Nakagami-n, χρησιμοποιείται κυρίως για τη μοντελοποίηση περιβαλλόντων στα οποία εμφανίζονται διαλείψεις, αλλά υπάρχει και ένα ισχυρό σήμα λόγω άμεσης (οπτικής) επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη. Παράλληλα, υπάρχουν και ασθενέστερα σήματα που φτάνουν μέσω πολλαπλών ανακλώμενων διαδρομών.

Το πλάτος των διαλείψεων ακολουθεί μια κατανομή πυκνότητας πιθανότητας που περιγράφεται από τη σχέση:

$$p_R(r) = \frac{2 \cdot r \cdot (1 + K)}{\Omega} \cdot e^{-K - \frac{(1+K)r^2}{\Omega}} \cdot I_0 \cdot \left(2 \cdot r \cdot \sqrt{\frac{K \cdot (1 + K)}{\Omega}} \right), \quad r \geq 0$$

όπου:

- K είναι η παράμετρος η οποία χρησιμοποιείται στο μοντέλο των διαλείψεων τύπου Rice. Καθορίζεται ως ο λόγος ισχύος του σήματος μέσω άμεσης οπτικής επαφής πομπού-δέκτη προς την ισχύ των σημάτων που προκύπτουν από τυχαίες ανακλάσεις.

Εάν δεν υπάρχει οπτική επαφή τότε $K \rightarrow -\infty dB$ οπότε και η εξίσωση γίνεται ίδια με αυτή των διαλείψεων Rayleigh. Εάν $K \rightarrow -\infty dB$ τότε περιγράφει περιβάλλον

χωρίς διαλείψεις.

2.3.3 Διασπορά Doppler και Χρόνος Συνοχής

2.3.3.1 Διασπορά Doppler

Η διασπορά Doppler B_d αποτελεί μέτρο της φασματικής διεύρυνσης που προκύπτει λόγω της χρονικής μεταβολής του κινητού ραδιοφωνικού καναλιού. Πιο συγκεκριμένα, ορίζεται ως το εύρος συχνοτήτων στις οποίες το φάσμα Doppler του λαμβανόμενου σήματος παρουσιάζει ενέργεια (δεν είναι δηλαδή μηδενικό). Σε περιπτώσεις όπου το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος υπερβαίνει σημαντικά τη διασπορά Doppler, τότε οι επιδράσεις αυτής της διασποράς θεωρούνται αμελητέες κατά τη λήψη του σήματος από τον δέκτη. [8]

2.3.3.2 Ο χρόνος συνοχής

Ο χρόνος συνοχής T_c είναι ένα στατιστικό μέτρο της χρονικής διάρκειας κατά την οποία η κρουστική απόκριση του καναλιού παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητη (δηλαδή, σε υψηλή συσχέτιση). Εάν το χρονικό διάστημα μεταξύ των μεταδόσεων σήματος είναι πολύ μεγαλύτερο από το χρόνο συνοχής, το κανάλι πιθανότατα θα επηρεάσει τις δύο μεταδόσεις σήματος διαφορετικά. Σε διαφορετική περίπτωση, θα επηρεαστούν παρόμοια. Η διασπορά Doppler είναι αντιστρόφως ανάλογη με το χρόνο συνοχής και έτσι έχουμε τα εξής [8]:

$$B_d = \frac{1}{T_c}$$

Η διασπορά Doppler και ο χρόνος συνοχής είναι παράμετροι που περιγράφουν τη φύση διασποράς συχνότητας του κινητού καναλιού και οι τιμές τους σε σχέση με το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος B_s και τη διάρκεια συμβόλου (περίοδος) T_s μπορούν να βοηθήσουν στον προσδιορισμό εάν το κανάλι αντιμετωπίζει γρήγορη ή αργή διάλειαση. [8]

Ο χρόνος συνοχής T_c ερμηνεύεται βασικά ως η διάρκεια της τάξης μεγέθους ενός fade σε μια δεδομένη συχνότητα. Η μετατόπιση Doppler και η διασπορά Doppler είναι και οι δύο γραμμικές συναρτήσεις της συχνότητας σήματος. Η μεταβολή της διασποράς Doppler με τη συχνότητα είναι σημαντική όταν οι ζώνες συχνοτήτων λειτουργίας είναι διαφορετικές. Για παράδειγμα, ένα σύστημα που λειτουργεί στα 2 GHz έχει διασπορά Doppler διπλάσια από αυτή ενός συστήματος 1 GHz, και έτσι καταλήγει στο μισό χρόνο συνοχής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα γρηγορότερη διάλειαση, με μικρότερη διάρκεια διάλειασης. [8]

Κεφάλαιο 3ο: Μαθηματική μοντελοποίηση καναλιού

3.1 Απώλειες μετάδοσης στον ελεύθερο χώρο (Free – space transmission loss)

Στις τηλεπικοινωνίες, οι απώλειες διαδρομής αναφέρονται στην εξασθένηση της ισχύος που εκπέμπεται από τον πομπό με την αύξηση της απόστασης. Όταν ένα σήμα ταξιδεύει από έναν πομπό σε έναν δέκτη μέσω ελεύθερου χώρου (κενό) χωρίς κανένα εμπόδιο μεταξύ των δύο (δηλαδή, καθαρή οπτική γωνία), η μείωση της ισχύος του σήματος αναφέρεται ως απώλεια διαδρομής ελεύθερου χώρου (FSPL). Όταν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ταξιδεύουν μέσω του ελεύθερου χώρου ή του κενού, η ισχύς τους μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από την πηγή.

Η εκτίμηση των χαρακτηριστικών του σήματος και των σχετικών απωλειών κατά τη μετάδοση είναι πολύ σημαντική για το σχεδιασμό συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας.

Σύμφωνα με το μοντέλο διάδοσης ελεύθερου χώρου που αναπτύχθηκε από τον Friis, η ισχύς του σήματος στην κεραία λήψης, δηλαδή η λαμβανόμενη ισχύς RF δίνεται από:

$$P_R = P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d} \right)^2$$

εκφρασμένη σε σχέση με το μήκος κύματος λ του σήματος. Χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$c = \lambda \cdot f \text{ (Θεμελιώδης νόμος της κυματικής)}$$

η λαμβανόμενη ισχύς RF δίνεται από:

$$P_R = P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot \left(\frac{c}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot d} \right)^2$$

εκφρασμένη σε σχέση με τη συχνότητα του σήματος f .

όπου:

- P_T : Ισχύς του μεταδιδόμενου σήματος
- G_T : Κέρδος της κεραίας εκπομπής
- G_R : Κέρδος της κεραίας λήψης

- d : Απόσταση μεταξύ της κεραίας εκπομπής και της κεραίας λήψης
- λ : Το μήκος κύματος του σήματος
- f : Η συχνότητα του σήματος
- c : Η ταχύτητα του φωτός στο κενό ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$)

Για τον υπολογισμό των απωλειών διαδρομής ελεύθερου χώρου σε dB, χρησιμοποιήσουμε τον τύπο:

$$FSPL(dB) = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_R}{P_T} \right) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot f}{c} \right) - G_T - G_R$$

εκφρασμένη σε σχέση με τη συχνότητα του σήματος f . Η απώλεια διαδρομής ελεύθερου χώρου σε dB μπορεί να εκφραστεί και σε σχέση με το μήκος κύματος του σήματος λ , ως εξής:

$$FSPL(dB) = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_R}{P_T} \right) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d}{\lambda} \right) - G_T - G_R$$

Για μία ιστροπική κεραία (αυτή που ακτινοβολεί εξίσου προς όλες τις κατευθύνσεις), το κέρδος της είναι 0 dB. Επομένως, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής:

$$FSPL(dB) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d}{\lambda} \right)$$

ή

$$FSPL(dB) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot f}{c} \right)$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις η απώλεια μετάδοσης σε μια συχνότητα εξαρτάται αποκλειστικά από την απόσταση μεταξύ των κεραίων. Καθώς η απόσταση αυξάνεται, η απώλεια αυξάνεται επίσης, λόγω της υποβάθμισης της ισχύος από τον πομπό στο δέκτη. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται σαν σφαιρικά κύματα, με την ισχύ να διασπείρεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια όσο αυξάνεται η απόσταση. Η κατάσταση είναι ανάλογη με τα κύματα που δημιουργούνται σε μια λίμνη όταν κάποιος ρίχνει μια πέτρα μέσα της. Καθώς οι κυματισμοί κινούνται προς τα έξω, η έντασή τους μειώνεται. Ομοίως, η ισχύς του σήματος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μειώνεται καθώς το μέτωπο κύματος απομακρύνεται από την πηγή ακτινοβολίας. Η μείωση της ισχύος είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή. Αυτή η μείωση στην ισχύ

ανά μονάδα επιφάνειας περιγράφεται ως απώλεια μετάδοσης ελεύθερου χώρου. Ενώ υποθέτουμε οπτική επαφή στο κενό για τον υπολογισμό της απώλειας μετάδοσης, στην πραγματικότητα μπορεί να υπάρξει ζεύξη και χωρίς οπτική επαφή μέσω της ανάκλασης, περίθλασης και διάθλασης, με επιπλέον απώλειες [7].

Σε συνέχεια των παραπάνω, για να υπολογίσουμε το πλάτος του σήματος για κάθε περίπτωση (πομπός-δέκτης, πομπός-RIS, RIS-δέκτης), χρησιμοποιούμε την τετραγωνική ρίζα των απωλειών διάδοσης. Αυτό μας επιτρέπει να έχουμε όλα τα απαραίτητα δεδομένα για τη συνέχεια της μοντελοποίησης.

3.2 Διασπορά Doppler και Χρόνος Συνοχής

3.2.1 Διασπορά Doppler

Η διασπορά Doppler B_d είναι ένα μέτρο της φασματικής διεύρυνσης που προκαλείται από το χρόνο αλλαγής του κινητού ραδιοδιαύλου και ορίζεται ως το εύρος των συχνοτήτων στις οποίες το λαμβανόμενο φάσμα Doppler είναι ουσιαστικά μη μηδενικό. Όταν το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος είναι πολύ μεγαλύτερο από τη διασπορά Doppler, οι επιπτώσεις της διασποράς Doppler είναι αμελητέα στον δέκτη [8].

Το φαινόμενο Doppler αναφέρεται στην κατάσταση κατά την οποία, όταν ένας παρατηρητής και μια πηγή κυμάτων κινούνται σχετικώς μεταξύ τους, η συχνότητα του κύματος που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής διαφέρει από τη συχνότητα που εκπέμπει η πηγή. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται σε όλα τα αρμονικά κύματα, είτε πρόκειται για μηχανικά είτε για ηλεκτρομαγνητικά [9].

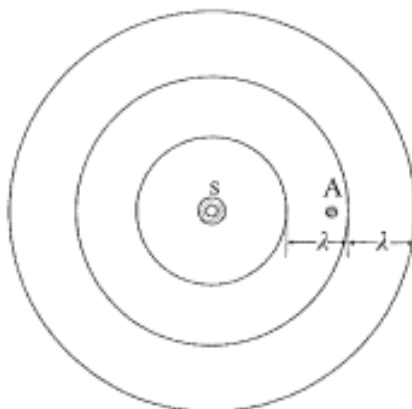
Για την ανάλυση του φαινομένου, συμβολίζουμε την πηγή με S , τη συχνότητα της πηγής με f_S και την ταχύτητα της πηγής με $\vec{u}_S$. Ο παρατηρητής συμβολίζεται με A , η συχνότητα που αντιλαμβάνεται με f_A και η ταχύτητά του με $\vec{u}_A$. Η θετική κατεύθυνση των ταχυτήτων $\vec{u}_S$ και $\vec{u}_A$ ορίζεται ως η κατεύθυνση από την πηγή προς τον παρατηρητή.

Ακίνητη πηγή - Ακίνητος παρατηρητής

Ας εξετάσουμε μια ακίνητη πηγή S , η οποία εκπέμπει σήμα με συχνότητα f_S προς όλες τις κατευθύνσεις. Τα κύματα διαδίδονται με ταχύτητα c και έχουν μήκος κύματος λ , τα οποία σχετίζονται με την θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής:

$$c = \lambda \cdot f_S$$

Στην Εικόνα 3.1 απεικονίζεται ένα στιγμιότυπο του κύματος, όπου οι ομόκεντροι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τα διαδοχικά μέγιστα του κύματος σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Είναι προφανές ότι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών μέγιστων είναι λ . [9]



Εικόνα 3.1: Ακίνητη πηγή – Ακίνητος παρατηρητής. [9]

Ένας παρατηρητής A, ο οποίος είναι επίσης ακίνητος, υπολογίζει τη συχνότητα f_A , μετρώντας τα μέγιστα που φτάνουν σε αυτόν ανά μονάδα χρόνου. Δεδομένου ότι, σε μια μονάδα χρόνου, όσα μέγιστα παράγει η πηγή, τόσα και φτάνουν στον παρατηρητή, αυτός θα αντιλαμβάνεται την ίδια συχνότητα με εκείνη που εκπέμπει η πηγή. [9]

$$f_S = f_A = \frac{c}{\lambda}$$

Έτσι, στην περίπτωση που δεν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ της πηγής και του παρατηρητή, δεν παρατηρείται καμία αλλαγή στη συχνότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής [9].

Ακίνητη πηγή - Κινούμενος παρατηρητής

Ο παρατηρητής πλησιάζει

Έστω ότι ο παρατηρητής A πλησιάζει μια ακίνητη πηγή S με ταχύτητα $\vec{u}_A$, όπως φαίνεται στο διάγραμμα. Τότε, μέσα σε μία μονάδα χρόνου, ο A λαμβάνει περισσότερα μέγιστα κύματος από όσα εκπέμπει η πηγή στο ίδιο χρονικό διάστημα. Αυτό συμβαίνει επειδή, λόγω της σχετικής κίνησης πομπού-δέκτη, η ταχύτητα διάδοσης ως προς τον παρατηρητή είναι μεγαλύτερη. Σε γενικές γραμμές, για να βρούμε τη σχετική ταχύτητα ενός κινούμενου σώματος A ως προς ένα άλλο

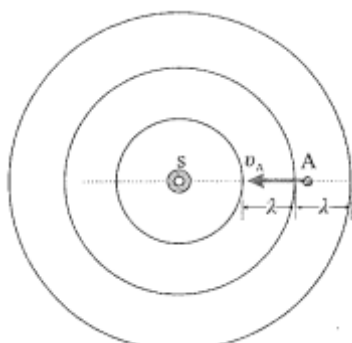
κινούμενο σώμα B, χρησιμοποιούμε τη σχέση $\vec{u}_{A,B} = \vec{u}_A - \vec{u}_B$, με τις ταχύτητες $\vec{u}_A$ και $\vec{u}_B$ να υπολογίζονται ως προς έναν ακίνητο παρατηρητή [9].

Η ταχύτητα διάδοσης ως προς τον κινούμενο παρατηρητή A προκύπτει σύμφωνα με τη σχέση:

$$\vec{v}' = \vec{v} - \vec{u}_A \Rightarrow v' = c - (-u_A) = c + u_A$$

Το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου σήματος δίνεται επίσης από τη σχέση:

$$\lambda = \frac{c}{f_s}$$



Εικόνα 3.2: Ακίνητη πηγή – κινούμενος παρατηρητής. [9]

Ο παρατηρητής μετρά το ίδιο μήκος κύματος λ όπως αν ήταν ακίνητος, αλλά παρατηρεί τα μέγιστα να τον προσπερνούν. Η τιμή του μήκους κύματος παραμένει η ίδια και στα δύο συστήματα αναφοράς, τόσο στο σύστημα της πηγής όσο και στο σύστημα του κινούμενου παρατηρητή. Έτσι, η συχνότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής θα είναι:

$$f_A = \frac{v'}{\lambda} = \frac{c + u_A}{\lambda} = \frac{c + u_A}{c/f_s} \Rightarrow f_A = \frac{c + u_A}{c} f_s$$

Από την τελευταία σχέση προκύπτει ότι, λόγω της ανισότητας $c + u_A > c$, ο ήχος που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής έχει μεγαλύτερη συχνότητα (είναι οξύτερος) σε σύγκριση με εκείνον που εκπέμπει η πηγή ($f_A > f_s$). [9]

Ο παρατηρητής απομακρύνεται

Ας εξετάσουμε την περίπτωση όπου ένας παρατηρητής A απομακρύνεται από μια ακίνητη πηγή S, με ταχύτητα $\vec{u}_A$. Σε αυτή την περίπτωση, ο παρατηρητής λαμβάνει λιγότερα μέγιστα του κύματος ανά μονάδα χρόνου σε σύγκριση με τον

αριθμό που παράγει η πηγή κατά την ίδια χρονική διάρκεια. Αυτό συμβαίνει διότι η ταχύτητα διάδοσης του ήχου προς τον παρατηρητή είναι μικρότερη λόγω της σχετικής κίνησης. [9] Με βάση τα παραπάνω:

$$\vec{v}' = c - \vec{u}_A \Rightarrow v' = c - u_A$$

Άρα σε αυτή την περίπτωση η συχνότητα που ο παρατηρητής αντιλαμβάνεται θα είναι:

$$f_A = \frac{v'}{\lambda} = \frac{c - u_A}{\lambda} = \frac{c - u_A}{c/f_s} \Rightarrow f_A = \frac{c - u_A}{c} f_s$$

Από την τελευταία σχέση προκύπτει ότι, λόγω της ανισότητας $c - u_A < c$, το κύμα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής έχει μικρότερη συχνότητα σε σύγκριση με εκείνον που εκπέμπει η πηγή ($f_A < f_s$). [9]

3.3 LOS – NLOS

3.3.1 LOS

3.3.1.1 Ορισμός

Το Line of Sight (LOS) αναφέρεται στον τύπο μετάδοσης στον οποίο τα δεδομένα μεταδίδονται και λαμβάνονται ενώ οι σταθμοί εκπομπής και λήψης έχουν άμεση ορατότητα μεταξύ τους χωρίς κανένα εμπόδιο στο ενδιάμεσο. [10]

Με απλούστερους όρους, η επικοινωνία LOS συμβαίνει όταν δύο συσκευές μπορούν να «βλέπουν» η μία την άλλη απευθείας, χωρίς τίποτα να εμποδίζει την προβολή τους. [10]



Εικόνα 3.3: Επικοινωνία μεταξύ δύο πομποδεκτών χωρίς να υπάρχει εμπόδιο μεταξύ τους (Line of Sight – LOS). [11]

Η Εικόνα 3.3 απεικονίζει οπτική επικοινωνία μεταξύ δύο πομποδεκτών. Αυτή η ανάπτυξη LOS είναι δυνατή όταν δεν υπάρχει εμπόδιο μεταξύ του σταθμού βάσης (Base Station – BS) και των σταθμών κινητών/σταθερών συνδρομητών (SS). Λόγω της μικρότερης εξασθένησης στην επικοινωνία LOS, προσφέρεται καλή ισχύ σήματος και υψηλότεροι ρυθμοί και αξιοπιστία σε σύγκριση με την αντίστοιχη NLOS. [11]

3.3.1.2 Προκλήσεις και περιορισμοί

Εμπόδια: Τα γεωγραφικά εμπόδια (όπως λόφοι, κτίρια και δέντρα) μπορούν να διαταράξουν την επικοινωνία LoS. Εάν υπάρχει εμπόδιο μεταξύ του πομπού και του δέκτη, η ισχύς του σήματος μειώνεται σημαντικά.

Η καμπυλότητα της Γης: Σε μεγάλες αποστάσεις, η καμπυλότητα της Γης γίνεται σημαντική. Η επικοινωνία LOS προϋποθέτει μια ευθεία γραμμή, αλλά η επιφάνεια της Γης είναι καμπύλη. Σε ζεύξεις μεγαλύτερης απόστασης, οι σχεδιαστές ζεύξεων πρέπει να λάβουν υπόψη αυτή την καμπυλότητα στο σχεδιασμό [10].

3.3.1.3 Στρατηγικές μετριασμού

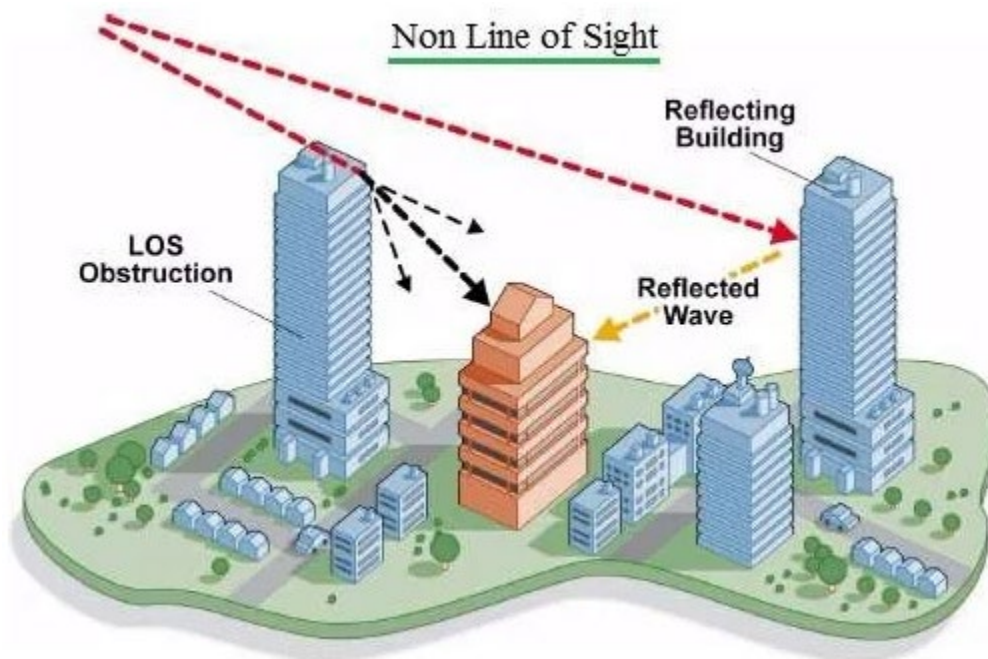
Ύψος κεραίας: Η αύξηση του ύψους των κεραιών συμβάλλει στην επέκταση του εύρους LOS.

Ζώνη Fresnel: Οι μηχανικοί θεωρούν τη ζώνη Fresnel, μια ελλειπτική περιοχή γύρω από την άμεση διαδρομή, για να εξασφαλίσουν ελάχιστες παραμορφώσεις λόγω εμποδίων. [10]

3.3.2 NLOS

3.3.2.1 Ορισμός

Όπως αναφέρθηκε, το NLOS σημαίνει Non Line of Sight. Η Εικόνα 3.4 παρουσιάζεται το σενάριο NLOS. Συγκεκριμένα, η ασύρματη σύνδεση θεωρείται NLOS όταν φυσικά ή ανθρώπινες κατασκευές εμποδίζουν τη γραμμή οπτικής σύνδεσης ανάμεσα στον σταθμό βάσης και τους τερματικούς σταθμούς. Δηλαδή, η επικοινωνία μπορεί να επιτευχθεί ακόμα και όταν υπάρχουν εμπόδια που φράσσουν τη φυσική διαδρομή του σήματος. Το σήμα φτάνει στον δέκτη μέσω πολλαπλών αλληλεπιδράσεων με τα εμπόδια που βρίσκονται στη διαδρομή του. Κατά τη μετάδοση του σήματος, παρατηρούνται διαλείψεις λόγω διάφορων φαινομένων διάδοσης, όπως ανάκλαση, περίθλαση, σκέδαση και διείσδυση [10].



Εικόνα 3.4: Επικοινωνία μεταξύ δύο πομποδεκτών όταν υπάρχει εμπόδιο μεταξύ τους (Non - Line of Sight – NLOS). [11]

3.3.3 Μεγάλης Κλίμακας Μοντέλα Απώλειας Διαδρομής

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι μοντέλων διαλείψεων μεγάλης κλίμακας για απώλειες διάδοσης που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της ισχύος του σήματος mmWave σε σχέση με την απόσταση, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων mmWave. Σημειώνεται ότι τα κέρδη των κεραιών περιλαμβάνονται στον προϋπολογισμό ζεύξης (link budget) και όχι στην κλίση των απωλειών διάδοσης. Οι τρεις βασικοί τύποι μοντέλων είναι οι εξής:

- το μοντέλο απώλειας διαδρομής κοντινής απόστασης σε ελεύθερο χώρο (CI¹) (με απόσταση αναφοράς το 1 m),
- το μοντέλο CI με σταθμισμένη συχνότητα (CIF² μοντέλο) ή το μοντέλο CI σταθμισμένο σε ύψος (μοντέλο CIH) PLE, και
- το μοντέλο απώλειας διαδρομής αιωρούμενης παρεμβολής (FI³), επίσης γνωστό ως μοντέλο ABG λόγω της χρήσης των τριών παραμέτρων a , b και g . [12]

¹ CI: Close-In free space reference distance model

² CIF: CI model with a frequency-weighted model

³ FI: Floating Intercept model

3.3.2.1 Μοντέλο απώλειας διαδρομής κοντινής απόστασης σε ελεύθερο χώρο (CI)

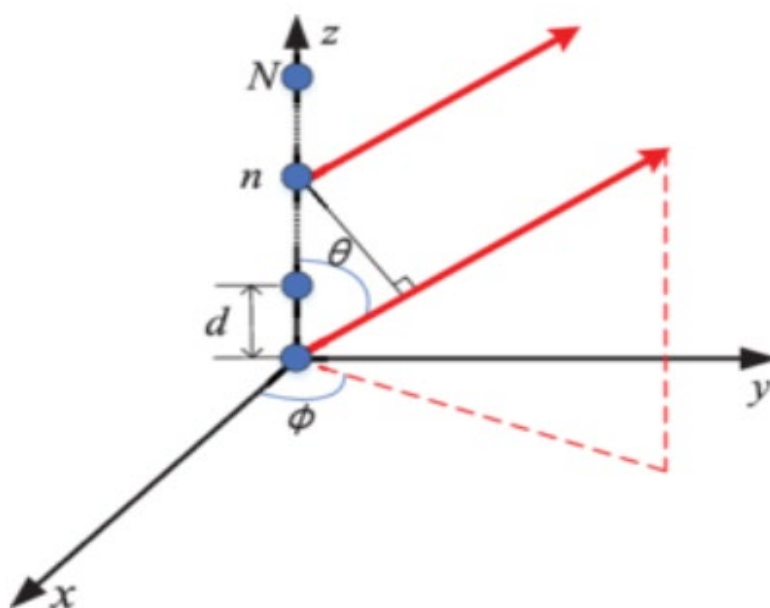
Το μοντέλο απώλειας διαδρομής CI εκφράζει την των απωλειών διάδοση και από τη συχνότητα με τη χρήση μιας απόστασης αναφοράς CI, σύμφωνα με το νόμο του Friis.

3.4 Τύποι κεραιών για τα mm – Waves

Προτείνονται διάφοροι τύποι κεραιών για τα mm-Waves, όπως ομοιόμορφες γραμμικές στοιχειοκεραίες (ULA), ομοιόμορφες ορθογωνικές στοιχειοκεραίες (URA) και ομοιόμορφες κυλινδρικές στοιχειοκεραίες (UCA). [13]

3.4.1 Ομοιόμορφες γραμμικές στοιχειοκεραίες - ULA

Η ομοιόμορφη γραμμική στοιχειοκεραία (Uniform Linear Array – ULA) είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη στα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών. Αποτελείται από N στοιχεία που είναι τοποθετημένα σε μια νοητή ευθεία (άξονας z) με απόσταση d μεταξύ τους (ή αποστάσεις που είναι ίσα με ακέραια πολλαπλάσια της d). Υποθέτουμε ότι το κέντρο της στοιχειοκεραίας βρίσκεται στην αρχή του συστήματος συντεταγμένων. Μία ομοιόμορφη γραμμική στοιχειοκεραία παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.5. [13]



Εικόνα 3.5 Ομοιόμορφη γραμμική στοιχειοκεραία. [14]

Η θέση των στοιχείων καθορίζεται από τον συντελεστή p_z , για τον οποίο ισχύει:

$$p_z = \left(n - \frac{N-1}{2}\right) \cdot d$$

$$p_x = p_y = 0$$

Το διάνυσμα της πολλαπλότητας (manifold ή steering vector) της στοιχειοκεραίας είναι ίσο με:

$$v(k_z) = \begin{bmatrix} e^{j\left(\frac{N-1}{2}\right) \cdot k_z \cdot d} \\ e^{j\left(\frac{N-1}{2} \cdot 1\right) \cdot k_z \cdot d} \\ \vdots \\ e^{-j\left(\frac{N-1}{2}\right) \cdot k_z \cdot d} \end{bmatrix}$$

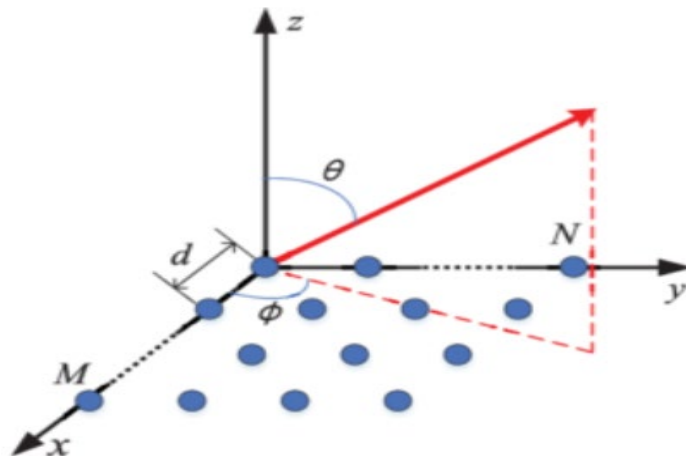
όπου:

k_z : είναι ο κυματάρριθμος (wavenumber), ο οποίος ισούται με:

$$k_z = -\frac{2\pi}{\lambda} \cos\theta = -k_0 \cdot \cos\theta$$

3.4.2 Ομοιόμορφες ορθογωνικές στοιχειοκεραίες - (Uniform Rectangular Array, URA)

Στην Εικόνα 3.6 παρουσιάζεται μια ομοιόμορφη ορθογωνική στοιχειοκεραία σχηματιζόμενη από N_x κεραιοστοιχεία και N_y τέτοιες γραμμές αντίστοιχα. Οι αποστάσεις μεταξύ των διαδοχικών στοιχείων στην οριζόντια κατεύθυνση σημειώνονται ως dx ενώ στην κατακόρυφη κατεύθυνση ως dy αντίστοιχα [3], όπου N_x, N_y είναι ακέραιοι αριθμοί.



Εικόνα 3.6: Ομοιόμορφη ορθογωνική στοιχειοκεραία. [14]

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, το steering vector για το μακρινό πεδίο της οριζόμενης URA στοιχειοκεραίας δίνεται από την σχέση [3]:

$$a(\varphi, \theta) = v_x(\varphi, \theta) \otimes v_y(\varphi, \theta)$$

όπου

- $v_x(\cdot)$ και $v_y(\cdot)$ είναι τα steering vectors ή array manifold vectors στις δυο κατευθύνσεις (την οριζόντια και την κατακόρυφη αντίστοιχα) και δίνονται από:

$$v_x(\varphi, \theta) = [1 e^{jkd_x \sin \theta \cos \varphi} \dots e^{jk(N_x-1)kd_x \sin \theta \cos \varphi}]^T$$

και

$$v_y(\varphi, \theta) = [1 e^{jkd_y \sin \theta \sin \varphi} \dots e^{jk(N_y-1)kd_y \sin \theta \sin \varphi}]^T$$

όπου

- $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, ο κυματαριθμός και
- λ είναι το μήκος κύματος της φέρουσας συχνότητας.

Για να προσαρμόσουμε το διάγραμμα ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας, πρέπει να πολλαπλασιάσουμε με το διάνυσμα βάρους. Επομένως, ο συντελεστής συστοιχίας (array factor) για το URA μπορεί να υπολογιστεί ως εξής [3]:

$$AF_R(\varphi, \theta) = \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} w_{mn} e^{j[(m-1)kd_x \sin \theta \cos \varphi + (n-1)kd_y \sin \theta \sin \varphi]}$$

όπου

το w_{mn} υποδηλώνει το διάνυσμα βάρους, που πολλαπλασιάζει το σήμα στην κάθε κεραία ώστε να κατευθύνει το διάγραμμα ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας προς την επιθυμητή κατεύθυνση.

3.5 Διάνυσμα Πολλαπλότητας Συστοιχίας (array manifold vector) ή Διάνυσμα Καθοδήγησης (steering vector)

Το διάνυσμα πολλαπλότητας συστοιχίας (array manifold vector) είναι μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους ενός συστήματος με στοιχειοκεραίες. Για τη μελέτη της πολλαπλότητας μιας γενικής δισδιάστατης ή τρισδιάστατης (2-D ή 3-D) σειράς

αισθητήρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί η διαφορική γεωμετρία. Λαμβάνοντας υπόψη το αζιμούθιο και τις γωνίες ανύψωσης ως παραμέτρους, σχηματίζεται μια επιφάνεια ενσωματωμένη σε πολυδιάστατο σύνθετο χώρο.

Σύμφωνα με τους Manikas A. et. al, [15], τα συστήματα συστοιχιών που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση σήματος, την εύρεση κατεύθυνσης, τη διαμόρφωση δέσμης, κ.λπ., εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιότητες και τις παραμέτρους πολλαπλότητας συστοιχίας (array manifold). Επομένως, μια αυστηρή ανάλυση του array manifold είναι απαραίτητη και μπορεί να επιτυγχάνεται αποτελεσματικά μέσω της μελέτης της διαφορικής γεωμετρίας. Μέχρι στιγμής, αυτή η ανάλυση έχει πραγματοποιηθεί για μονοδιάστατες (1-D) συστοιχίες, που σχετίζονται με γραμμικούς πίνακες, οι οποίοι είναι καμπύλες ενσωματωμένες σε έναν πολυδιάστατο σύνθετο χώρο. Αυτές οι 1-D καμπύλες έχουν βρεθεί ότι έχουν υπερέλικο σχήμα, οι ιδιότητες των οποίων έχουν μελετηθεί εκτενώς. Σε συστήματα συστοιχιών που περιλαμβάνουν ως παραμέτρους γωνίες αζιμουθίου και ανύψωσης, το array manifold είναι μια επιφάνεια και όχι μια καμπύλη και σχετίζεται με μη γραμμικές δομές συστοιχιών.

Στο [15], αναλύθηκε η επιφάνεια πολλαπλότητας μιας μη γραμμικής διάταξης αισθητήρων χρησιμοποιώντας διαφορική γεωμετρία και προσδιόρισαν τις κύριες παραμέτρους της, τις οποίες και ομαδοποίησαν σε εκείνες που σχετίζονται με σημεία στην επιφάνεια και σε εκείνες που σχετίζονται με καμπύλες στην επιφάνεια.

3.5.1 Διαφορική Γεωμετρία - Παράμετροι της Επιφάνειας

Σε ένα σύστημα γωνιών αζιμουθίου θ και γωνίας ανύψωσης φ μίας συστοιχίας N αισθητήρων εύρεσης κατεύθυνσης, το διάνυσμα πολλαπλότητας συστοιχίας (manifold vector) $\underline{\alpha}(\theta, \varphi)$ ορίζεται ως εξής:

$$\underline{\alpha}(\theta, \varphi) = \underline{\gamma}(\theta, \varphi) \odot \exp\left(-j \underline{r}^T \underline{k}\right)$$

όπου:

$\underline{\underline{r}} = [\underline{r}_x, \underline{r}_y, \underline{r}_z]^T \in \mathbb{R}^{3 \times N}$ είναι το διάνυσμα θέσης του αισθητήρα εκφρασμένο σε μισά μήκη κύματος με το κέντρο της διάταξης να λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς η αρχή των αξόνων (0,0,0) της διάταξης (δηλαδή, $\text{sum}(\underline{r}_x) = \text{sum}(\underline{r}_y) = \text{sum}(\underline{r}_z) = 0$).

$\underline{k} = \pi[\cos\varphi \cdot \cos\theta, \cos\varphi \cdot \sin\theta, \sin\varphi]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ υποδηλώνει το διάνυσμα κυματαριθμού, $\odot$ αντιπροσωπεύει το γινόμενο Hadamard και $\underline{\gamma}(\theta, \varphi) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ είναι το διάνυσμα με στοιχεία τα κέρδη των κατευθυντικών αισθητήρων.

Ο τύπος όλων των πολλαπλών διανυσμάτων $\underline{a}(\theta, \varphi) \forall(\theta, \varphi)$ σχηματίζει την επιφάνεια γνωστή ως πίνακας πολλαπλότητας. Αυτός είναι πολλαπλότητας δύο διαστάσεων, δηλαδή ένας 2-D μη γραμμικός μιγαδικός υποχώρος (συνάρτηση δύο μεταβλητών), ενσωματωμένος σε μιγαδικό χώρο N-διαστάσεων.

Σύμφωνα με το [15], για ένα σημείο (θ, φ) υπάρχουν τέσσερις διαφορικές γεωμετρικές παράμετροι με τη βοήθεια των οποίων το manifold vector μπορεί να οριστεί σε N – διαστάσεις. Οι παράμετροι αυτές είναι οι:

- Το μετρικό πολλαπλότητας, το οποίο είναι συνάρτηση των παραγώγων του array manifold $\underline{a}(\theta, \varphi)$. Είναι επιφανειακός πίνακας με στοιχεία γνωστά στη διαφορική γεωμετρία ως οι πρώτοι θεμελιώδεις συντελεστές (ή μετρικοί συντελεστές) και ορίζεται ως εξής:

$$G = Re\{T^H T\} = \begin{bmatrix} \|\underline{a}_\theta\|^2 & Re\{\underline{a}_\theta^H \underline{a}_\varphi\} \\ Re\{\underline{a}_\varphi^H \underline{a}_\theta\} & \|\underline{a}_\varphi\|^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{\theta\theta} & g_{\theta\varphi} \\ g_{\varphi\theta} & g_{\varphi\varphi} \end{bmatrix}$$

όπου:

ο πίνακας $T = [\underline{a}_\theta, \underline{a}_\varphi] \in \mathbb{C}^{N \times 2}$ παριστάνει το επίπεδο εφαπτομένης με:

$$\underline{a}_\theta = \frac{d\underline{a}(\theta, \varphi)}{d\theta} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$$

$$\underline{a}_\varphi = \frac{d\underline{a}(\theta, \varphi)}{d\varphi} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$$

- Η καμπυλότητα Gauss, η οποία είναι συνάρτηση του μετρικού πολλαπλότητας:

$$K(\theta, \varphi) = -\frac{1}{\sqrt{\det(G)}} \left(\frac{d \frac{\sqrt{\det(G)}}{g_{\theta\theta}} \Gamma_{\theta\varphi}^\varphi}{d\theta} - \frac{d \frac{\sqrt{\det(G)}}{g_{\theta\theta}} \Gamma_{\theta\theta}^\varphi}{d\varphi} \right)$$

όπου:

$\Gamma_{\theta\varphi}^{\varphi}, \Gamma_{\theta\theta}^{\varphi}$: είναι στοιχεία 2x2 πραγματικών πινάκων:

$$\underline{\underline{\Gamma}}_{2p} \triangleq G^{-1} Re \left\{ T^H \frac{dT}{dp} \right\} = \begin{bmatrix} \Gamma_{\theta p}^{\theta} & \Gamma_{\varphi p}^{\theta} \\ \Gamma_{\theta p}^{\varphi} & \Gamma_{\varphi p}^{\varphi} \end{bmatrix}$$

όπου:

$$p = \theta \text{ ή } \varphi$$

Αν $K(\theta, \varphi) > 0$ τότε το σημείο ανήκει σε έλλειψη.

Αν $K(\theta, \varphi) < 0$ τότε το σημείο ανήκει σε υπερβολή.

Αν $K(\theta, \varphi) = 0$ τότε το σημείο ανήκει σε παραβολή.

- Το μήκος του τόξου s της καμπύλης μέχρι ένα σημείο:

$$s = \int \sqrt{\frac{dp^T}{dt} G \frac{dp}{dt}} dt$$

όπου:

$$p(t) = [\theta(t), \varphi(t)]^T$$

$$\frac{dp}{dt} = \left[\frac{d\theta}{dt}, \frac{d\varphi}{dt} \right]^T$$

Η έκφραση $I = \|d\underline{a}\|^2 = d\underline{p}^T \cdot G \cdot d\underline{p}$ είναι μια παράμετρος γνωστή στη διαφορική γεωμετρία ως η πρώτη θεμελιώδης μορφή.

- Τη γεωδαιτική καμπυλότητα $\kappa_g(s)$ σε κάποιο σημείο:

$$\kappa_g(s) = \sqrt{\det(G)} \cdot \left[\begin{array}{c} -\frac{d\varphi}{ds} \\ \frac{d\theta}{ds} \end{array} \right]^T \left\{ \left(\underline{\underline{\Gamma}}_{2\theta} \frac{d\theta}{ds} + \underline{\underline{\Gamma}}_{2\varphi} \frac{d\varphi}{ds} \right) \frac{dp}{ds} + \frac{d^2 p}{ds^2} \right\}$$

όπου s το μήκος του τόξου της καμπύλης.

3.6 Γεωμετρικά Στοχαστικά Μοντέλα Καναλιών (GBSCM)

Στην ενότητα αυτή, παρέχεται το θεωρητικό πλαίσιο για τα γεωμετρικά στοχαστικά μοντέλα. Αναλύονται οι κύριες κατηγορίες τους και παρουσιάζεται ένα κλασικό γεωμετρικό μοντέλο που λειτουργεί ως σημείο αναφοράς. [16]

3.6.1 Εισαγωγή

Κάθε μοντέλο καναλιού αναλύει τον τρόπο με τον οποίο διεξάγεται η διαδικασία ραδιοδιάδοσης. Στην περίπτωση της επικοινωνίας όχημα-με-όχημα (V2V), τα μοντέλα καναλιών επιδιώκουν να αναπαραστήσουν όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά την αλληλεπίδραση μεταξύ δύο κινητών σταθμών, λαμβάνοντας υπόψη όσο το δυνατόν περισσότερες παραμέτρους. Συνήθως, ένα μοντέλο καναλιού που βασίζεται στην αναλυτική φυσική γεωμετρία του χώρου και περιλαμβάνει ένα σύνολο τυχαία κατανεμημένων σκεδαστών, όπως δέντρα, πινακίδες και σταθμευμένα οχήματα, στα οποία προσπίπτουν κύματα και διασκορπίζονται στο περιβάλλον, μπορεί να χαρακτηριστεί ως γεωμετρικό στοχαστικό μοντέλο καναλιού. Σε κάθε περίπτωση, ο ραδιοδιάυλος θεωρείται ως το άθροισμα των συνεισφορών των σκεδασμένων κυμάτων. Ως εκ τούτου, το λαμβανόμενο ραδιοκύμα αποτελεί ένα άθροισμα κυμάτων που προέρχονται από διαφορετικές κατευθύνσεις, με ποικιλία πλάτους και φάσης [16].

Η αναπαράσταση μέσω ενός γεωμετρικού στοχαστικού μοντέλου είναι ίσως η πιο διαδεδομένη και σημαντική, λόγω της ευελιξίας της. Επιτρέπει την απλή προσομοίωση της ραδιοδιάδοσης V2V, καθιστώντας την κατάλληλη για θεωρητική ανάλυση, ενώ παράλληλα προσφέρει τη δυνατότητα προσομοίωσης σχεδόν πλήρως ρεαλιστικών σεναρίων με πολλές παραμέτρους. Ανεξαρτήτως του σκοπού, ένα γεωμετρικό στοχαστικό μοντέλο που απεικονίζει τα δύο κινητά και τους σκεδαστές στο περιβάλλον είναι ιδανικό για την προσομοίωση κάθε τύπου τέτοιων σεναρίων. Σε μοντέλα διάδοσης που βασίζονται στη σκέδαση, οι σκεδαστές υποτίθεται ότι κατανέμονται τυχαία μέσα σε έναν συγκεκριμένο χώρο, γνωστό ως περιοχή σκέδασης (scattering region). Η χωρική τους κατανομή ακολουθεί κάποιο στατιστικό πρότυπο. Από τις θέσεις αυτών των σκεδαστών προκύπτουν σημαντικά χαρακτηριστικά, όπως η γωνία με την οποία το σήμα αναχωρεί από τον πομπό και η γωνία με την οποία φτάνει στον δέκτη. Οι παράμετροι αυτοί παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εξαγωγή στατιστικών περιγραφών του καναλιού, όπως η κατανομή των πλατών, η οποία είναι απαραίτητη για την πλήρη κατανόηση της συμπεριφοράς του λαμβανόμενου σήματος. Συνεπώς, τα γεωμετρικά στοχαστικά μοντέλα θεωρούνται ιδιαίτερα σημαντικά για την ανάλυση των ασύρματων καναλιών — και ιδιαίτερα στις επικοινωνίες όχημα προς όχημα (V2V) — καθώς προσφέρουν μια ρεαλιστική

προσέγγιση για την αναπαράσταση της τυχαίας χωρικής κατανομής των σκεδαστών σε διάφορα σενάρια διάδοσης. Όταν αυτά τα μοντέλα συνδυάζονται με τις εξισώσεις που περιγράφουν την επίπεδη διάδοση κυμάτων, καθίσταται δυνατή η παραγωγή αναλυτικών μοντέλων ραδιοδιαύλου, τα οποία μπορούν να περιγράψουν με σαφήνεια τα βασικά χαρακτηριστικά του υπό εξέταση περιβάλλοντος.

3.6.2 Κατηγορίες GBSCM και Μοντελοποίηση

Αν εξετάσουμε τα αρχικά του GBSCM (Geometry-based Stochastic Model) και το γεγονός ότι περιλαμβάνουν τους όρους «γεωμετρία» και «στοχαστικότητα», προκύπτει ότι τα γεωμετρικά στοχαστικά μοντέλα ταξινομούνται κυρίως με βάση τη γεωμετρία τους και τη συμπεριφορά τους, η οποία μπορεί να είναι τυχαία/στοχαστική ή όχι. Πρόσφατα, οι Sen και Matolak [21] πρότειναν ένα μη γεωμετρικό μοντέλο τύπου SISO, που λαμβάνει υπόψη τη μη στατική φύση του καναλιού, χρησιμοποιώντας αλυσίδες Markov για τη μοντελοποίηση των πολυδιαδρομικών συνιστωσών. Το πλεονέκτημα αυτού του μη γεωμετρικού στοχαστικού μοντέλου είναι ότι μπορεί να περιγράψει αποτελεσματικά την επίδραση ξαφνικών απωλειών των ισχυρών συνιστωσών του σήματος, οι οποίες συνήθως προκαλούνται από απότομες σκιάσεις ή εμπόδια όπως άλλα οχήματα ή αντικείμενα στο περιβάλλον.

Η μέθοδος της γεωμετρικής στοχαστικής μοντελοποίησης εντάσσεται στη γενικότερη κατηγορία της «μοντελοποίησης σκεδάσεων», στην οποία ανήκει επίσης και η ντετερμινιστική γεωμετρική προσέγγισή της. Σε αντίθεση όμως με τη ντετερμινιστική προσέγγιση, η οποία απαιτεί λεπτομερή περιγραφή των χαρακτηριστικών του πραγματικού περιβάλλοντος, η στοχαστική μοντελοποίηση είναι απλούστερη και, συνεπώς, πιο διαδεδομένη στην πράξη. Πράγματι, στην πλειονότητα των πραγματικών εφαρμογών, το περιβάλλον διάδοσης είναι άγνωστο και μεταβαλλόμενο, κάτι που καθιστά τη στοχαστική προσέγγιση πιο πρακτική και καταλληλότερη. Για αυτόν τον λόγο, στη συνέχεια θα εστιάσουμε αποκλειστικά στη στοχαστική προσέγγιση. Η γενική διαδικασία που συνήθως ακολουθείται στη γεωμετρική στοχαστική μοντελοποίηση είναι η εξής:

1. Αρχική ρύθμιση του περιβάλλοντος διάδοσης: σε αυτό το στάδιο περιλαμβάνονται η τοποθέτηση και οι κατευθύνσεις κίνησης των TX/RX, καθώς και η κατηγοριοποίηση των ενεργών σκεδαστών σε κινούμενους και στατικούς.

2. Τοποθέτηση σκεδαστών: οι σκεδαστές τοποθετούνται σε μια προκαθορισμένη περιοχή, γνωστή ως περιοχή σκεδάσεων, με βάση μια συνάρτηση πυκνότητας

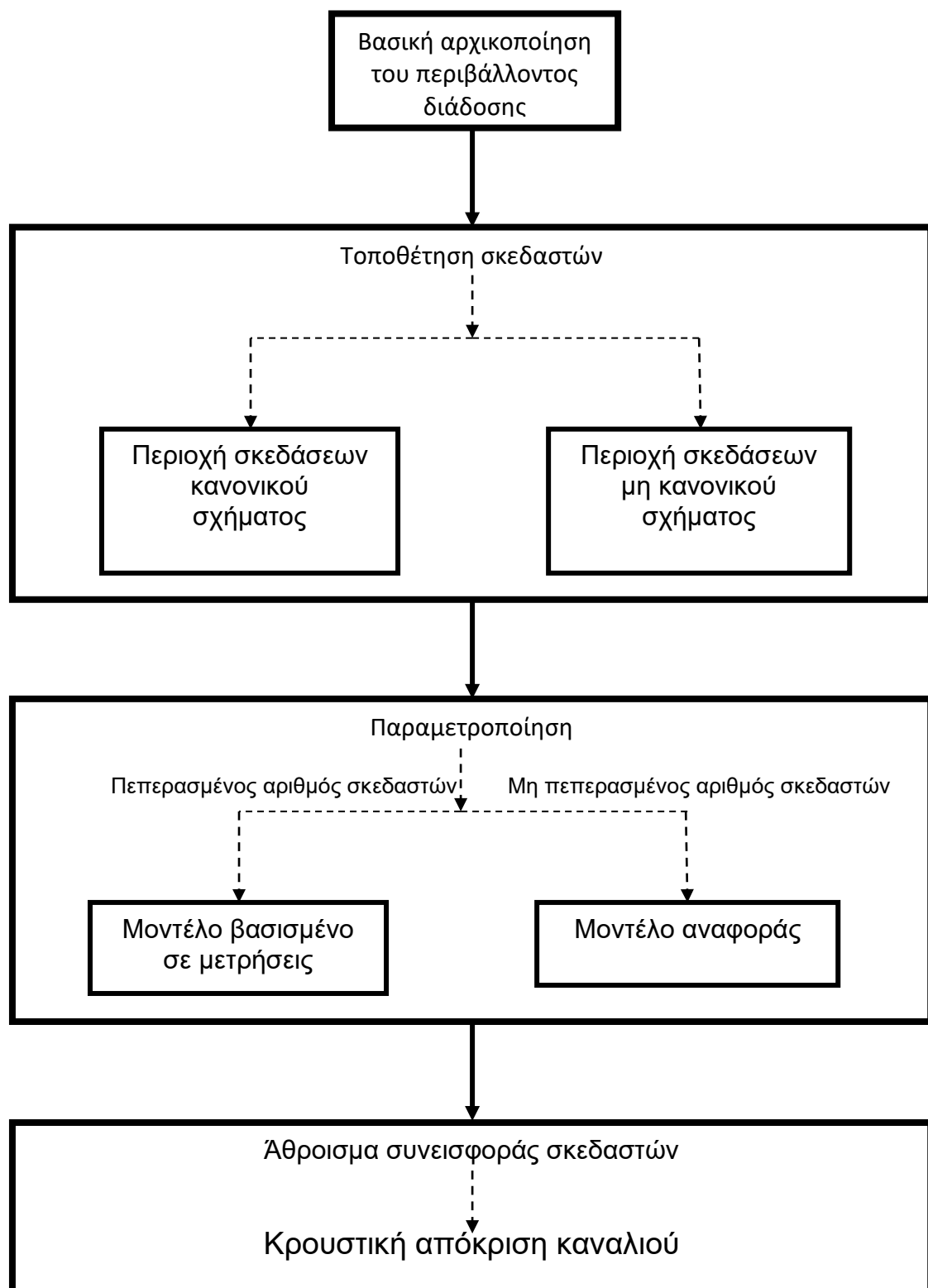
πιθανότητας. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να διακριθεί σε δύο κύριες κατηγορίες, οι οποίες αποτελούν τη βάση ταξινόμησης των γεωμετρικών μοντέλων: κανονικά και μη κανονικά σχήματα (regular/irregular shaped geometry based stochastic channel model – RS-GBSCM/ IS-GBSCM), ανάλογα με την κατανομή των σκεδαστών στην περιοχή σκεδάσεων. Γενικά, τα κανονικά σχήματα περιλαμβάνουν μονό ή διπλό δαχτυλίδι, έλλειψη, κύκλο κ.λπ., ενώ τα μη κανονικά σχήματα υποδηλώνουν τυχαία κατανομή σκεδαστών με ακανόνιστο σχήμα [16].

3. Παραμετροποίηση: σε αυτό το στάδιο υπάρχουν δύο μέθοδοι παραμετροποίησης των σκεδαστών. Η πρώτη υποθέτει έναν πεπερασμένο αριθμό σκεδαστών και αποδίδει ιδιότητες διάλειψης (fading) σε καθέναν από αυτούς, βασισμένες σε πραγματικές μετρήσεις. Η δεύτερη υποθέτει έναν μη πεπερασμένο αριθμό σκεδαστών, με αποτέλεσμα τα χαρακτηριστικά του καναλιού να καθορίζονται μόνο από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, χωρίς να αποδίδονται ιδιότητες διαλείψεων σε κάθε σκεδαστή. Σε αυτήν την περίπτωση, το παραγόμενο μοντέλο καναλιού, επειδή προϋποθέτει άπειρο πλήθος σκεδαστών, δεν είναι δυνατόν να υλοποιηθεί πρακτικά· λειτουργεί, λοιπόν, ως μοντέλο αναφοράς. Τέτοια μοντέλα χρησιμεύουν κυρίως για τη θεωρητική διερεύνηση των χαρακτηριστικών του καναλιού.

4. Ενοποίηση της συμβολής όλων των σκεδαστών: στο στάδιο αυτό αθροίζονται όλες οι σκέδασεις που συντελούν στο λαμβανόμενο σήμα, ώστε να προκύψει η κρουστική απόκριση του καναλιού. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, δεδομένου ότι το μοντέλο αναφοράς έχει μη πεπερασμένο αριθμό σκεδαστών, το αντίστοιχο προσομοιωμένο μοντέλο με πεπερασμένο αριθμό σκεδαστών, το οποίο είναι εφικτό στην πράξη, πρέπει να εξάγεται πρώτα σε αυτό το βήμα, προτού μεταβούμε στο μοντέλο αναφοράς.

Σε γενικές γραμμές, τα γεωμετρικά στοχαστικά μοντέλα κανονικού σχήματος χρησιμοποιούνται κυρίως για την καθαρά θεωρητική διερεύνηση των στατιστικών ιδιοτήτων του καναλιού καθώς και για τον θεωρητικό σχεδιασμό και τη συγκριτική αξιολόγηση συστημάτων επικοινωνίας. Για να παραμείνουν μαθηματικά διαχειρίσιμα, υιοθετείται η παραδοχή ότι όλοι οι ενεργοί σκεδαστές κατανέμονται σε ένα κανονικό σχήμα. Αντιθέτως, τα μοντέλα μη κανονικού σχήματος επιδιώκουν να αποδώσουν πιο πιστά τη φυσική πραγματικότητα, τροποποιώντας τόσο τη θέση όσο και τα χαρακτηριστικά των σκεδαστών ενός κανονικού μοντέλου. Σε αυτά, οι ενεργοί σκεδαστές με συγκεκριμένες φυσικές ιδιότητες τοποθετούνται σε τυχαίες θέσεις βάσει κατάλληλων στατιστικών κατανομών. Η συμβολή κάθε σκεδαστή εκτιμάται μέσω ενός απλοποιημένου σχήματος ray tracing, και τα επιμέρους

σήματα συντίθενται για να παραχθεί η μιγαδική κρουστική απόκριση. Όπως έχει ήδη επισημανθεί, τα γεωμετρικά στοχαστικά μοντέλα διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες. Αν και αμφότερες είναι εύκολο να περιγραφούν αναλυτικά, μόνο εκείνες που περιέχουν πεπερασμένο αριθμό σκεδαστών μπορούν να εφαρμοστούν πρακτικά. Ξεκινώντας από ένα ιδεατό μοντέλο αναφοράς, είναι εφικτό να αποδοθεί ένα αντίστοιχο προσομοιωτικό μοντέλο περιορισμένης πολυπλοκότητας, κατάλληλο για υλοποίηση και απαραίτητο για την αξιολόγηση της απόδοσης ασύρματων V2V συστημάτων.



Εικόνα 3.7: Μία γενική διαδικασία μοντελοποίησης ενός GBSCM. [16]

Αξίζει να υπογραμμιστεί ότι τα γεωμετρικά στοχαστικά-ντετερμινιστικά μοντέλα, τα στοχαστικά μοντέλα χωρίς γεωμετρική θεμελίωση και τα γεωμετρικά στοχαστικά μοντέλα ακανόνιστης γεωμετρίας μπορούν να ταξινομηθούν, όπως και κάθε άλλο μοντέλο προσομοίωσης, εφόσον διαθέτουν πεπερασμένη πολυπλοκότητα. Εφόσον ο αριθμός των σκεδαστών είναι περιορισμένος, επιτρέπεται η απευθείας υλοποίησή τους στην πράξη. Υπό αυτό το πρίσμα, ως μοντέλο-αναφοράς λογίζεται το εμπειρικό μοντέλο που προκύπτει από πραγματικές μετρήσεις. Αξίζει ακόμη να επισημανθεί ότι, είτε αντλούμε δεδομένα από μετρητικό μοντέλο είτε χρησιμοποιούμε θεωρητικό μοντέλο-αναφοράς, σε κάθε περίπτωση οδηγούμαστε στην εξαγωγή της κρουστικής απόκρισης του καναλιού.

3.6.3 Ένα SISO Μοντέλο Αναφοράς V2V Δύο Δακτυλιδιών

Στην Εικόνα 3.8 παρουσιάζεται η γεωμετρική διάταξη ενός κανονικού γεωμετρικού-στοχαστικού μοντέλου V2V. Διακρίνονται δύο δακτύλιοι τοπικών ενεργών σκεδαστών: ο πρώτος περικλείει το όχημα-πομπό και ο δεύτερος το όχημα-δέκτη, σχηματίζοντας έτσι την καθορισμένη περιοχή σκέδασης. Σε κάθε σενάριο οι δακτύλιοι αυτοί θεωρούνται σταθεροί, με σκεδαστές που παραμένουν σε αμετάβλητες θέσεις. Υπό αυτές τις παραδοχές, και λαμβάνοντας υπόψη τις κατευθύνσεις κίνησης του πομπού και του δέκτη, η μιγαδική περιβάλλουσα του μοντέλου-αναφοράς μπορεί να διατυπωθεί, σε γενικό πλαίσιο στενής ζώνης μη-ισοτροπικής Rayleigh σκέδασης, ως εξής [16]:

$$h(t) = \lim_{NSC, MSC \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{NSC \cdot MSC}} \sum_{n=1}^{NSC} \sum_{m=1}^{MSC} e^{j\psi_{nm}} \cdot e^{j[2\pi f_{Tmax} t \cdot \cos(\Phi_T^m - \gamma_T) + 2\pi f_{Rmax} t \cdot \cos(\Phi_R^n - \gamma_R)]}$$

όπου

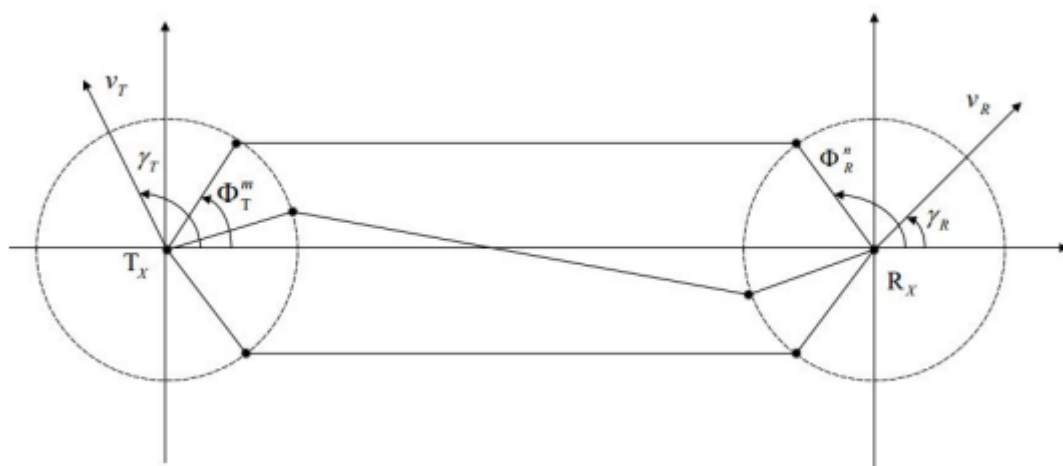
- $j = \sqrt{-1}$,
- NSC, MSC είναι ο αριθμός των ενεργών σκεδαστών του δέκτη R_X και του πομπού T_X , αντίστοιχα
- $f_{Tmax} = v_T/\lambda_c$ και $f_{Rmax} = v_R/\lambda_c$ είναι οι μέγιστες συχνότητες Doppler που προκαλούνται εξαιτίας της κίνησης του πομπού και του δέκτη και
- v_T, v_R, λ_c , η ταχύτητα κίνησης του T_X , η ταχύτητα κίνησης του R_X και το μήκος κύματος της κεντρικής συχνότητας f_c , αντίστοιχα.

Όπως υποδηλώνει και η Εικόνα 3.8, τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης εκτελούν κίνηση προς διευθύνσεις που ορίζονται από τις παραμέτρους γωνίας κίνησης γ_T και

γ_R , αντίστοιχα. Οι τυχαίες γωνίες με τις οποίες το εξερχόμενο κύμα εγκαταλείπει τον πομπό για να προσπέσει στον m -οστό σκεδαστή (Angle of Departure – AoD), καθώς και οι τυχαίες γωνίες υπό τις οποίες το ίδιο κύμα φτάνει στον δέκτη από τον n -οστό σκεδαστή (Angle of Arrival – AoA), περιγράφονται από τις μεταβλητές Φ_T^m , Φ_R^n , αντίστοιχα. Το θεωρητικό πλαίσιο θεωρεί ότι οι γωνίες Φ_T^m , Φ_R^n , και η ενδιάμεση φάση ψ_{nm} αποτελούν τυχαίες μεταβλητές, οι οποίες είναι συλλογικά ανεξάρτητες και, κατά συνέπεια, δεν παρουσιάζουν αλληλεξάρτηση.

Εφόσον ο συνολικός αριθμός ενεργών σκεδαστών N_{SC} και M_{SC} στο μοντέλο-αναφοράς για την απόκριση $h(t)$ τείνει στο άπειρο, οι αρχικά διακριτές εκφράσεις των γωνιών Φ_T^m , και Φ_R^n μπορούν να αναχθούν σε συνεχείς συναρτήσεις. Δεδομένου ότι το $h(t)$ αντιπροσωπεύει ένα μη-ισοτροπικό V2V κανάλι Rayleigh με σκέδαση, οι κατανομές των γωνιών AoA (Φ_R) και AoD (Φ_T) είναι κατ' ανάγκη μη ομοιόμορφες. Για την ποσοτική περιγραφή τους υιοθετείται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της von Mises. Από την τελευταία σχέση προκύπτει ακόμη ότι προϋποτίθεται σχεδόν ισομερής επιμερισμός της ισχύος μεταξύ των κυμάτων που φτάνουν στον δέκτη.

Ο δέκτης λαμβάνει έναν πάρα πολύ μεγάλο αριθμό επίπεδων κυμάτων με σχετικά ίση αλλά σχεδόν αμελητέα ισχύ αν συγκριθεί με την μέση ισχύ των επιμέρους συντελεστών του διαύλου. Αυτό γιατί στον δέκτη οδηγείται ένα σύνολο NSC κυμάτων (σκεδαστές στον Rx), κάθε ένα από τα οποία φέρει ισχύ από κύματα μέσω MSC σκεδαστών από το περιβάλλον του πομπού [16].



Εικόνα 3.8: Μοντέλο αναφοράς δύο δαχτυλιδιών για SISO επικοινωνία μεταξύ οχημάτων [16]

Το συγκεκριμένο γεωμετρικό-στοχαστικό πρότυπο είναι ιδανικό για την απεικόνιση σεναρίων διάδοσης όπου και τα δύο κινούμενα άκρα του ζεύγους –

πομπός και δέκτης – περιβάλλονται από πλήθος σκεδαστών. Τέτοιες πυκνές “νεφώσεις” σκέδασης συναντώνται συχνά σε πυκνοκατοικημένα αστικά κέντρα αλλά και σε προάστια με έντονο δομημένο περιβάλλον ή πλούσια βλάστηση. Κάθε επιμέρους σκεδαστής m , όπως και κάθε σκεδαστής n , δεν επηρεάζει το κύμα μόνο με μια μετατόπιση φάσης· επιβάλλει επιπλέον έναν παράγοντα ενίσχυσης (ή εξασθένησης) που ποσοτικοποιείται από τα κέρδη g_m και g_n , αντίστοιχα. Με άλλα λόγια, κάθε αλληλεπίδραση σκεδαστών τροποποιεί τόσο τη φάση όσο και το πλάτος του σήματος προτού αυτό φτάσει στο επόμενο στάδιο διάδοσης. Η συνδυασμένη επίδραση των πολυάριθμων σκεδαστών οδηγεί σε ένα ρεαλιστικό μοντέλο διάδοσης, ικανό να περιγράψει με ακρίβεια τα πολύπλοκα μονοπάτια που ακολουθεί το ραδιοκύμα σε πραγματικές αστικές ή προαστιακές συνθήκες. Έτσι, το μοντέλο επιτρέπει την αξιόπιστη ανάλυση και προσομοίωση των χαρακτηριστικών του καναλιού σε περιβάλλοντα με έντονη πολλαπλή σκέδαση.

Κατά την μοντελοποίηση, τα δυο τερματικά μπορούν να θεωρηθούν σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους ($d \rightarrow \infty$) ώστε να μην συσχετίζεται η επίδραση των σκεδαστών m και n μεταξύ τους με αποτέλεσμα να θεωρείται ένα στοιχειώδες κέρδος ίσο με:

$$g_m = \frac{1}{\sqrt{MSC}}$$

και

$$g_n = \frac{1}{\sqrt{NSC}}$$

όπου:

g_m , το πλάτος των m -οστών κυμάτων των σκεδαστών MSC και g_n είναι το πλάτος των n -οστών κυμάτων των σκεδαστών NSC αντίστοιχα τέτοια ώστε να ισχύουν:

$$NSC^{-1} \sum_{n=1}^{NSC} E[|g_n|^2] = 1$$

και

$$MSC^{-1} \sum_{m=1}^{MSC} E[|g_m|^2] = 1$$

Κεφάλαιο 4^ο: Γενετικός Αλγόριθμος

4.1 Εισαγωγή

Ο γενετικός αλγόριθμος (ΓΑ) αποτελεί μια τεχνική βελτιστοποίησης που στηρίζεται στη θεωρία της εξέλιξης των ειδών και της φυσικής επιλογής, όπως αυτή διατυπώθηκε από τον Δαρβίνο στα μέσα του 19ου αιώνα. Η συγκεκριμένη θεωρία, αν και κατά την εποχή της προκάλεσε έντονες αντιδράσεις λόγω της αντίθεσής της με τις επικρατούσες θρησκευτικές αντιλήψεις για την προέλευση της ζωής, κατάφερε τελικά να εδραιωθεί στη βάση της επιστημονικής έρευνας, δίνοντας πειστικές απαντήσεις σε θεμελιώδη ερωτήματα της βιολογίας [18].

Κεντρικός στόχος της θεωρίας είναι η ερμηνεία της εξέλιξης της ζωής, των χαρακτηριστικών που αποκτούν οι οργανισμοί ώστε να επιβιώνουν στο περιβάλλον τους και των αλλαγών που συντελούνται για να εξασφαλιστεί η διαίωσιση του είδους. Τα κύρια σημεία που συνδέονται με τη λειτουργία των Γενετικών Αλγορίθμων συνοψίζονται στα εξής:

- Οι ζωντανοί οργανισμοί δεν κατηγοριοποιούνται σε ανώτερους ή κατώτερους, όταν ανήκουν στο ίδιο βιολογικό είδος, όπως π.χ. οι άνθρωποι. Ωστόσο, σε κάθε είδος, κάποια άτομα έχουν την τάση να αποκτούν περισσότερους απογόνους από άλλα, με συνέπεια τα χαρακτηριστικά αυτών των πιο επιτυχημένων στην αναπαραγωγή ατόμων να εμφανίζονται συχνότερα στις επόμενες γενιές. Ανάλογα με τις προκλήσεις και τα εμπόδια που αντιμετωπίζουν στη ζωή τους, ορισμένοι οργανισμοί καταφέρνουν να επιβιώσουν και να αναπαραχθούν πιο αποτελεσματικά. Έτσι, με την πάροδο του χρόνου, τα χαρακτηριστικά των οργανισμών εξελίσσονται και μεταβάλλονται, επιτρέποντάς τους να προσαρμόζονται καλύτερα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του περιβάλλοντος.
- Οι διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά των οργανισμών απορρέουν από αλλαγές στο γενετικό τους υλικό, δηλαδή στα χρωμοσώματα — σύνθετες οργανικές δομές που περιέχουν γονίδια και άλλες ακολουθίες DNA. Το σύνολο των γενετικών πληροφοριών ονομάζεται γονότυπος, ενώ ο φαινότυπος περιγράφει τα εμφανή χαρακτηριστικά που εκφράζονται σε μια δεδομένη χρονική στιγμή (π.χ το ύψος δεν είναι σταθερό σε όλη του τη ζωή).
- Δύο βασικοί παράγοντες της εξελικτικής διαδικασίας είναι η αναπαραγωγή και η μετάλλαξη. Οι μεταλλάξεις, αν και τυχαίες, μπορούν

να επηρεαστούν από εξωτερικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες. Αποτελούν αλλαγές σε συγκεκριμένα γονίδια και παίζουν σημαντικό ρόλο στην ποικιλομορφία και εξέλιξη των οργανισμών. Κατά τη διαδικασία διπλασιασμού του DNA, μπορεί να προκύψουν σφάλματα, με αποτέλεσμα το DNA του νέου κυττάρου να μην είναι ακριβώς το ίδιο όπως θα έπρεπε. Αυτή η αλλαγή ονομάζεται μετάλλαξη και μπορεί, σε ορισμένες περιπτώσεις, να οδηγήσει σε βελτιώσεις. Χωρίς αμφιβολία, ορισμένα από τα σφάλματα που συνέβησαν υπήρξαν καθοριστικοί παράγοντες στην προοδευτική εξέλιξη της ζωής.

- Από την αναπαραγωγή προκύπτει ένας νέος οργανισμός, του οποίου τα χρωμοσώματα περιέχουν γονίδια που προέρχονται κατά το ήμισυ από τον πατέρα και κατά το ήμισυ από τη μητέρα. Έτσι, για κάθε χαρακτηριστικό, το νέο άτομο κληρονομεί ένα γονίδιο από κάθε γονέα. Τα αλληλόμορφα γονίδια είναι αυτά που αφορούν το ίδιο χαρακτηριστικό, αλλά εκφράζονται με διαφορετικούς τρόπους. Συνήθως, από τα δύο αλληλόμορφα, το ένα επικρατεί του άλλου και καθορίζει τον φαινότυπο, με το επικρατές αλληλόμορφο να είναι αυτό που κυριαρχεί και το υπολειπόμενο αυτό που υποχωρεί.
- Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, ο John Holland, σκέφτηκε πως ορισμένοι μηχανισμοί που χρησιμοποιεί η φύση για την εξέλιξη των ειδών, θα μπορούσαν να προσαρμοστούν και σε υπολογιστικά συστήματα, προκειμένου να επιλύουν περίπλοκα προβλήματα με μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Έτσι, προέκυψαν οι Γενετικοί Αλγόριθμοι, μια καινοτόμα και δυναμική μέθοδος για τη βελτιστοποίηση και αναζήτηση λύσεων, εμπνευσμένη από τη βιολογική εξέλιξη

Ένας γενετικός αλγόριθμος (ΓΑ) για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος θα πρέπει να περιλαμβάνει τα εξής πέντε στοιχεία:

1. Έναν τρόπο κωδικοποίησης των πιθανών λύσεων σε μορφή κατάλληλη για επεξεργασία από τον αλγόριθμο.
2. Μια διαδικασία για τη δημιουργία του αρχικού πληθυσμού, που αποτελεί το σύνολο των πρώτων υποψηφίων λύσεων.
3. Μια συνάρτηση που αξιολογεί την "ποιότητα" κάθε λύσης, λειτουργώντας ως οδηγός για την επιλογή των καλύτερων.
4. Τελεστές, όπως η διασταύρωση και η μετάλλαξη, που επεμβαίνουν στον γενετικό κώδικα των λύσεων για να παράγουν νέες παραλλαγές.

5. Καθορισμένες παράμετροι λειτουργίας, όπως το μέγεθος πληθυσμού ή τα ποσοστά μετάλλαξης και διασταύρωσης, που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του αλγορίθμου [18].

4.2 Πλεονεκτήματα Γενετικών Αλγορίθμων

Η εφαρμογή των Γενετικών Αλγορίθμων (ΓΑ) σε διάφορες περιπτώσεις είναι ελκυστική για πολλούς λόγους. Οι κυριότεροι είναι οι εξής [19]:

Ταχεία και αξιόπιστη επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων: Ένα βασικό πλεονέκτημα των Γενετικών Αλγορίθμων είναι η υψηλή τους απόδοση. Τόσο η θεωρητική έρευνα όσο και η πρακτική εφαρμογή έχουν δείξει ότι οι ΓΑ είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικοί στην επίλυση προβλημάτων με πολλές ή δύσκολα προσδιορίσιμες λύσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι συναρτήσεις με μεγάλες διακυμάνσεις, οι οποίες συχνά δυσκολεύουν άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης, αντιμετωπίζονται με ευκολία από τους ΓΑ.

Εύκολη ενσωμάτωση σε υπάρχοντα συστήματα και μοντέλα: Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να προστεθούν εύκολα στα υπάρχοντα μοντέλα, χωρίς να απαιτείται επανασχεδιασμός του συνολικού συστήματος. Η ενσωμάτωσή τους σε ήδη υπάρχον κώδικα είναι απλή, καθώς χρησιμοποιούν μόνο τις απαραίτητες πληροφορίες από τη διαδικασία ή τη συνάρτηση που πρόκειται να βελτιστοποιηθεί, χωρίς να απαιτείται βαθιά γνώση του συνολικού ρόλου τους στο σύστημα ή της δομής του.

Ευκολία επέκτασης και προσαρμογής: Όπως θα γίνει εμφανές στα επόμενα κεφάλαια, οι ΓΑ είναι ιδιαίτερα ευέλικτοι και επιτρέπουν αλλαγές και προσθήκες σύμφωνα με τις ανάγκες του σχεδιαστή. Σε πολλές εφαρμογές, έχουν αναφερθεί λειτουργίες των ΓΑ που είτε δεν προέρχονται άμεσα από τη φύση είτε έχουν τροποποιηθεί σημαντικά, με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης. Τέτοιες παραλλαγές του αρχικού μοντέλου όχι μόνο είναι αποδεκτές, αλλά συχνά είναι απαραίτητες.

Δυνατότητα συνδυασμού με άλλες μεθόδους (Υβριδικά σχήματα): Παρά την υψηλή τους αποδοτικότητα, υπάρχουν ειδικές περιπτώσεις προβλημάτων στις οποίες άλλες εξειδικευμένες μέθοδοι μπορεί να είναι καταλληλότερες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ευελιξία των ΓΑ επιτρέπει την ανάπτυξη υβριδικών προσεγγίσεων που συνδυάζουν τους Γενετικούς Αλγόριθμους με άλλες τεχνικές, αξιοποιώντας έτσι τα πλεονεκτήματα πολλών διαφορετικών προσεγγίσεων.

Εφαρμογές σε ευρύ φάσμα προβλημάτων: Ένα ιδιαίτερα ισχυρό χαρακτηριστικό των ΓΑ είναι ότι μπορούν να εφαρμοστούν σε περισσότερους τομείς από οποιαδήποτε άλλη μεμονωμένη μέθοδο βελτιστοποίησης. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ελευθερία επιλογής των κριτηρίων που καθορίζουν τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Οι ΓΑ μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά σε τομείς όπως η οικονομία, η μηχανική σχεδίαση, η επίλυση σύνθετων μαθηματικών προβλημάτων, η εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων και πολλά άλλα.

Δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται. Τέλος, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους, οι ΓΑ δεν απαιτούν αυστηρούς περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται, όπως την ύπαρξη παραγώγων, τη συνέχεια ή την έλλειψη θορύβου. Αυτό τους καθιστά κατάλληλους για την επίλυση ενός πολύ ευρέος φάσματος προβλημάτων, για τα οποία οι συμβατικές μέθοδοι ενδέχεται να είναι ανεπαρκείς ή δύσκαμπτες.

Δεν έχει σημασία ποιος τύπος πληροφορίας εξετάζεται στο πλαίσιο των Γενετικών Αλγορίθμων (ΓΑ). Η μοναδική «επικοινωνία» τους με το περιβάλλον είναι μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτός ο παράγοντας τους επιτρέπει να είναι αποτελεσματικοί, ανεξάρτητα από την ουσία ή το περιεχόμενο του προβλήματος. Βέβαια, αυτό δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχουν προβλήματα που οι ΓΑ δεν μπορούν να λύσουν. Όταν αποτυγχάνουν, η αιτία συνήθως εντοπίζεται στο χαρακτηριστικό του εξερευνούμενου χώρου και όχι στην ίδια την πληροφορία του προβλήματος.

Οι ΓΑ ενσωματώνουν από τη φύση τους την ικανότητα του παραλληλισμού. Διαχειρίζονται μεγάλες ποσότητες δεδομένων σε κάθε βήμα τους, καθώς κάθε άτομο αντιπροσωπεύει πολλές άλλες λύσεις. Έτσι, οι ΓΑ μπορούν να καλύψουν μεγάλες περιοχές αναζήτησης σε σύντομο χρονικό διάστημα, χρησιμοποιώντας αποδοτικές μεθόδους.

Ο Γενετικός Αλγόριθμος (ΓΑ) ξεχωρίζει γιατί καταφέρνει να συνδυάσει ταυτόχρονα δύο σημαντικές διεργασίες: την εξερεύνηση νέων περιοχών του προβλήματος και την αξιοποίηση των δεδομένων που έχουν ήδη επεξεργαστεί. Αυτός ο συνδυασμός είναι σπάνιος σε άλλες μεθόδους. Στη μέθοδο του τυχαίου ψαξίματος, ο αλγόριθμος μπορεί να εξερευνήσει πολλές περιοχές, αλλά δεν χρησιμοποιεί τις πληροφορίες που έχει ήδη αποκτήσει. Από την άλλη, με τη μέθοδο των μικρών άλματων (hill climbing), μπορεί να εκμεταλλευτεί τις πληροφορίες που έχει, αλλά περιορίζεται στη διερεύνηση περιορισμένων περιοχών. Συνήθως, αυτές οι δύο διαδικασίες είναι αντίθετες και δύσκολα συνδυάζονται με επιτυχία. Ωστόσο, οι ΓΑ επιτυγχάνουν να τα συνδυάσουν με τέτοιο τρόπο που καθιστούν την αναζήτηση πολύ πιο αποδοτική και ισχυρή.

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι έχουν επίσης τη δυνατότητα να εκτελούνται παράλληλα, κάτι που τους επιτρέπει να αξιοποιούν τα πλεονεκτήματα των συστημάτων πολλαπλών επεξεργαστών. Η ίδια η δομή τους διευκολύνει την ταυτόχρονη εκτέλεση πολλών υπολογιστικών διεργασιών, γεγονός που βελτιώνει την αποδοτικότητά τους. Αυτό το χαρακτηριστικό δεν είναι κοινό σε άλλες τεχνικές.

4.3 Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός Γενετικού Αλγορίθμου

Ένας τυπικός γενετικός αλγόριθμος περιλαμβάνει απλές λειτουργίες που, ωστόσο, κρύβουν μεγάλη δύναμη. Η συνύπαρξη της απλότητας και της ισχύος αποτελεί το κύριο κίνητρο πίσω από την τεχνική τους. Ένας ΓΑ πρέπει να περιλαμβάνει στοιχεία που θα τον συνδέουν με το πρόβλημα που επιλύει. Η κωδικοποίηση και η αντικειμενική συνάρτηση εξυπηρετούν αυτόν τον σκοπό και είναι αναγκαία συστατικά ενός ΓΑ [19].

4.3.1 Κωδικοποίηση

Η κωδικοποίηση αναφέρεται σε ένα σύνολο πιθανών λύσεων για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα. Η αναπαράσταση αυτών των λύσεων πρέπει να γίνεται με μαθηματική και φορμαλιστική προσέγγιση, ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία τους από υπολογιστές. Επιπλέον, η κωδικοποίηση ενσωματώνεται και στο φυσικό μοντέλο (χρωμοσώματα), όπου οι παρατηρούμενες αλλαγές στους οργανισμούς προέρχονται από τα κωδικοποιημένα χαρακτηριστικά των χρωμοσωμάτων. Ο κύριος σκοπός της κωδικοποίησης είναι να αναπαριστά ικανοποιητικά τα διάφορα χαρακτηριστικά των λύσεων, διευκολύνοντας τις επόμενες διαδικασίες του αλγορίθμου, κυρίως την επιλογή. Ένα αποτέλεσμα της κωδικοποίησης θα πρέπει να είναι η ύπαρξη ομοιοτήτων μεταξύ των ατόμων, προκειμένου να επιτευχθεί η κατάλληλη εκμετάλλευσή τους, καθώς οι ομοιότητες κατευθύνουν την αναζήτηση. Υπάρχουν διάφοροι τύποι κωδικοποίησης που μπορούν να εφαρμοστούν ανάλογα με το πρόβλημα. Ο πιο απλός είναι η κωδικοποίηση με δυαδικά ψηφία (bits), όπου κάθε λύση αναπαρίσταται από μια δυαδική συμβολοσειρά καθορισμένου μήκους. Ωστόσο, έχουν προταθεί πολλές μορφές κωδικοποίησης, καθεμία από τις οποίες εξαρτάται από το συγκεκριμένο πρόβλημα. Καμία κωδικοποίηση δεν είναι αποτελεσματική για όλα τα προβλήματα, και είναι πιθανό ένα πρόβλημα να δέχεται περισσότερες από μία κωδικοποιήσεις. Είναι προφανές ότι η κωδικοποίηση αποτελεί κρίσιμο βήμα στην εφαρμογή του ΓΑ και, αν δεν γίνει με προσοχή, μπορεί να αποβεί μοιραία για την επιτυχία του. Η καταλληλότητα της κωδικοποίησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαίσθηση και την εμπειρία του σχεδιαστή.

Μερικές φορές, μάλιστα, προφανείς μέθοδοι κωδικοποίησης μπορεί να μην είναι αρκετά ή και καθόλου αποτελεσματικές [19].

4.3.2 Αντικειμενική Συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι το δεύτερο κρίσιμο στοιχείο που συνδέει τον Γενετικό Αλγόριθμο με το πρόβλημα που καλείται να λύσει. Λαμβάνει ως είσοδο μια αποκωδικοποιημένη σειρά από δεδομένα και επιστρέφει μια τιμή (συνήθως αριθμητική), η οποία δείχνει πόσο καλά αυτή η σειρά δεδομένων ανταποκρίνεται στη λύση του προβλήματος. Αυτή η τιμή είναι ζωτικής σημασίας για την επιβίωση και την αναπαραγωγή του αντίστοιχου "ατόμου" μέσα στον πληθυσμό του αλγορίθμου. Η αντικειμενική συνάρτηση λειτουργεί σαν το περιβάλλον του μοντέλου, καθώς είναι η μόνη πηγή πληροφόρησης που έχει ο αλγόριθμος σχετικά με το πρόβλημα. Είναι πολύ σημαντικό η συνάρτηση αυτή να υπολογίζεται γρήγορα, προκειμένου να μην καθυστερεί τη διαδικασία εκτέλεσης του αλγορίθμου [19].

4.3.3 Γενετικές Διαδικασίες

Στο επόμενο στάδιο περιλαμβάνονται οι λειτουργίες που σχετίζονται με τη φάση εκτέλεσης του Γενετικού Αλγορίθμου (ΓΑ). Σε αυτή τη φάση πραγματοποιείται το μεγαλύτερο μέρος της διαδικασίας και παράγεται το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Η δομή ενός ΓΑ περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. Αρχικοποίηση
2. Αποκωδικοποίηση
3. Υπολογισμός ικανότητας ή αξιολόγηση
4. Αναπαραγωγή
 - I. Επιλογή
 - II. Διασταύρωση
 - III. Μετάλλαξη
5. Επανάληψη από το βήμα (2) μέχρι να πληρωθεί το κριτήριο τερματισμού του ΓΑ.

4.3.4 Αναπαραγωγή

Η επόμενη φάση αφορά τη σημαντικότερη λειτουργία του Γενετικού Αλγορίθμου, που είναι η αναπαραγωγή. Σε αυτή τη διαδικασία πραγματοποιείται ο κύριος όγκος της εργασίας του αλγορίθμου. Η δομή της αναπαραγωγικής διαδικασίας είναι πολύπλοκη και περιλαμβάνει δύο βασικά στοιχεία: τη

διασταύρωση και τη μετάλλαξη. Πριν από την αναπαραγωγή, προηγείται η διαδικασία της επιλογής.

Κατά την επιλογή, εφαρμόζεται ο νόμος της επιβίωσης του ικανότερου, ο οποίος καθορίζει ποια άτομα από τον υπάρχοντα πληθυσμό θα έχουν την ευκαιρία να συμμετάσχουν στην αναπαραγωγή και να μεταδώσουν στην επόμενη γενιά μέρος ή το σύνολο των χαρακτηριστικών τους. Ο στόχος της επιλογής είναι να επιτρέψει την εκθετική αύξηση των πιο ικανών ατόμων και, τελικά, μετά από αρκετές γενιές αναπαραγωγής, να εξασφαλίσει την επικράτησή τους. Ένας Γενετικός Αλγόριθμος που δεν περιλαμβάνει επιλογή στη διαδικασία αναπαραγωγής του ισοδυναμεί με τυχαία αναζήτηση.

4.3.5 Διασταύρωση

Ο προσωρινός πληθυσμός που προκύπτει από τη διαδικασία επιλογής πρέπει να υποβληθεί σε μια διαδικασία ζευγαρώματος, προκειμένου να επιτευχθεί μια μορφή γονιμοποίησης, όπως συμβαίνει στη φύση. Έτσι, η νέα ομάδα ατόμων που έχει σχηματιστεί από την επιλογή δημιουργεί τυχαία ζευγάρια. Το ποιοι θα ζευγαρώσουν μεταξύ τους από τον προσωρινό πληθυσμό μπορεί να επηρεάσει την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου. Ωστόσο, αυτό παραμένει προς μελέτη και στη βιβλιογραφία, καθώς σε όλες τις εφαρμογές το ζευγάρωμα γίνεται τυχαία.

Σε κάθε ζευγάρι, τα δύο μέλη υποβάλλονται σε μια διαδικασία ανταλλαγής πληροφοριών (ισοδύναμο με το γενετικό υλικό της φυσικής διαδικασίας), η οποία ονομάζεται διασταύρωση. Η διασταύρωση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στάδια στη λειτουργία ενός Γενετικού Αλγορίθμου, καθώς επηρεάζει άμεσα την αποτελεσματικότητά του. Λόγω αυτής της σημασίας, έχει μελετηθεί διεξοδικά και έχουν αναπτυχθεί ποικίλες μέθοδοι υλοποίησής της. Κάποιες από αυτές τις μεθόδους είναι γενικού χαρακτήρα και μπορούν να εφαρμοστούν ανεξάρτητα από το πρόβλημα, ενώ άλλες έχουν σχεδιαστεί ώστε να ταιριάζουν καλύτερα σε ειδικές ή συγκεκριμένες εφαρμογές. Ο βασικός στόχος της διαδικασίας αυτής είναι η δημιουργία μιας νέας γενιάς ατόμων που θα συνδυάζουν ευνοϊκά χαρακτηριστικά των γονέων, εξασφαλίζοντας έτσι μεγαλύτερη ποικιλομορφία και βελτιωμένες ιδιότητες στον πληθυσμό [19].

4.3.6 Μετάλλαξη

Στον κύκλο της αναπαραγωγικής διαδικασίας που εξομοιώνεται στους ΓΑ, μικρότερης σημασίας φαίνεται να είναι η μετάλλαξη - παρόλα αυτά η χρησιμότητα της είναι αδιαμφησβήτητη. Η μετάλλαξη, όταν πραγματοποιείται στου φυσικούς οργανισμούς, κατά κύριο λόγο έχει θετική επίδραση - προωθώντας την εξέλιξη τους.

Κάτι παρόμοιο συμβαίνει και αλγοριθμικά στους ΓΑ με μια απλή διαδικασία. Επιλέγεται τυχαία ένας οργανισμός του πληθυσμού, και με μικρή πιθανότητα (που ονομάζεται *mutation probability* - πιθανότητα μετάλλαξης P_m) ένα bit αντιστρέφεται (από 0 σε 1 και αντίστροφα) κατά την αντιγραφή του "γενετικού υλικού", δηλαδή των bits, από τον γονέα στον απόγονο. Πρέπει όμως η πιθανότητα μετάλλαξης να έχει σχετικά μικρή τιμή, γιατί διαφορετικά ο ΓΑ παύει να έχει συνέπεια και εκφυλίζεται σε τυχαία αναζήτηση. Μια αποδεκτή τιμή, είναι π.χ., μια μετάλλαξη για κάθε χίλια bit που αντιγράφονται [19].

4.4 Ανάλυση και Εφαρμογή Γενετικού Αλγορίθμου για Ρύθμιση του RIS

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται χρήση γενετικού αλγορίθμου για τη ρύθμιση των παραμέτρων των Αναδιαμορφώσιμων Έξυπνων Επιφανειών (RIS). Ο αλγόριθμος παράγει τιμές για έναν διαγώνιο πίνακα $\mathbf{A}$, ο οποίος περιέχει τις μεταβλητές Γ και ϕ . Το Γ είναι ο δείκτης απορρόφησης, με εύρος τιμών από 0 έως 1. Όταν $\Gamma=1$, τα σήματα ανακλώνται πλήρως, ενώ όταν $\Gamma=0$, έχουμε πλήρη απορρόφηση. Αντίστοιχα, η γωνία ϕ λαμβάνει τιμές από 0 έως 2π , αντιπροσωπεύοντας τη φάση που εφαρμόζει κάθε στοιχείο RIS για τη διαμόρφωση των εισερχόμενων κυμάτων.

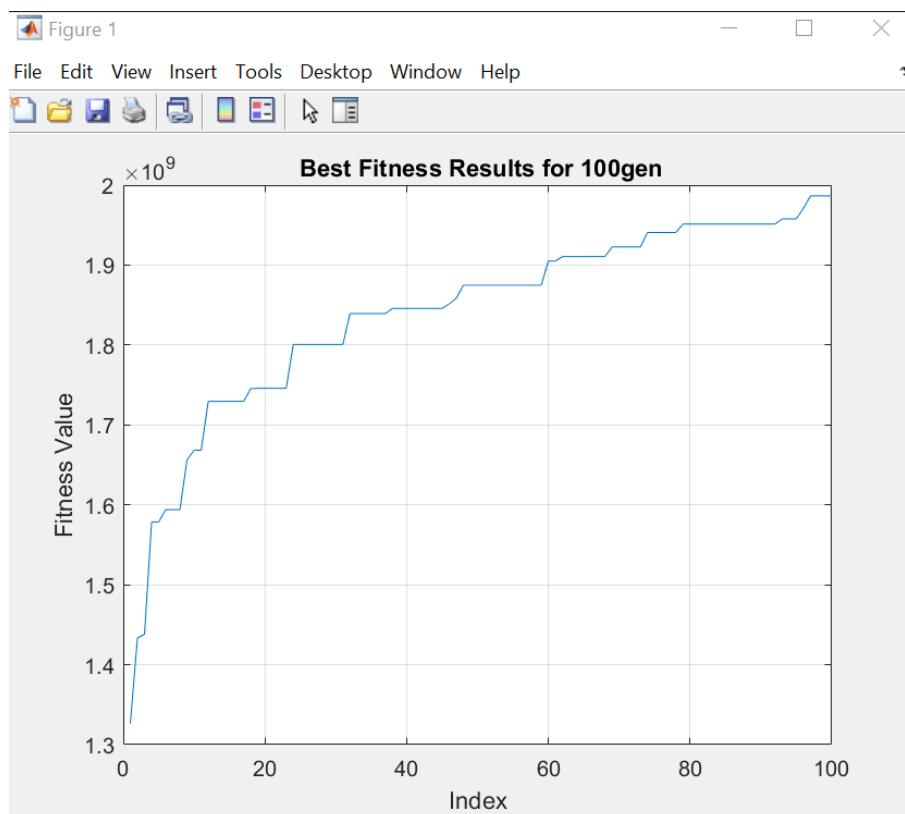
Ο γενετικός αλγόριθμος χρησιμοποιείται για την εύρεση του καλύτερου συνδυασμού Γ και ϕ , ώστε να μεγιστοποιηθεί ο συνολικός αθροιστικός ρυθμός (sum rate) σε σύστημα πολλαπλών χρηστών. Αρχικά, παράγεται ένας πληθυσμός τυχαίων τιμών για τις παραμέτρους αυτές. Στη συνέχεια, κάθε συνδυασμός αξιολογείται ως προς την απόδοσή του μέσω της συνάρτησης καταλληλότητας (αντικειμενική συνάρτηση), η οποία υπολογίζει το sum rate βασιζόμενο στο συνολικό λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR).

Ο πληθυσμός εξελίσσεται μέσα από διαδικασίες επιλογής, διατήρησης των καλύτερων λύσεων (elitism) και μετάλλαξης. Η μέθοδος επιλογής "Roulette Wheel" εξασφαλίζει ότι οι καλύτεροι συνδυασμοί έχουν υψηλότερες πιθανότητες αναπαραγωγής. Οι μεταλλάξεις εισάγουν τυχαίες αλλαγές για τη δημιουργία απογόνων, εμπλουτίζοντας την εξερεύνηση του χώρου λύσεων.

Στο τέλος, ο αλγόριθμος επιστρέφει τους βέλτιστους συνδυασμούς τιμών Γ και ϕ , οι οποίοι οδηγούν στη μέγιστη δυνατή απόδοση του συστήματος. Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε αρχείο CSV, διευκολύνοντας περαιτέρω ανάλυση. Η μέθοδος αυτή αποδεικνύεται αποδοτική, επιτυγχάνοντας βέλτιστες ρυθμίσεις για το RIS των οποίων αποτελέσματα θα δούμε παρακάτω.

4.5 Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου

Στο παρακάτω αποτέλεσμα, με 100 γενιές, πληθυσμό 200 και ρυθμό μετάλλαξης 0.15, η γραφική παράσταση απεικονίζει την εξέλιξη του sum rate για εκατό γενιές. Η αρχική τιμή του sum rate είναι 1,326,414,586.21, και αυξάνεται σταδιακά φτάνοντας έως 1,986,491,762.78. Παρατηρούμε μια εκθετική αύξηση του sum rate, με σταθερή βελτίωση σε κάθε γενιά. Η πρόοδος αυτή δείχνει ότι ο αλγόριθμος καταλήγει σε καλύτερα αποτελέσματα, επιτυγχάνοντας σταδιακά υψηλότερες τιμές sum rate σε κάθε γενιά.

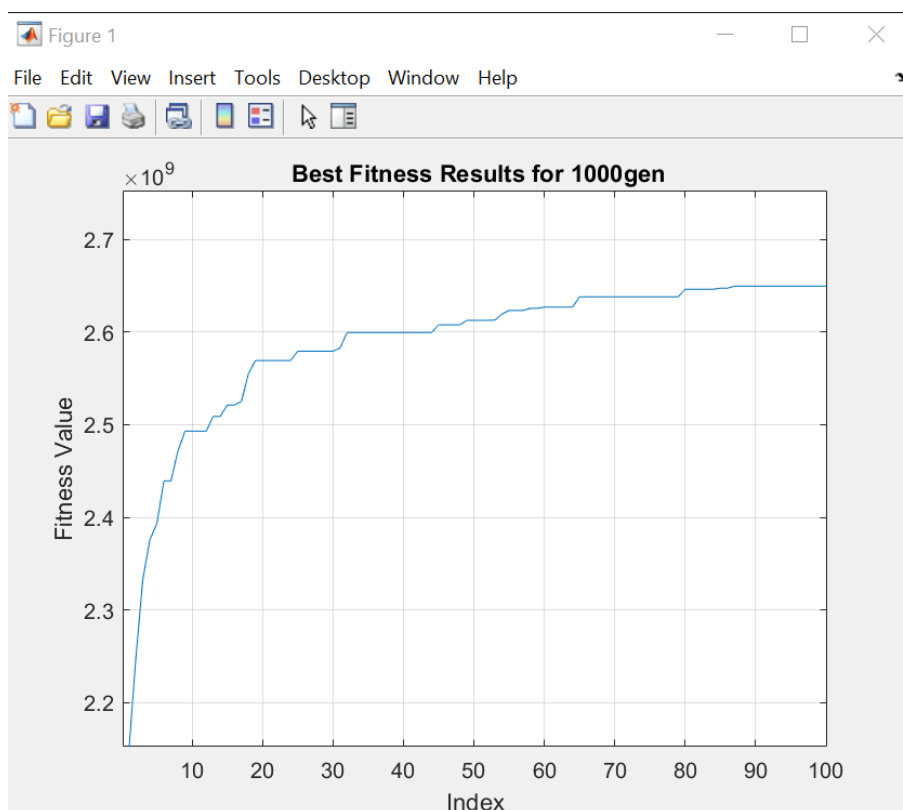


Εικόνα 4.5.1 Καλύτερη επίδοση για 100 generations

Στο συγκεκριμένο αποτέλεσμα, αυξήσαμε τον αριθμό των γενεών από 100 σε 1000, διατηρώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους, όπως το μέγεθος του πληθυσμού και τον ρυθμό μετάλλαξης. Η γραφική παράσταση δείχνει ότι το τελικό sum rate έφτασε στην τιμή 2,649,435,012.68, ξεκινώντας από 2,144,523,859.97, το οποίο ήταν ήδη αρκετά υψηλό. Αυτή η αρχική τιμή οφείλεται στην τυχαιότητα του αλγορίθμου, που εξασφαλίζει έναν εύρος τιμών στο αρχικό σύνολο των αποτελεσμάτων.

Η αύξηση των γενεών από 100 σε 1000 επέτρεψε στον αλγόριθμο να εξερευνήσει έναν μεγαλύτερο χώρο πιθανών λύσεων, πλησιάζοντας το βέλτιστο

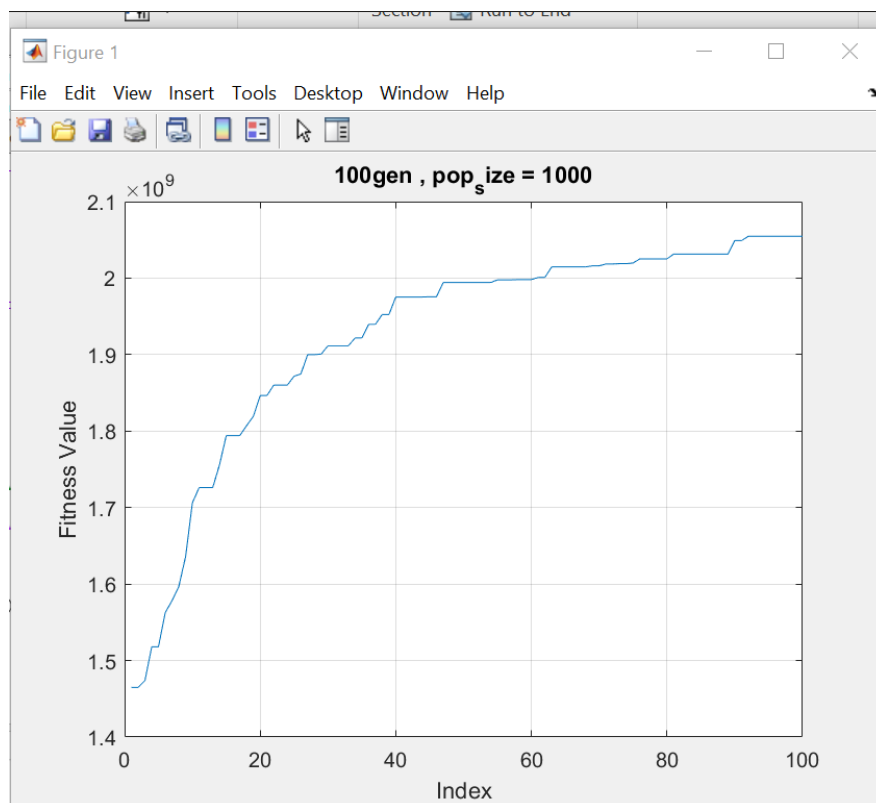
αποτέλεσμα. Με περισσότερες γενιές, οι παράμετροι είχαν περισσότερες ευκαιρίες να εξελιχθούν και να βελτιστοποιηθούν, κάτι που αναμενόταν να οδηγήσει σε καλύτερα και πιο σταθερά αποτελέσματα.



Εικόνα 4.5.2: Καλύτερη επίδοση αντικειμενικής συνάρτησης για 1000 generations

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, αυξήσαμε τον πληθυσμό από 200 σε 1000 (πρακτικά αντιπροσωπεύει τον αριθμό των στοιχείων του RIS), ενώ ο αριθμός των γενεών παρέμεινε σταθερός όπως στην πρώτη εικόνα (εικόνα 4.5.1). Παρατηρούμε ότι το τελικό sum rate είναι περίπου 2,077,006,239.38, το οποίο είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τα προηγούμενα παραδείγματα. Αυτή η αύξηση στο sum rate συμβαίνει διότι, με τον μεγαλύτερο πληθυσμό, υπάρχουν περισσότεροι συνδυασμοί παραμέτρων γ και ϕ , οι οποίοι μπορούν να επιλεγούν και να μεταλλαχθούν για να παράγουν καλύτερα αποτελέσματα.

Η αύξηση του πληθυσμού παρέχει περισσότερες δυνατότητες εξερεύνησης του χώρου λύσεων, κάτι που ενδέχεται να οδηγήσει σε βελτιωμένες λύσεις, καθώς ο αλγόριθμος έχει μεγαλύτερη ποικιλία παραμέτρων για να δουλέψει και μπορεί να εντοπίσει πιο βέλτιστες λύσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια.



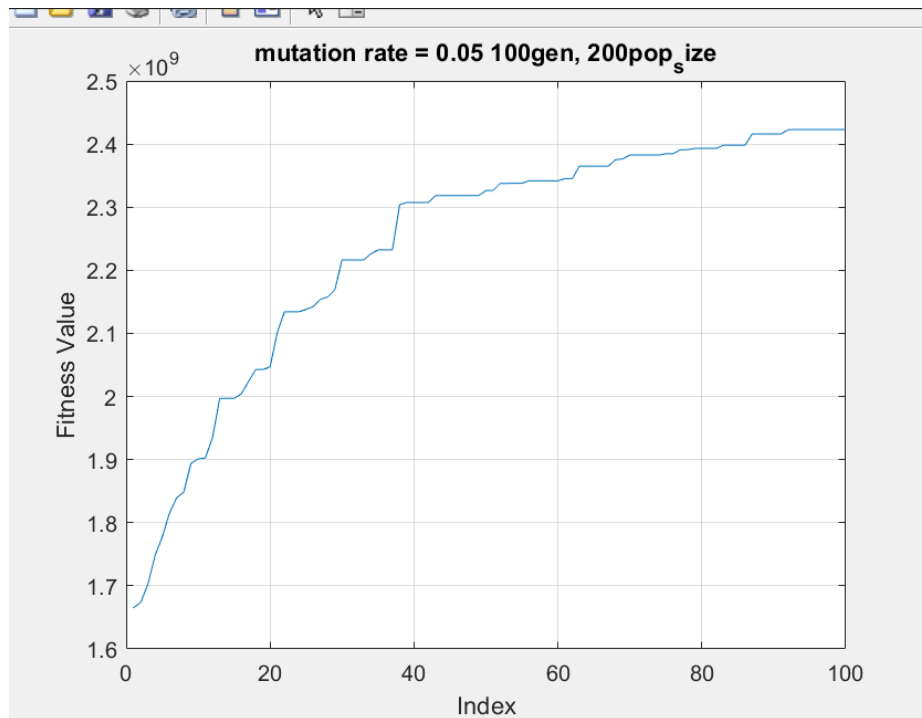
Εικόνα 4.5.3: Καλύτερη επίδοση αντικειμενικής συνάρτησης για μέγεθος πληθυσμού 1000

Στην παρακάτω γραφική παράσταση, διατηρώντας σταθερές τις τιμές για 100 γενιές και πληθυσμό 200, αλλάζουμε το mutation rate από 0.15 σε 0.05. Συγκρίνοντας αυτή την παρατήρηση με την προηγούμενη γραφική παράσταση, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι με χαμηλότερο mutation rate, επιτυγχάνεται τελικά καλύτερη απόδοση στο sum rate.

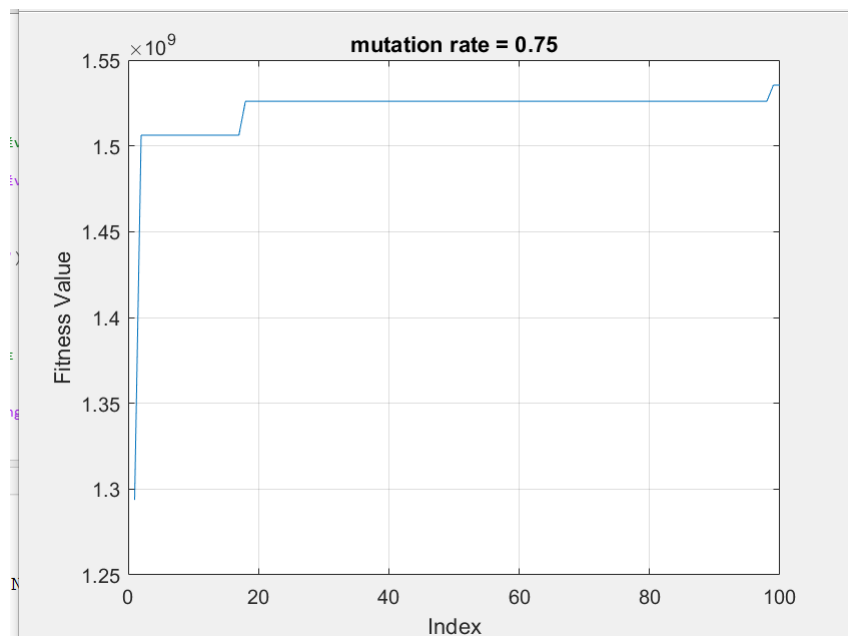
Η μείωση του mutation rate σε έναν γενετικό αλγόριθμο περιορίζει την τυχαιότητα στις μεταλλάξεις, επιτρέποντας στον αλγόριθμο να επικεντρωθεί περισσότερο στη βελτίωση των ήδη καλών λύσεων παρά στην δημιουργία νέων τυχαίων λύσεων. Αυτό μειώνει την πιθανότητα κακών αλλαγών και επιτρέπει μια πιο σταθερή και αξιόπιστη εξέλιξη του πληθυσμού. Με μικρότερο mutation rate, ο αλγόριθμος αποφεύγει να «χάνει» τις καλές λύσεις και έτσι καταλήγει σε καλύτερα αποτελέσματα.

Στην γραφική παράσταση 4.5.5, επιλέχθηκε το **mutation rate** να είναι 0.75, ενώ οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν αμετάβλητες. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή του sum rate είναι σημαντικά μικρότερη σε σχέση με τα αποτελέσματα που παρατηρήσαμε με μικρότερα mutation rates. Αυτό υποδεικνύει ότι με υψηλό

mutation rate, ο αλγόριθμος εισάγει περισσότερη τυχαιότητα στις μεταλλάξεις, γεγονός που οδηγεί σε λιγότερο αποτελεσματικές λύσεις και χαμηλότερη απόδοση στο sum rate.



Εικόνα 4.5.4: Καλύτερη επίδοση αντικειμενικής συνάρτησης για ρυθμό μετάλλαξης 0.05



Εικόνα 4.5.5 : Καλύτερη επίδοση αντικειμενικής συνάρτησης για ρυθμό μετάλλαξης 0.75

Κεφάλαιο 5^ο: Ανάλυση του κώδικα και αποτελέσματα

5.1 Εισαγωγή

Στα παραπάνω κεφάλαια έχουμε εξετάσει εκτενώς την ορολογία και τη θεωρία που σχετίζονται με τα κανάλια και την των Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS). Αναλύσαμε τις βασικές έννοιες που διέπουν τη λειτουργία των καναλιών επικοινωνίας, όπως το Signal-to-Noise Ratio (SNR), το sum rate, και τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του καναλιού. Επίσης, αναφερθήκαμε στις δυνατότητες που προσφέρει η τεχνολογία RIS για τη βελτίωση της ποιότητας και της ταχύτητας της μετάδοσης δεδομένων. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα εμβαθύνουμε στο κανάλι που υλοποιήθηκε και στην επεξήγηση του με σκοπό να αποδείξουμε τις θεωρίες και τις έννοιες που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η ανάπτυξη του καναλιού και του προσομοιωτή έγινε με τη χρήση MATLAB.

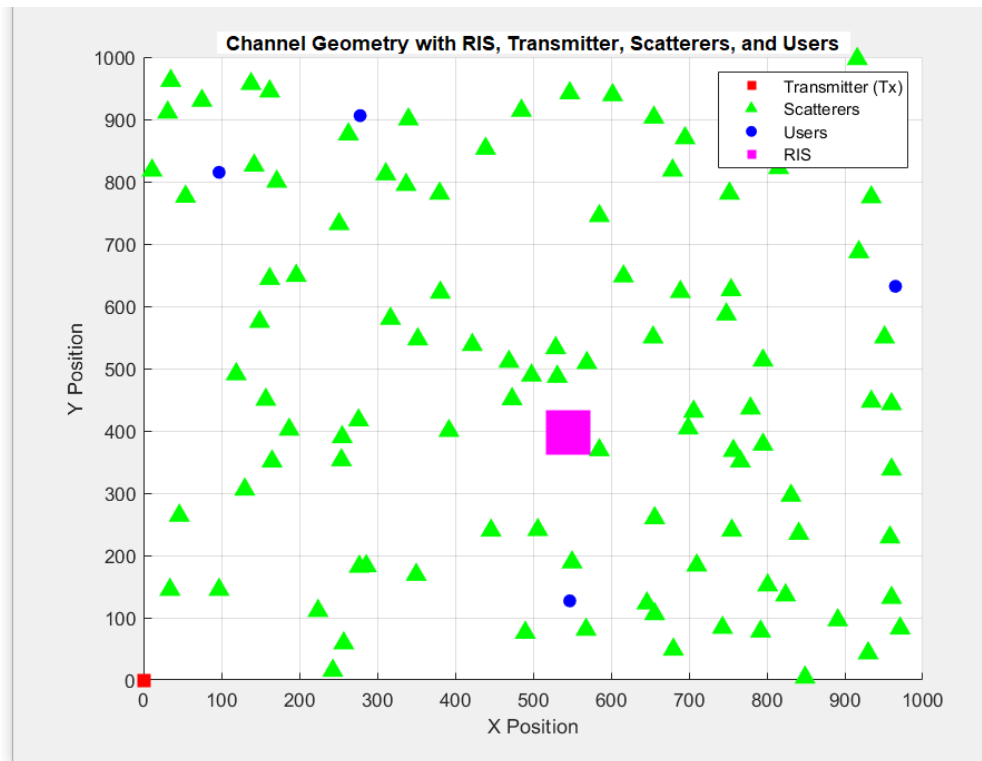
5.2 Ανάλυση Προσομοίωσης

5.2.1 Εισαγωγή καναλιού

Στο συγκεκριμένο σύστημα επικοινωνίας, έχουμε έναν πομπό (σταθμό βάσης) τοποθετημένο στη θέση (0, 0) και πέντε δέκτες (User Equipment - UEs) οι οποίοι βρίσκονται σε τυχαίες θέσεις. Οι θέσεις των δεκτών καθορίζονται τυχαία με τη βοήθεια της συνάρτησης randi, με σκοπό την δημιουργία ρεαλιστικής αναπαράσταση μιας ασύρματης επικοινωνίας.

Επιπλέον, το σύστημα περιλαμβάνει 100 σκεδαστές, οι οποίοι είναι διάσπαρτοι σε τυχαίες θέσεις μέσα στην ίδια περιοχή. Οι σκεδαστές αυτοί παίζουν κρίσιμο ρόλο στην προσομοίωση της διάδοσης των σημάτων, καθώς επηρεάζουν τη ποιότητα και την απόδοση της επικοινωνίας μεταξύ του πομπού και των δεκτών.

Στην παρακάτω γραφική αναπαράσταση, απεικονίζεται η γεωμετρία ενός καναλιού επικοινωνίας που περιλαμβάνει έναν πομπό (Tx), σκεδαστές, χρήστες (UEs) και μια RIS (Reconfigurable Intelligent Surface). Ο πομπός είναι τοποθετημένος στο κέντρο ως κόκκινο ορθογώνιο, ενώ οι σκεδαστές ως πράσινα τρίγωνα και επηρεάζουν τη διάδοση του σήματος. Οι χρήστες απεικονίζονται ως μπλε κύκλοι και λαμβάνουν το σήμα, ενώ το RIS, ως μοβ τετράγωνο, ανακατευθύνει το σήμα για να βελτιώσει την επικοινωνία. Αυτή η απεικόνιση αναδεικνύει τη διάταξη και τις αλληλεπιδράσεις των στοιχείων στο κανάλι.



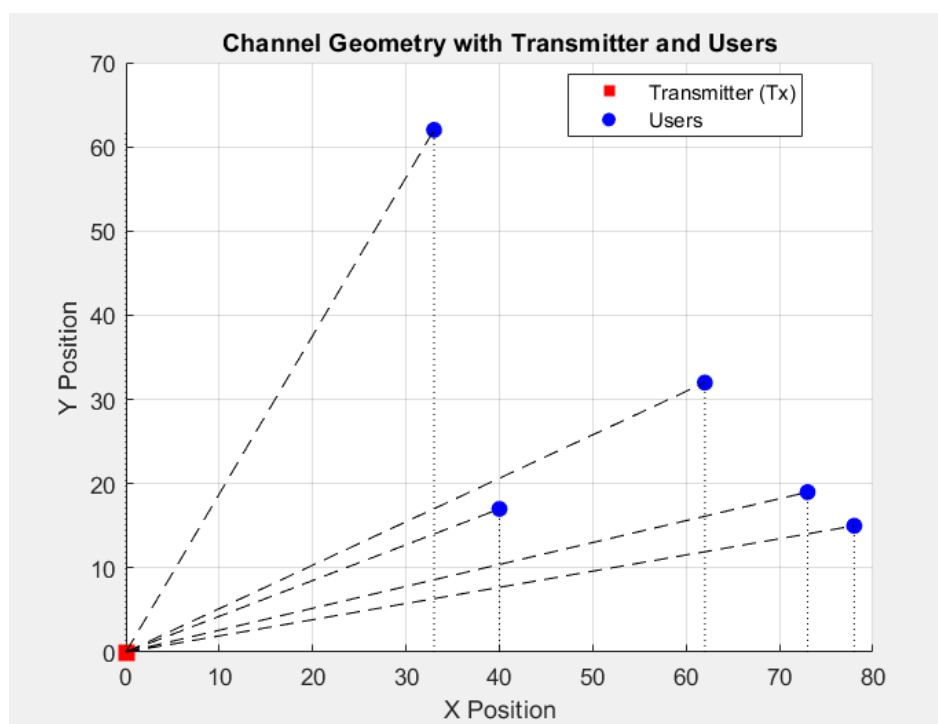
Εικόνα 5.1 : Γεωμετρία καναλιού στο matlab

5.2.2 Αποστάσεις

Στην συνέχεια, υπολογίσαμε τις αποστάσεις μεταξύ πομπού – δεκτών, χρησιμοποιώντας τον τύπο της ευκλείδειας απόστασης :

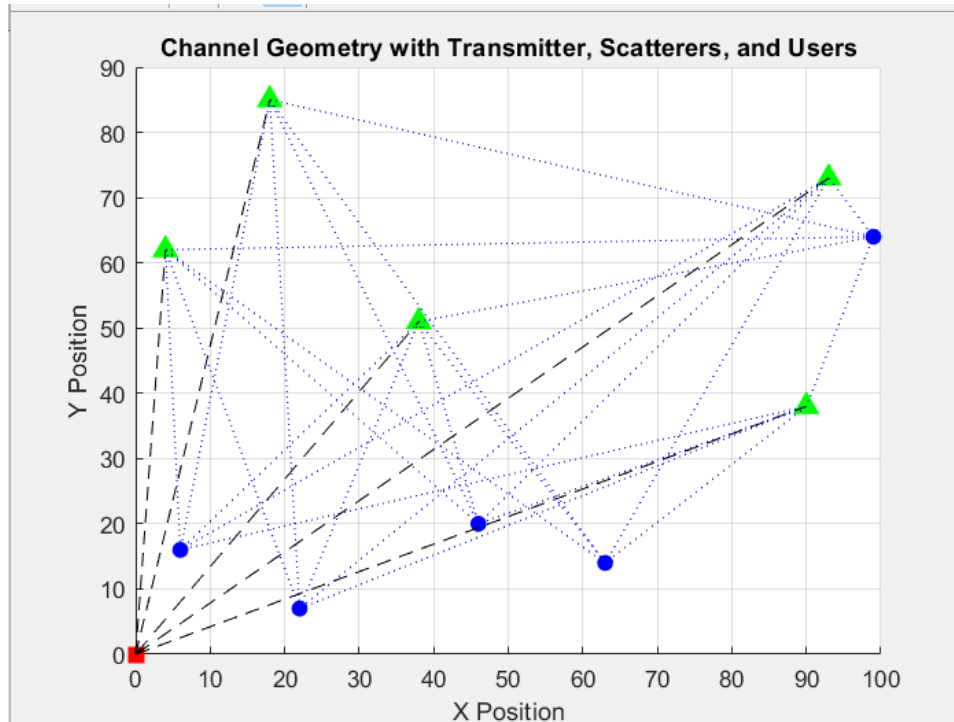
$$d_{TR} = \sqrt{(R_x - T_x)^2 + (R_y - T_y)^2}$$

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, για κάθε σημείο (χρήστη) γνωρίζουμε τις αποστάσεις στις συντεταγμένες x και y από την αρχή των αξόνων. Με αυτές τις πληροφορίες, υπολογίζουμε την υποτείνουσα ενός ορθογωνίου τριγώνου, η οποία αντιπροσωπεύει την απόσταση που μας ενδιαφέρει. Αυτή η γεωμετρική προσέγγιση μας επιτρέπει να κατανοήσουμε καλύτερα τις σχέσεις μεταξύ του πομπού και των χρηστών στο χώρο.



Εικόνα 5.2 : Αποστάσεις μεταξύ πομπών και δεκτών.

Την ίδια διαδικασία ακολουθούμε και για τον υπολογισμό αποστάσεων μεταξύ πομπού – σκεδαστών και δέκτη – σκεδαστων. Στην παρακάτω εικόνα η μαύρη διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει την απόσταση μεταξύ πομπού - σκεδαστή ενώ η μπλε την απόσταση δέκτη – σκεδαστή.



Εικόνα 5.3: Αποστάσεις μεταξύ Πομπού-RIS RIS-δέκτη.

Αφού υπολογίσαμε τις αποστάσεις, οι οποίες περιλαμβάνονται στη μεταβλητή, προχωράμε στη μελέτη των απωλειών διάδοσης. Οι απώλειες αυτές αναφέρονται στη μείωση της ισχύος του σήματος καθώς αυτό διαδίδεται μέσω του χώρου. Επηρεάζονται από την απόσταση μεταξύ των συσκευών και την παρουσία σκεδαστών. Χρησιμοποιούμε τον τύπο που έχουμε αναλύσει στο κεφάλαιο 3.1, ο οποίος περιγράφει την εξασθένηση του σήματος ανάλογα με την απόσταση και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Αυτές οι απώλειες είναι κρίσιμες για την κατανόηση της ποιότητας της επικοινωνίας, καθώς καθορίζουν την ικανότητα του σήματος να φτάσει στους δέκτες με επαρκή ισχύ.

Στην ανάλυσή μας, υπολογίζουμε τόσο τις συνιστώσες του σήματος μέσω της σχέσης (A είναι το μιγαδικό πλάτος, ενώ ο εκθετικός μιγαδικός, εκφράζει τη διαφορά φάσης του σήματος λόγω της απόστασης διαδρομής)

$$Ae^{-1i*k*d}$$

για Non-Line of Sight (NLOS) διαδρομές, όσο και για Line of Sight (LOS).

Ακολουθούμε τους ίδιους υπολογισμούς που είδαμε παραπάνω και με την τοποθέτηση του RIS. Επίσης, υπολογίζουμε την κατεύθυνση μεταξύ του RIS και του πομπού (Tx) χρησιμοποιώντας την παράμετρο I_{Φ} , η οποία καθορίζει αν η σχέση

είναι θετική ή αρνητική. Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στον RIS και τον πομπό με την εξίσωση:

$$\phi_{T_{RIS_{LOS}}} = I_{phi}^* \text{atan} \left(\frac{(|RIS_y - T_y|)}{(|RIS_x - T_x|)} \right)$$

Στη συνέχεια, επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία για τους χρήστες (UEs).

5.2.3 Doppler

Υπολογίζουμε τις ολισθήσεις Doppler που σχετίζονται με τις κινήσεις του πομπού, των δεκτών και των σκεδαστών. Ξεκινάμε ορίζοντας τις ταχύτητες του πομπού (U_{tx}) και των δεκτών (U_{rx}), καθώς και τις γωνίες κίνησης για κάθε δέκτη. Η ταχύτητα του πομπού ορίζεται σταθερή, ενώ για τους δέκτες μπορεί να είναι τυχαία.

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τις σχετικές ταχύτητες μεταξύ των στοιχείων της επικοινωνίας, όπως πομπού και δεκτών, πομπού και RIS, και RIS και δεκτών. Αυτές οι σχετικές ταχύτητες είναι σημαντικές για τον υπολογισμό των Doppler συχνοτήτων. Ειδικότερα, η Doppler συχνότητα υπολογίζεται μέσω των γωνιών και των σχετικών ταχυτήτων – όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3.

Επιπλέον, υπολογίζουμε τα αποτελέσματα για τις ευθεία μονοπάτια οπτικής επαφής (LOS) και τα μη άμεσα μονοπάτια (NLOS). Για τις LOS διαδρομές, χρησιμοποιούμε τις αντίστοιχες εξισώσεις για να υπολογίσουμε τις Doppler ολισθήσεις. Αντίστοιχα, για τις NLOS διαδρομές, υπολογίζουμε τις σχετικές ταχύτητες και τις Doppler συχνότητες, συμπεριλαμβανομένων των σκεδαστών.

Ο τελικός στόχος είναι να έχουμε μια ολοκληρωμένη εικόνα των Doppler επιδράσεων στην επικοινωνία, λαμβάνοντας υπόψη τις κινήσεις όλων των στοιχείων του συστήματος. Αυτός ο υπολογισμός είναι κρίσιμος για την εκτίμηση της ποιότητας και της απόδοσης της επικοινωνίας σε δυναμικά περιβάλλοντα.

5.2.4 Path delays

$$T_{delay} = \left(\frac{d_{T_{S_{vector}}} + d_{S_{R_{vector}}}}{3 * 10^8} \right)$$

Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιήθηκε για να υπολογίσει τις καθυστερήσεις διαδρομής (path delays) για το σύστημα επικοινωνίας, λαμβάνοντας υπόψη τις

αποστάσεις από τον πομπό (Tx) στους σκεδαστές και από τους σκεδαστές στους δέκτες (Rx).

Συγκεκριμένα:

- **d_T_S_vector**: Αυτή η μεταβλητή περιέχει τις αποστάσεις από τον πομπό στους σκεδαστές.
- **d_S_R_vector**: Αυτή η μεταβλητή περιέχει τις αποστάσεις από τους σκεδαστές στους δέκτες.

Η συνολική καθυστέρηση διαδρομής υπολογίζεται προσθέτοντας τις αποστάσεις και διαιρώντας το αποτέλεσμα με το c , δηλ. την ταχύτητα του φωτός ($3 \times 10^8 \text{m/sec}$). Αυτό μας δίνει τον χρόνο που απαιτείται για το σήμα να διασχίσει τις αποστάσεις αυτές, και οι καθυστερήσεις αυτές είναι κρίσιμες για την εκτίμηση της συγχρονισμένης λειτουργίας του συστήματος και της ποιότητας της επικοινωνίας.

5.2.5 Συμπερίληψη ενός Uniform Linear Array (ULA)

Στην παρούσα ενότητα, αναλύουμε τη δομή και τη λειτουργία μιας υπερεπίπεδης διάταξης κεραιών (ULA). Ο γενικός τύπος για την απόκριση της κεραίας $a_m(\theta, \phi)$ περιγράφει τη συμπεριφορά της ανάλογα με τις γωνίες θ και ϕ . Θεωρούμε ότι ο πομπός χρησιμοποιεί ULA για την εκπομπή.

Σε περιπτώσεις όπου

Για $m = 0$:

$$a_m(\theta, \phi) = 1$$

Για $m \neq 0$:

$$a_m(\theta, \phi) = e^{j \cdot b_m \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi - \phi_m)}$$

Στο συγκεκριμένο σενάριο, θεωρούμε ότι οι κεραίες είναι τοποθετημένες σε ευθεία γραμμή, οπότε η γωνία που σχηματίζεται από την αρχή των αξόνων είναι 0. Επιπλέον, για να απλοποιήσουμε τους υπολογισμούς, υποθέτουμε ότι $\sin(\theta)=1$, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση του τύπου $b_m = 2\pi \cdot \left(\frac{d}{\lambda}\right)$, όπου ως d εκφράζεται η απόσταση μεταξύ διαδοχικών στοιχείων της στοιχειοκεραίας και στην περίπτωση

αυτή θεωρούμε ότι $d=\lambda/2$. Αυτή η προσέγγιση είναι κρίσιμη για την ανάλυση της απόκρισης του καναλιού σε περιβάλλοντα με πολλαπλές διαδρομές.

Η συνάρτηση που υλοποιήθηκε για τον υπολογισμό των παραπάνω :

Δημιουργία Πίνακα: Δημιουργεί έναν πίνακα με διαστάσεις $n \times 1$, όπου οι στήλες αναπαριστούν τους δείκτες των σκεδαστών.

Αρχικοποίηση Μεταβλητών:

- Δημιουργούνται πίνακες για τις αποστάσεις και τις γωνίες.
- Η απόσταση μεταξύ των στοιχείων υπολογίζεται ως το μισό του μήκους κύματος λ .

Υπολογισμός Αποστάσεων και Γωνιών:

- Για κάθε στοιχείο του πίνακα, υπολογίζεται η απόσταση από το σημείο (1,1).
- Αν βρίσκεστε στην πρώτη γραμμή, η απόσταση υπολογίζεται ως $(j-1) \times d$.
- Σε άλλες περιπτώσεις, χρησιμοποιείται ο τύπος της ευκλείδειας απόστασης.
- Υπολογίζεται η γωνία ϕ_m για κάθε σημείο.

Σημειώνεται ότι ο συγκεκριμένος τύπος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε γεωμετρία κεραίας και όχι μόνο για ULA.

Αποθήκευση Αποτελεσμάτων:

- Ο πίνακας a γεμίζει με τις τιμές που υπολογίζονται για τις γωνίες και τις αποστάσεις.
- Οι υπολογισμοί βασίζονται στη διαφορά της γωνίας ϕ από την ϕ_m .

5.2.6 Υπολογισμός του Σηματοθορυβικού λόγου (SNR)

Δημιουργήσαμε μια συνάρτηση που ονομάζεται `calculateSNR` με σκοπό τον υπολογισμό του Σηματοθορυβικού λόγου (SNR) από τον πίνακα καναλιού H σε κάθε χρονική στιγμή. Στο συγκεκριμένο κανάλι οι δέκτες είναι σε αριθμό πέντε ενώ τα στοιχεία του πομπού τέσσερα (ULA τεσσάρων στοιχείων). Στην εν λόγω συνάρτηση γίνεται ο υπολογισμός της χωρητικότητας (C) για όλους τους δέκτες και ο δέκτης με την μικρότερη χωρητικότητα απορρίπτεται από τη μετάδοση (B εύρος ζώνης, S ισχύς σήματος και N ισχύς θορύβου).

$$C = B \log\left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

Ως αποτέλεσμα θα έχουμε τέσσερις δέκτες. Στον νέο πίνακα που προκύπτει έχοντας αφαιρέσει τον δέκτη με την μικρότερη χωρητικότητα εφαρμόζουμε Singular Value Decomposition (SVD). Η συγκεκριμένη διαδικασία χωρίζει τον πίνακα σε τρεις άλλους U , S , V . Στον διαγώνιο πίνακα S βρίσκονται τα singular values του αρχικού πίνακα, οι οποίες παρέχουν πληροφορίες για το πόσες ανεξάρτητες διαδρομές μπορούν να υπάρξουν μεταξύ πομπού και δέκτη, και την ισχύ που παρέχει το σύστημα για την μετάδοση του κάθε σήματος.

Στην ίδια συνάρτηση αφού υπολογίσουμε το SNR, κάνουμε και υπολογισμό του sum rate χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο :

$$R_{total} = B * \log_2(1 + \text{trace}(S^2)/\sigma^2)$$

Όπου το trace υπολογίζει το ίχνος του πίνακα των τετραγώνων των singular values και σ^2 η διασπορά και ισχύς του θορύβου.

5.2.7 Υπολογισμός του Καναλιού από Πομπό προς RIS & από RIS προς κάθε Δέκτη

Αρχικά, υπολογίζουμε το κανάλι από τον πομπό (Tx) προς το RIS (Reflective Intelligent Surface). Δημιουργούμε έναν τρισδιάστατο πίνακα H_{tx_ris} , ο οποίος αποθηκεύει τις τιμές του καναλιού για κάθε χρονική στιγμή. Χρησιμοποιούμε τη συνάρτηση που αναφέρουμε στο 5.2.4 για να υπολογίσουμε τις αποστάσεις και τις φάσεις από τον πομπό προς το RIS, με τις γωνίες $\phi_{T_RIS_LOS}$ και $\phi_{T_to_scatterer}$.

Ακολουθεί η διαδικασία για το κανάλι από το RIS προς τον δέκτη (Rx). Δημιουργούμε έναν πίνακα H_{RIS_rx} , όπου αποθηκεύονται οι τιμές του καναλιού για κάθε χρήστη (UE). Καλούμε τη συνάρτηση που αναφέραμε στο 5.2.4 για να υπολογίσουμε τις αποστάσεις και τις φάσεις από το RIS προς τον δέκτη, χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες γωνίες $\phi_{RIS_UE_LOS}$ και $\phi_{from_ris_to_scat}$. Για κάθε χρονική στιγμή, πάλι συνδυάζουμε τις τιμές του καναλιού LOS και NLOS, και ενημερώνουμε τον πίνακα H_{RIS_rx} .

5.3 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα εξομοίωσης της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται στην συγκεκριμένη παράγραφο, εστιάζοντας στη σύγκριση του SNR (Signal-to-Noise Ratio) και του sum rate

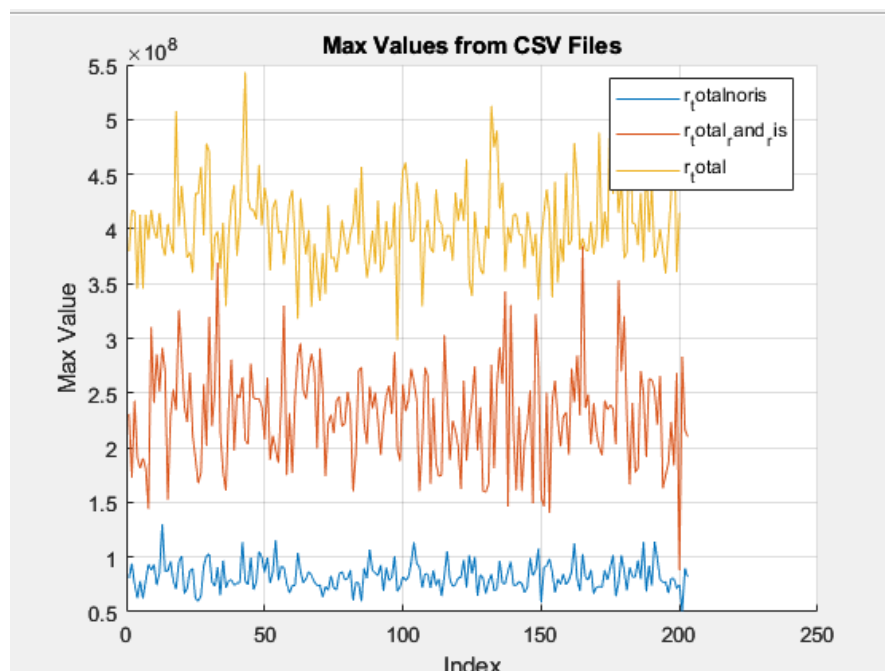
Χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω υπολογισμοί για τη σύγκριση του SNR των χρηστών και του sum rate της θεωρούμενης διάταξης σε διάφορες συνθήκες. Ειδικότερα, εξετάσαμε τρεις περιπτώσεις:

1. **Χωρίς RIS:** Εδώ υπολογίσαμε το SNR και το sum rate χρησιμοποιώντας τις τυχαίες τιμές των παραμέτρων του καναλιού χωρίς την παρέμβαση του RIS.

2. **Με RIS με τυχαίες τιμές:** Στη δεύτερη περίπτωση, προσθέσαμε το RIS και υπολογίσαμε ξανά το SNR και το sum rate με τυχαίες τιμές για τις παραμέτρους του A που αναφέρουμε και πιο πάνω. Αυτή η σύγκριση μας βοήθησε να κατανοήσουμε την επίδραση του RIS στην απόδοση του συστήματος.
3. **Με RIS σε βέλτιστη ρύθμιση:** Τέλος, υπολογίσαμε το SNR και το sum rate με τον RIS ρυθμισμένο σε βέλτιστες τιμές του όπως υπολογίζονται με τους Γενετικούς Αλγορίθμους. Αυτή η ρύθμιση μας έδωσε τη δυνατότητα να αξιολογήσουμε την καλύτερη δυνατή απόδοση του συστήματος με τη χρήση του.

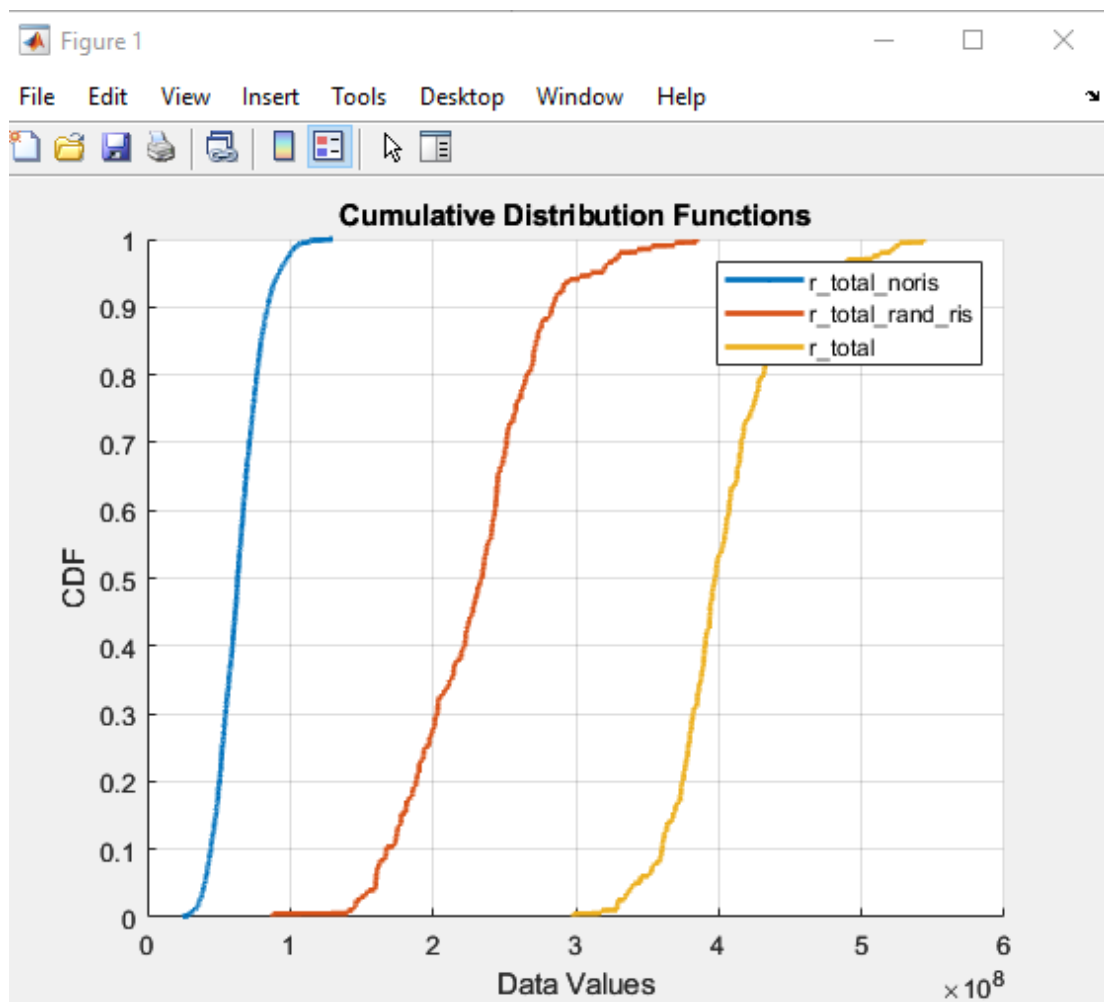
Οι τιμές που έχουν χρησιμοποιηθεί στα παρακάτω αποτελέσματα είναι από 200 διαφορετικές εκτελέσεις του κώδικα.

Στην παρακάτω γραφική παράσταση, βλέπουμε το sum rate για τρεις περιπτώσεις: το κανάλι χωρίς τη χρήση RIS (μπλε γραμμή), το κανάλι με RIS και τυχαίες τιμές στις παραμέτρους ϕ και γ (κόκκινη γραμμή), και το κανάλι με RIS χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες τιμές των ϕ και γ , όπως προέκυψαν από τον γενετικό αλγόριθμο (κίτρινη γραμμή). Όπως αναμέναμε, η χρήση των βέλτιστων τιμών με το RIS (κίτρινο) επιτυγχάνει τον καλύτερο ρυθμό μετάδοσης, ενώ η χειρότερη απόδοση παρατηρείται στην περίπτωση χωρίς RIS (μπλε).



Εικόνα 5.4 : Sum rate για όλες τις περιπτώσεις σε 200 εκτελέσεις του κώδικα

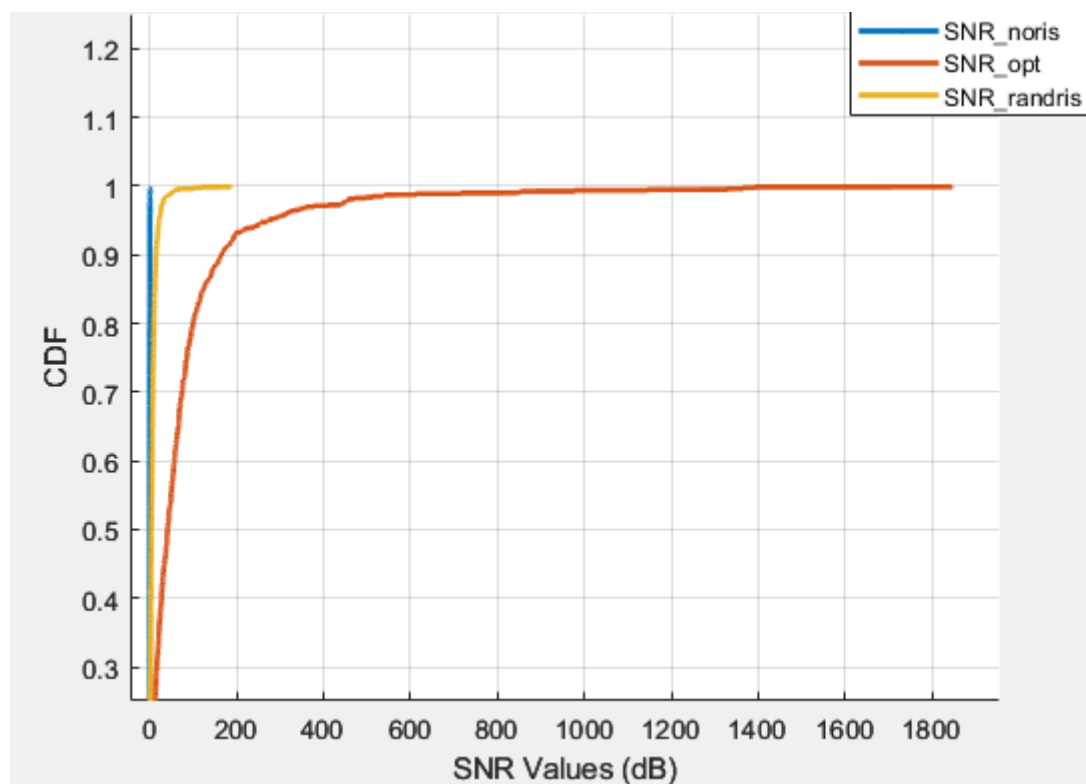
Η παρακάτω εικόνα έγινε με την χρήση της εμπειρικής συνάρτησης αθροιστικής κατανομής πιθανότητας **Cumulative Distribution Function (CDF)** που στο matlab υλοποιείται με την cdfplot. Σε ένα CDF plot, ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει τις τιμές της τυχαίας μεταβλητής στο συγκεκριμένο παράδειγμα το sum rate, ενώ ο κάθετος άξονας δείχνει την πιθανότητα (ή το ποσοστό) η τιμή της μεταβλητής να είναι ίση ή πιο μικρή με το κατώφλι της τιμής του οριζόντιου άξονα.



Εικόνα 5.5 : Οπτικοποίηση του sum rate με χρήση cdf plot.

Στη συγκεκριμένη γραφική παράσταση της CDF, παρατηρούμε ότι η καμπύλη που αντιπροσωπεύει το κανάλι με RIS και τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων ϕ και γ είναι πιο μετατοπισμένη προς τα δεξιά. Αυτή η μετατόπιση υποδηλώνει ότι το κανάλι με τις βέλτιστες παραμέτρους του RIS επιτυγχάνει υψηλότερες τιμές του sum rate με μεγάλη πιθανότητα, υποδεικνύοντας έτσι πολύ καλύτερη συνολική απόδοση.

Η παρακάτω γραφική παράσταση αντιπροσωπεύει το εκτιμώμενο SNR για τις 3 διαφορετικές περιπτώσεις που είδαμε παραπάνω.



Εικόνα 5.6 : Οπτικοποίηση του SNR με χρήση *cdf plot*.

Από την παρατήρηση της γραφικής παράστασης, βλέπουμε ότι η **κόκκινη γραμμή** (με το βέλτιστο RIS) είναι πιο μετατοπισμένη προς τα δεξιά σε σχέση με τις άλλες δύο. Αυτό δείχνει ότι το SNR επιτυγχάνει μεγαλύτερες τιμές με υψηλή πιθανότητα, κάτι που υποδηλώνει ότι το κανάλι με βέλτιστες τιμές στο RIS παρουσιάζει τη βέλτιστη απόδοση.

Η **μπλε γραμμή** (κανάλι χωρίς RIS) έχει τα χαμηλότερα επίπεδα SNR, ενώ η **κίτρινη γραμμή** (RIS με τυχαίες τιμές) παρουσιάζει μια ενδιάμεση συμπεριφορά, με το SNR να είναι καλύτερο από το κανάλι χωρίς RIS αλλά υποδεέστερο από το κανάλι με βέλτιστο RIS.

Συμπεραίνουμε ότι η χρήση του RIS με τις βέλτιστες τιμές βελτιώνει σημαντικά την απόδοση του καναλιού, όπως φαίνεται από τη μετατόπιση της κόκκινης καμπύλης προς τα δεξιά, ενώ η τυχαία ρύθμιση των παραμέτρων στο RIS έχει περιορισμένο αντίκτυπο στην απόδοση του καναλιού σε σύγκριση με την πλήρη απουσία RIS.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Φωτιάδη Α., "5G και 6G Επικοινωνίες και Δίκτυα", Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Εφαρμοσμένης Πληροφορικής, Θεσσαλονίκη, 2024
- [2] Fangyi S., Hang S, Yuxuan Y, "A comprehensive study of 5G and 6G networks", 2021 International Conference on Wireless Communications and Smart Grid (ICWCSG) | 978-1-6654-2598-8/21/\$31.00 ©2021 IEEE | DOI: 10.1109/ICWCSG53609.2021.00070, 2021
- [3] Τσιακίρης Π., "Μελέτη και Σύγκριση Στοιχειοκεραιών σε Χιλιοστομετρικά Συστήματα Massive Mimo", Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Τηλεπικοινωνιών, Θεσσαλονίκη, 2021.
- [4] Editorial Team - everything RF, "What are Reconfigurable Intelligent Surfaces?", 2023, <https://www.everythingrf.com/community/what-are-reconfigurable-intelligent-surfaces>
- [5] ETSI, "Reconfigurable Intelligent Surfaces", 2024, <https://www.etsi.org/technologies/reconfigurable-intelligent-surfaces?iij=1720929099942>
- [6] Hongliang Z, Boya D., Lingyang S., Zhu H., "Reconfigurable Intelligent Surface-Empowered 6G", Springer, ISBN 978-3-030-73498-5, 2021, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-73499-2>
- [7] Κανελλοπούλου Κ., "Μελέτη στοχαστικών μοντέλων διαλείψεων και προσομοίωση φυσικού επιπέδου ασύρματης ζεύξης", Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στη Διοίκηση και Οικονομική των Τηλεπικοινωνιακών Δικτύων, Αθήνα, 2011.
- [8] Grami A., "Introduction to Digital Communications", 2016, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/doppler-spread>
- [9] Καραδημητρίου Μ., "Φαινόμενο Ντόμπλερ (Doppler)", 2011, <https://perifysikhs.com/wp-content/uploads/2011/05/doppler.pdf>
- [10] arminderkaur192, "What is LOS (line of sight)", 2024, <https://telcomatraining.com/what-is-los-line-of-sight/>
- [11] RF Wireless World, "LOS Vs NLOS | Difference Between LOS And NLOS Wireless Channels", 2012, <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/LOS-vs-NLOS-wireless-channel.html>

- [12] Τσιγγούρ Ι., "Μοντέλα διάδοσης για 5G", Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Τηλεπικοινωνιών, Θεσσαλονίκη, 2022
- [13] Μιχαηλίδης Ε., "Ψηφιακές Τεχνικές Χωρικής Διαμόρφωσης του Διαγράμματος Ακτινοβολίας σε Ασύρματα Συστήματα Επικοινωνιών", Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Διδακτικής της Τεχνολογίας και Ψηφιακών Συστημάτων, 2006,
<https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/bitstream/handle/unipi/1492/Mixailidis.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- [14] Zhenyu X., Lipeng Z., Yanming L., Pengfei Y., Rui Z., Xiang-Gen X., Schober R., "A Survey on Millimeter-Wave Beamforming Enabled UAV Communications and Networking", 2022, https://www.researchgate.net/figure/Geometric-structures-of-three-types-of-antenna-arrays-a-ULA-b-URA-c-UCA_fig3_355864493
- [15] Manikas A., Sleiman A., Dacos I., "Manifold Studies of Nonlinear Antenna Array Geometries", IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, VOL. 49, NO. 3, MARCH 2001
- [16] Αρμενιάκος Χ., "Ανάπτυξη Γεωμετρικού Στοχαστικού Μοντέλου Διαύλου για Επικοινωνίες Μεταξύ Οχημάτων", Πανεπιστήμιο Πειραιώς, Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων, Π.Μ.Σ. Ψηφιακές Επικοινωνίες και Δίκτυα, Πειραιάς 2018
- [17] Holland J. H., "Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence", University of Michigan Press, 1975
- [18] Μπαλτζόγλου Ε., "Γενετικός Αλγόριθμος στο Πρόβλημα Επιλογής Μεταβλητών", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών & Φυσικών Επιστημών, Τομέας Μαθηματικών, Αθήνα, 2000,
<https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/42721/%CE%93%CE%95%CE%9D%CE%95%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%9F%CE%A3%20%CE%91%CE%9B%CE%93%CE%9F%CE%A1%CE%99%CE%98%CE%9C%CE%9F%CE%A3.pdf?sequence=1>
- [19] Λυκοθανάσης Σ., "Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές", Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Πρόγραμμα Σπουδών, Πληροφορική, Θεματική Ενότητα, Τεχνητή Νοημοσύνη και Εφαρμογές, Τόμος Γ, Πάτρα, 2001, <https://psifiakoskosmos.wordpress.com/wp-content/uploads/2009/12/likothanasis1.pdf>
- [20] <https://www.mathworks.com/discovery/genetic-algorithm.html>
- [21] I. Sen and D. W. Matolak, "V2V channels and performance of multiuser spread spectrum modulation," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 2, no. 4, pp. 19-25, Dec. 2007,