



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

**Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών**

## **Διπλωματική Εργασία**

**Εκτίμηση καναλικών συνθηκών υπό την παρουσία  
αναδιαρθρώσιμων ευφυών επιφανειών σε ασύρματες  
επικοινωνίες πέραν της 5ης γενιάς**

Παπάς Αχιλλέας  
Α.Μ.: 18390010

Εισηγητής: Μυριδάκης Νικόλαος, Επίκουρος Καθηγητής



## Διπλωματική Εργασία

Εκτίμηση καναλικών συνθηκών υπό την παρουσία αναδιαρθρώσιμων ευφυών επιφανειών σε ασύρματες επικοινωνίες πέραν της 5ης γενιάς.

Εισηγητής:

Μυριδάκης Νικόλαος, Επίκουρος Καθηγητής

Η εξεταστική επιτροπή:

A/α	Όνοματεπώνυμο	Βαθμίδα	Υπογραφή
1	Μυριδάκης Νικόλαος	Επίκουρος Καθηγητής	
2	Καρκαζής Παναγιώτης	Αναπληρωτής Καθηγητής	
3	Μαυρομάτης Κωνσταντίνος	Λέκτορας	

Ημερομηνία εξέτασης: 03/10/2023



## Δήλωση Συγγραφέα Διπλωματικής Εργασίας

Ο υπογράφων Παππάς Αχιλλέας, με αριθμό μητρώου 18390010, φοιτητής του Προγράμματος Προπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Ο Δηλών

Παππάς Αχιλλέας

Handwritten signature of Achilleas Pappas in black ink, consisting of a stylized initial 'Α' followed by the name 'αρχαας'.



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινές μου ευχαριστίες προς τον αξιότιμο επιβλέποντα καθηγητή, κύριο Μυριδάκη Νικόλαο, με ειλικρίνη εκτίμηση για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και την υποστήριξή του στο έργο μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να απευθύνω τις θερμές μου ευχαριστίες προς το σύνολο των καθηγητών καθώς κατά τη διάρκεια του κύκλου σπουδών μου, απέκτησα μια εποικοδομητική συνεργασία μαζί τους, προκειμένου να αναπτύξω τις γνώσεις και τις ικανότητές μου.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τη βαθιά ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου για την αφοσίωση, την αμέριστη υποστήριξη και την απέραντη υπομονή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.





## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναλύει και ερευνά το σημαντικό πεδίο της καναλικής εκτίμησης σε συστήματα με Αναδιαρθρώσιμες Ευφυείς Επιφάνειες. Η καναλική εκτίμηση σε συστήματα με Αναδιαρθρώσιμες Ευφυείς Επιφάνειες αναδεικνύεται ως ουσιώδης παράγοντας για την εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών. Αυτή η εκτίμηση επιτρέπει την αποτελεσματικότερη χρήση των RIS, βελτιώνοντας την ποιότητα των επικοινωνιών, αυξάνοντας την ενεργειακή αποδοτικότητα, και διαμορφώνοντας νέες εφαρμογές. Επιπλέον, συμβάλλει στην ενίσχυση της ασφάλειας των επικοινωνιών και προάγει την έρευνα και την ανάπτυξη σε αυτόν τον τομέα, ενισχύοντας την εξέλιξη της τεχνολογίας και τη δημιουργία νέων επικοινωνιακών δυνατοτήτων. Με αυτόν τον τρόπο, η καναλική εκτίμηση στα RIS διαδραματίζει ένα κρίσιμο ρόλο στην προώθηση της ασύρματης τεχνολογίας προς ακόμα πιο αποδοτικές, αξιόπιστες και ευέλικτες επικοινωνίες. Στο Κεφάλαιο 1, εξετάζετε η εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών, παρέχοντας επίσης ενδιαφέροντα στοιχεία για την αρχή των τηλεπικοινωνιών και τη δομή των δικτύων. Εξετάζετε επίσης τη σημασία της εκτίμησης καναλικών συνθηκών στις ασύρματες μεταδόσεις. Στο Κεφάλαιο 2, αναλύετε η λειτουργία των RIS, εξετάζοντας τα βασικά στάδια λειτουργίας, τα πλεονεκτήματά τους σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα και η κατασκευαστική δομή των RIS. Το Κεφάλαιο 3 επικεντρώνεται στην εκτίμηση καναλικών συνθηκών σε συστήματα με RIS. Περιγράφονται τα κύρια προβλήματα που αντιμετωπίζονται, τις μεθόδους εκτίμησης καναλιού και τους. Στο Κεφάλαιο 4, αναλύεται ο κώδικας, σενάρια και σχήματα, παρέχοντας περισσότερες τεχνικές λεπτομέρειες για την εφαρμογή των RIS σε διάφορες περιπτώσεις. Στο Κεφάλαιο 5, συμπεραίνονται τα αποτελέσματα της εργασίας και προβάλλονται πιθανές κατευθύνσεις για το μέλλον στον τομέα των RIS.

## Abstract

The current diplomatic thesis analyzes and investigates the significant field of channel estimation in systems with Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS). Channel estimation in systems with Reconfigurable Intelligent Surfaces is highlighted as an essential factor for the evolution of wireless communications. This estimation enables more efficient use of RIS, improving communication quality, increasing energy efficiency, and shaping new applications. Furthermore, it contributes to enhancing communication security and promotes research and development in this area, strengthening technological advancements and creating new communication possibilities. In this way, channel estimation in RIS plays a critical role in advancing wireless technology towards even more efficient, reliable, and flexible communications. In Chapter 1, the evolution of wireless communications is examined, also providing interesting insights into the principles of telecommunications and network structures. The importance of channel estimation in wireless transmissions is also discussed. In Chapter 2, the operation of RIS is analyzed, covering the basic stages of operation, their advantages compared to conventional systems, and the structural design of RIS. Chapter 3 focuses on channel estimation in systems with RIS. It describes the main challenges faced, channel estimation methods, and more. In Chapter 4, the code, scenarios, and schemes are analyzed, providing more technical details on the implementation of RIS in various cases. Chapter 5 concludes the results of the work and presents possible directions for the future in the field of RIS.

## Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 .....	21
1.1. Ασύρματες Επικοινωνίες .....	21
1.1.1. Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών Πρώτης Γενιάς .....	21
1.1.1.1. Η Αρχή των Τηλεπικοινωνιών .....	21
1.1.1.2. Δομικά Στοιχεία .....	21
1.1.2. Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών Δεύτερης Γενιάς.....	22
1.1.2.1. Το πρότυπο GSM.....	22
1.1.2.2. Τα πρότυπα GPRS και EDGE.....	22
1.1.2.3. Δομικά Στοιχεία .....	22
1.1.3. Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών Τρίτης Γενιάς.....	23
1.1.3.1. Το πρότυπο UTMΣ.....	23
1.1.3.2. Τα πρότυπα HSPA και HSPA Plus .....	23
1.1.3.3. Δομικά Στοιχεία .....	24
1.1.4. Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών Τέταρτης Γενιάς .....	24
1.1.4.1. Το πρότυπο LTE.....	24
1.1.4.2. Δομικά Στοιχεία .....	25
1.1.5. Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών Πέμπτης Γενιάς .....	25
1.1.5.1. Η αρχή των Δικτύων Νέας Γενιάς .....	25
1.1.5.2. eMBB, URLLC και mMTC .....	25
1.1.5.3. Λειτουργίες NSA, SA και η προοπτική του NOMA.....	25
1.2. Σημαντικότητα Εκτίμησης Καναλικών Συνθηκών .....	26
1.2.1. Προκλήσεις Ασύρματης Μετάδοσης .....	26
1.2.2. Τεχνικές Εκτίμησης Καναλιού .....	26
1.3. Στόχος των Αναδιαρθρώσιμων Ευφυών Επιφανειών .....	28
1.3.1. Προκλήσεις από το Διαδίκτυο των Πάντων και τα Δίκτυα Νέας Γενιάς .....	28
1.3.2. Η Προσφορά του RIS.....	28
1.3.3. Στόχοι του RIS.....	28
1.4. Σημαντικότητα Εκτίμησης του Καναλιού σε Αναδιαρθρώσιμες Ευφυής Επιφάνειες.....	29
1.5. Κίνητρο.....	30
Κεφάλαιο 2 .....	33
2.1. Λειτουργία των Αναδιαρθρώσιμων Ευφυών Επιφανειών .....	33
2.1.1. Τρία Βασικά Στάδια Λειτουργίας.....	33
2.1.2. Σενάριο Λειτουργίας στον Πραγματικό Κόσμο .....	33
2.1.3. Καταστάσεις Λειτουργίας των Παθητικών Στοιχείων .....	34
2.1.3.1. Λειτουργία Απορρόφησης .....	35

2.1.3.2. Λειτουργία Ανάκλασης .....	36
2.1.4. Λειτουργία Βάση του Τύπου του RIS .....	36
2.1.4.1. Ενεργού Τύπου RIS.....	36
2.1.4.2. Παθητικού Τύπου RIS .....	36
2.2. Πλεονεκτήματα των Αναδιαρθρώσιμων Ευφών Επιφανειών.....	37
2.2.1. Κύρια Πλεονεκτήματα .....	37
2.2.2. Πλεονεκτήματα σε Σχέση με Relays .....	38
2.2.2.1. Πολυπλοκότητα Υλικού .....	38
2.2.2.2. Θόρυβος.....	38
2.2.2.3. Αποδοτικότερη Χρησιμοποίηση Φάσματος .....	38
2.2.2.4. Απαιτήσεις Ισχύος.....	38
2.3. Κατασκευαστική Δομή των Αναδιαρθρώσιμων Ευφών Επιφανειών.....	39
2.3.1. Ανάλυση Στρωμάτων .....	39
2.3.2. Ανάλυση Υλικών.....	40
2.3.2.1. Διοξειδίο του Βαναδίου.....	40
2.3.2.2. Συμπληρωματικοί Ημιαγωγοί Οξειδίων Μετάλλου .....	41
2.3.2.3. Δίοδος Schottky .....	41
2.3.2.4. Τρανζίστορ Ηλεκτρονίων Υψηλής Κινητικότητας.....	42
Κεφάλαιο 3 .....	44
3.1. Εκτίμηση Καναλιού σε Αναδιαρθρώσιμες Ευφυείς Επιφάνειες .....	44
3.1.1. Κύρια Προβλήματα σε Συστήματα με RIS .....	44
3.1.2. Εκτίμηση/Απόκτηση Καναλιού σε RIS .....	44
3.1.3. Πρακτικός Σχεδιασμός Παθητικής Δέσμμευσης/Αντανάκλασης σε RIS.....	44
3.1.4. Περιορισμοί και Ατέλειες Υλικού.....	44
3.2.1. Εκτίμηση Καναλιού για Διαφορετικές Αρχιτεκτονικές RIS .....	45
3.2.2. Ξεχωριστή Εκτίμηση Καναλιού με το Ημι-παθητικό RIS .....	45
3.2.3. Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις.....	46
3.2.4. Διαδοχική Εκτίμηση Καναλιού με Πλήρως Παθητικό RIS .....	46
3.2.5. Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις.....	47
3.2.6. Σύγκριση/Συνδυασμός Ξεχωριστής και Διαδοχικής Εκτίμησης Καναλιού.....	48
3.3. Εκτίμηση Καναλιού για Διαφορετικές Εγκαταστάσεις Συστημάτων RIS.....	48
3.3.1. Σύστημα Μονού Χρήστη με Μοναδικό RIS .....	48
3.3.2. Σύστημα Πολλαπλών Χρηστών με Μοναδικό RIS .....	49
3.3.3. Διπλό/Πολλαπλό Σύστημα RIS.....	49
3.3.4. Ευρυζωνικό Σύστημα με Μοναδικό RIS.....	49
3.4. Μέθοδοι Επεξεργασίας Σήματος για Εκτίμηση Καναλιού σε RIS.....	50

3.4.1. Κλασσικές Μεθόδους Εκτίμησης.....	50
3.4.2. Συμπιεσμένη Αίσθηση .....	50
3.4.3. Παραγοντοποίηση/Αποσύνθεση Μητρών .....	50
3.4.4. Βαθιά Μάθηση .....	51
3.5. Σχεδιασμός Παθητικής Δέσμης RIS με Πρακτικό CSI.....	51
3.5.1.1. Σχεδιασμός Παθητικής Δέσμης RIS με Ατελές CSI.....	51
3.5.1.2. Ντετερμινιστικό Μοντέλο.....	51
3.5.1.3. Στοχαστικό Μοντέλο.....	52
3.5.2. Σχεδιασμός Παθητικής Δέσμης RIS με Στατιστικό/Υβριδικό CSI .....	52
3.5.2.1. Στατιστικό CSI.....	52
3.5.2.2. Υβριδικό CSI .....	53
3.5.3. Σχεδιασμός Παθητικής Δέσμης RIS χωρίς Ρητό CSI.....	53
3.5.3.1. Εκπαίδευση Δέσμης και Παρακολούθηση Καναλιών .....	53
3.5.3.2. Σχεδιασμός Ανάκλασης με Βάση τη Βαθιά Μάθηση.....	54
3.5.3.3. Άλλες Προσεγγίσεις .....	54
3.6. Περιορισμοί και Ατέλειες Υλικού RIS.....	55
3.6.1. Διακριτή Ανάκλαση σε Φάση/Πλάτος .....	55
3.6.2. Ανάκλαση με Πλάτος που Εξαρτάται από τη Φάση .....	56
3.6.3. Αμοιβαία Επίδραση Σύζευξης μεταξύ Ανακλώσιμων Στοιχείων .....	56
3.6.4. Άλλες Ατέλειες/Βλάβες Υλικού .....	56
3.7. Λόγοι Εκτίμησης Καναλιού σε Αναδιαρθρώσιμες Ευφυείς Επιφάνειες .....	57
Κεφάλαιο 4 .....	59
4.1. Ανάλυση Κώδικα.....	59
4.2. Ανάλυση Σεναρίων.....	63
4.3. Ανάλυση Σχημάτων.....	64
Κεφάλαιο 5 .....	74
5.1. Συμπέρασμα .....	74
5.2. Μέλλον.....	74
Παράρτημα .....	76
6.1. Κώδικας Rayleigh .....	76
6.2. Κώδικας Rician .....	79
6.2. MMSE.....	83
6.2. Interpolation .....	83
Αναφορές.....	85



## Πίνακας Εικόνων

1.2.2.	Μεταβολές στο πλάτος καθώς και στην φάση.....	25
2.1.2.	Το RIS προσφέρει LOS επικοινωνία.....	31
2.1.3.	Χειρισμός του σήματος από τα παθητικά στοιχεία.....	32
2.3.1.	Τα στρώματα του RIS.....	37
3.2.3.	Ξεχωριστή εκτίμηση καναλιού με ημι-παθητικό RIS.....	43
3.2.4.	Διαδοχική εκτίμηση καναλιού με παθητικό RIS.....	44

## Συντομογραφίες

<b>1G</b>	First Generation of Wireless Cellular Networks	Πρώτη Γενιά Ασύρματων Κυψελοειδών Δικτύων
<b>NMT</b>	Nordic Mobile Telephone	Σκανδιναβικό Κινητό Τηλέφωνο
<b>AMPS</b>	Advanced Mobile Phone System	Προηγμένο Σύστημα Κινητής Τηλεφωνίας
<b>TACS</b>	Total Access Communication System	Σύστημα Επικοινωνίας Ολικής Πρόσβασης
<b>BTS</b>	Base Transceiver Station	Σταθμός Βάσης
<b>PSTN</b>	Public Switched Telephone Network	Δημόσιο Τηλεφωνικό Δίκτυο Μεταγωγής
<b>MTSO</b>	Mobile Telephone Switching Office Handover	Κέντρο Μεταγωγής Κινητής Τηλεφωνίας Αλλαγή Καναλιού
<b>CEPT</b>	Conference of European Posts and Telecommunications	Ευρωπαϊκή Διάσκεψη Διοικήσεων Ταχυδρομείων και Τηλεπικοινωνιών
<b>ETSI</b>	European Telecommunications Standards Institute	Ευρωπαϊκού Ινστιτούτου Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communications	Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών
<b>2G</b>	Second Generation of Wireless Cellular Networks	Δεύτερη Γενιά Ασύρματων Κυψελοειδών Δικτύων
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access	Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Χρόνου
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access	Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Κώδικα
<b>SIM</b>	Subscriber Identity Module	Μονάδα Ταυτότητας Συνδρομητή
<b>ISMI</b>	International Mobile Subscriber Identity	Διεθνής Ταυτότητα Συνδρομητή Κινητής Τηλεφωνίας
<b>SMS</b>	Short Message Service	Υπηρεσία Σύντομων Μηνυμάτων
<b>MMS</b>	Multimedia Messaging Service	Υπηρεσία Μηνυμάτων Πολυμέσων
<b>GPRS</b>	General Packet Radio Service	Γενική Υπηρεσία Πακέτων Ραδιοσυχνοτήτων
<b>EDGE</b>	Enhanced Data rates for GSM Evolution	Βελτιωμένοι Ρυθμοί Δεδομένων για την Εξέλιξη του GSM
<b>CS</b>	Circuit Switching	Μεταγωγή Κυκλώματος
<b>PS</b>	Packet Switching	Μεταγωγή Πακέτων
<b>8PSK</b>	8 Phase Shift Keying	Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάσης 8 Συμβόλων
<b>BSS</b>	Base Station Subsystem	Υποσύστημα Σταθμού Βάσης
<b>NSS</b>	Network Switching Subsystem	Υποσύστημα Μεταγωγής Δικτύου
<b>OSS</b>	Operation Support System	Σύστημα Υποστήριξης Λειτουργίας
<b>BSC</b>	Base Station Controller	Ελεγκτής Σταθμού Βάσης
<b>MSC</b>	Mobile Switching Center	Κέντρο Μεταγωγής Κινητής Τηλεφωνίας
<b>VLR</b>	Visitor Location Register	Μητρώο Επισκεπτών
<b>HLR</b>	Home Location Register	Μητρώο Έδρας
<b>NMS</b>	Network Management System	Σύστημα Διαχείρισης Δικτύου
<b>EMS</b>	Element Management System	Σύστημα Διαχείρισης Στοιχείων
<b>ITU</b>	International Telecommunication Union	Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών

<b>IMT2000</b>	International Mobile Telecommunications 2000	Διεθνείς Κινητές Τηλεπικοινωνίες 2000
<b>3G</b>	Third Generation of Wireless Cellular Networks	Τρίτη Γενιά Ασύρματων Κυψελοειδών Δικτύων
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunications System	Παγκόσμιο Σύστημα Κινητής Τηλεφωνίας
<b>QoS</b>	Quality of Service Roaming Video streaming Video calling	Ποιότητας Υπηρεσιών Διεθνούς περιαγωγής Ροή Βίντεο Βίντεο Κλήση
<b>HSPA</b>	High Speed Packet Access	Πρόσβασης Πακέτων Υψηλής Ταχύτητας
<b>HSDPA</b>	High Speed Downlink Packet Access	Πρόσβαση Πακέτων Καθοδικής Ζεύξης Υψηλής Ταχύτητας
<b>HSUPA</b>	High Speed Uplink Packet Access	Πρόσβαση Πακέτων Ανοδικής Ζεύξης Υψηλής Ταχύτητας
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation	Τετραγωνικής Διαμόρφωσης Πλάτους
<b>HSPA+</b>	High Speed Packet Access Plus	Πρόσβαση Πακέτων Υψηλής Ταχύτητας Πλας
<b>UTRAN</b>	UMTS Terrestrial Radio Access Network NodeB	UMTS Επίγειο Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης
<b>RNC</b>	Radio Network Controllers	Ελεγκτές Ραδιοδικτύων
<b>3GPP</b>	3rd Generation Partnership Project	3ης Γενιάς Σχέδιο Συνεργασίας
<b>IMT-Advanced</b>	International Mobile Telecommunications Advanced	Προηγμένες Διεθνείς Κινητές Τηλεπικοινωνίες
<b>4G</b>	Fourth Generation of Wireless Cellular Networks	Τέταρτη Γενιά Ασύρματων Κυψελοειδών Δικτύων
<b>LTE</b>	Long Term Evolution	Μακροπρόθεσμη Εξέλιξη
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών
<b>WiMAX</b>	Worldwide Interoperability for Microwave Access	Παγκόσμια Διαλειτουργικότητα για Πρόσβαση σε Μικροκύματα
<b>OFDMA</b>	Orthogonal Frequency Division Multiple Access	Πολλαπλή Πρόσβαση σε Ορθογώνια Διαίρεση Συχνότητας
<b>MIMO</b>	Multiple Input Multiple Output	Πολλαπλή Είσοδος Πολλαπλή Έξοδος
<b>VoLTE</b>	Voice over LTE	Φωνή μέσω LTE
<b>EUTRAN</b>	Evolved UTRAN	Εξελιγμένο UMTS Επίγειο Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης
<b>P-GW</b>	Packet Data Network Gateway	Πύλη Δικτύου Πακέτων Δεδομένων
<b>MME</b>	Mobility Management Entity eNodeB	Φορέα Διαχείρισης Κινητικότητας
<b>EPC</b>	Evolved Packet Core	Εξελιγμένο Πυρήνας Πακέτων
<b>HSS</b>	Home Subscriber Server	Διακομιστή Συνδρομητών Οικίας
<b>RAN</b>	Radio Access Network	Δίκτυο Πρόσβασης Ραδιοσυχνοτήτων
<b>PDN</b>	Packet Data Network	Δίκτυο Πακέτων Δεδομένων
<b>APN</b>	Access Point Name	Όνομα Σημείου Πρόσβασης



<b>IMT-2020</b>	International Mobile Telecommunications 2020	Διεθνείς Κινητές Τηλεπικοινωνίες 2020
<b>5G</b>	Fifth Generation of Wireless Cellular Networks	Πέμπτη Γενιά Ασύρματων Κυβελοειδών Δικτύων
<b>eMBB</b>	Enhanced Mobile Broadband	Βελτιωμένη Ευρυζωνική Κινητή Τηλεφωνία
<b>URLLC</b>	Ultra Reliable Low Latency Communications	Εξαιρετικά Αξιόπιστες Επικοινωνίες Χαμηλής Καθυστέρησης
<b>mMTC</b>	Massive Machine Type Communications	Μαζικές Επικοινωνίες Τύπου Μηχανής
<b>IoT</b>	Internet of Things	Διαδικτύου των Αντικειμένων
<b>NSA</b>	Non-Standalone Access	Μη Αυτόνομη Πρόσβαση
<b>SA</b>	Standalone Access	Αυτόνομη Πρόσβαση
<b>5G NR</b>	5G New Radio	5G Νέα Ραδιοεπικοινωνία
<b>NOMA</b>	Non-Orthogonal Multiple Access	Μη Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση
<b>LS</b>	Least Squares Method	Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων
<b>MSE</b>	Mean Squared Error	Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα
<b>MMSE</b>	Minimum Mean Squared Error	Ελάχιστο Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα
<b>LASSO</b>	Least Absolute Shrinkage and Selection Operator	Ελάχιστη Απόλυτη Συρρίκνωση και Τελεστής Επιλογής
<b>EM</b>	Expectation Maximization	Μεγιστοποίηση Προσδοκιών
<b>IoE</b>	Internet of Everything	Διαδικτύου των Πάντων
<b>mmWave</b>	Millimeter Wave	Τεράστιο MIMO
	Network Densification	Χιλιστομετρικά Κύματα
<b>RIS</b>	Reconfigurable Intelligent Surfaces	Πύκνωση Δικτύου
<b>BS</b>	Base Station	Αναδιαρθρώσιμων Έξυπνων Επιφανειών
<b>MS</b>	Mobile System	Σταθμός Βάσης
<b>LoS</b>	Line of Sight	Κινητό Σύστημα
<b>NLoS</b>	Non Line of Sight	Οπτική Επαφή
<b>MEMS</b>	Micro-electromechanical Systems	Μη Οπτική Επαφή
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio	Μίκρο-ηλεκτρομηχανικά Συστήματα
<b>AF</b>	Amplify and Forward	Λόγος Σήματος προς Θόρυβο
<b>DF</b>	Decode and Forward	Ενίσχυση και Προώθηση
<b>DAC</b>	Digital to Analogue Converter	Αποκωδικοποίηση και Προώθηση
<b>ADC</b>	Analogue to Digital Converter	Ψηφιακός σε Αναλογικός Μετατροπέας
<b>FD</b>	Full Duplex	Αναλογικός σε Ψηφιακός Μετατροπέας
<b>HD</b>	Half Duplex	Δίαυλος Διπλής Επικοινωνίας
<b>RF</b>	Radio Frequency	Δίαυλος Μονής Επικοινωνίας
	Repeaters	Ραδιοσυχνότητες
	Switches	Αναμεταδότης
	Varactors	Διακόπτες
	Controller	Βαράκτορες
<b>CPU</b>	Central Processing Unit	Ελεγκτής
<b>FPGA</b>	Field Programmable Gate Arrays	Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας
		Διάταξη Προγραμματιζόμενων Πυλών Πεδίου

<b>ASIC</b>	Application Specific Integrated Circuits	Ολοκληρωμένο Κύκλωμα Ειδικής Εφαρμογής
<b>VO2</b>	Vanadium Dioxide	Διοξείδιο του Βαναδίου
	Graphene	Μίκρο-Θερμάστρες Υψηλής Πυκνότητας
	Graphene Plasmonics	Γραφένιο
	Conventional Metallic Translucent Surfaces	Πλασμόνια του Γραφενίου
	Chalcogenides	Συμβατικές Μεταλλικές Μεταδιαφανείς Επιφάνειες
	Liquid Crystals	Χαλκογονίδια
<b>6G</b>	Sixth Generation of Wireless Cellular Networks	Υγρούς Κρυστάλλους
	2D van der Waals materials	Έκτη Γενιά Ασύρματων Κυψελοειδών Δικτύων
<b>THz</b>	Terahertz	2D υλικά van der Waals
<b>CMOS</b>	Complementary Metal Oxide Semiconductor	Τεραχέρτζ
	Schottky Diode	Συμπληρωματικό Μέταλλο-Οξειδιο-Ημιαγωγού
<b>HEMT</b>	High Electron Mobility Transistor	Δίοδο Schottky
	Microprocessors	Τρανζίστορ Υψηλής Κινητικότητας Ηλεκτρονίων
	Microcontrollers	Μικροεπεξεργαστές
<b>RAM</b>	Random access memory	Μικροελεγκτές
	Control Unit	Μνήμη Τυχαίας Προσπέλασης
	Electromagnetic Waves	Μονάδας Ελέγχου
	Corrective Junction	Ηλεκτρομαγνητικά Κύματα
	Switching	Ανορθωτική Διασταύρωση
	Individual Surface Elements	Μεταγωγή
	Satellite Receivers	Επιμέρους Επιφανειακών Στοιχείων
	Radar Systems	Δορυφορικοί Δέκτες
<b>CSI</b>	Channel State Information	Συστήματα Ραντάρ
<b>TDD</b>	Time Division Duplex	Πληροφορίες Κατάστασης Καναλιού
<b>Reverse CSI</b>	Reverse Channel State Information	Σύστημα Αμφίδρομης Επικοινωνίας με Διαίρεση Χρόνου
<b>FDD</b>	Frequency Division Duplex	Αντίστροφες Πληροφορίες Κατάστασης Καναλιού
<b>SISO</b>	Single-Input Single-Output	Σύστημα Αμφίδρομης Επικοινωνίας με Διαίρεση Συχνότητας
<b>MISO</b>	Multiple-Input Single-Output	Μοναδική Είσοδος Μοναδική Έξοδος
	Narrowband	Πολλαπλή Είσοδος Μοναδική Έξοδος Στενής Ζώνης
<b>LMMSE</b>		
<b>CSen</b>	Compressed Sensing	Συμπιεσμένη Αίσθηση
<b>MF</b>	Matrix Factorization	Παραγοντοποίηση Μητρών
<b>PB</b>	Passive Beamforming	Παθητικής Διαμόρφωσης Δέσμης
<b>DL</b>	Deep Learning	Βαθιά Μάθηση
<b>DNN</b>	Deep Neural Network	Βαθύ Νευρωνικό Δίκτυο
<b>AO</b>	Alternating Optimization	Εναλλασσόμενη Βελτιστοποίηση
<b>SDR</b>	Software-Defined Radio	Ράδιο Οριζόμενο από Λογισμικό

<b>AoA</b>	Angle of Arrival	Γωνία Άφιξης
<b>AoD</b>	Angle of Departure	Γωνία Αναχώρησης
<b>BCD</b>	Binary Coded Decimal	Δυαδικά Κωδικοποιημένο Δεκαδικό
<b>DFT- Hadamard</b>	Hadamard Transform	Μετασχηματισμός Hadamard
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας
<b>IFFT</b>	Inverse Fast Fourier Transform	Αντίστροφος Γρήγορος Μετασχηματισμός Fourier
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform	Γρήγορος Μετασχηματισμός Fourier
<b>BER</b>	Bit Error Rate	Ρυθμός Σφάλματος bit
<b>CE</b>	Channel Estimation	Καναλική Εκτίμηση
	Practical CSI	Πρακτικό CSI
	Imperfect CSI	Ατελές CSI
	Statistical CSI	Στατιστικό CSI
	Hybrid CSI	Υβριδικό CSI
	Explicit CSI	Ρητό CSI
	Full CSI	Πλήρες CSI



## Κεφάλαιο 1

### 1.1. Ασύρματες Επικοινωνίες

Οι ενσύρματες επικοινωνίες απείχαν σημαντική επιρροή επί του κόσμου, καθώς αποτέλεσαν μέσο διεξαγωγής επικοινωνίας και ανταλλαγής πληροφοριών ανάμεσα σε μεγάλες αποστάσεις. Αναμφίβολα, ωστόσο, παρουσίαζαν προφανείς περιορισμούς. Η κινητικότητα των χρηστών περιοριζόταν σαφώς, ενώ η άνεση της επικοινωνίας από οποιοδήποτε επιθυμητό σημείο αποτελούσε ανέφικτο εγχείρημα. Οι επικοινωνίες ήταν εφικτές μόνο σε συγκεκριμένα σημεία όπου ήταν εγκατεστημένη η ενσύρματη τηλεφωνική συσκευή, ενώ οι χρήστες δεν μπορούσαν να απομακρυνθούν από αυτές. Συνεπώς, η ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών είχε ως στόχο την αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών. Σε αυτό το πλαίσιο, μία επίδοξη ασύρματη επικοινωνία πραγματοποιήθηκε στις 13 Μαΐου του 1897, όταν ο Guglielmo Marconi έστειλε το πρώτο ασύρματο μήνυμα πάνω από το Bristol Channel, σε απόσταση 6 χιλιομέτρων από το Flat Holm έως το Lavernock. Το περιεχόμενο του μηνύματος αυτού αποτελούσε τη φράση "Είστε έτοιμοι". Αργότερα, το 1946, εισήλθαμε σε μια νέα εποχή με την εμφάνιση των πρώτων τηλεφώνων, όπου κάθε χρήστης διέθετε μια τηλεφωνική συσκευή ενσωματωμένη στο αυτοκίνητό του. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, οι χρήστες επέλεγαν μια από τις λίγες διαθέσιμες συχνότητες για να πραγματοποιήσουν κλήση, ενώ δεν είχαν τη δυνατότητα της μετάβασης από μια συχνότητα σε μια άλλη, καθώς η λειτουργία αυτού που ονομάζουμε "handover" δεν ήταν εφικτή. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν επιτρέψει τη δημιουργία ενός περιβάλλοντος όπου η επικοινωνία δεν είναι πλέον περιορισμένη από τους φυσικούς περιορισμούς των ενσύρματων δικτύων. [3]

#### 1.1.1. Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών Πρώτης Γενιάς

##### 1.1.1.1. Η Αρχή των Τηλεπικοινωνιών

Η πρώτη γενιά ασύρματων κυψελοειδών αποτέλεσε ένα σημαντικό ορόσημο στην εξέλιξη των κινητών τηλεπικοινωνιών. Εισήχθη τη δεκαετία του 1980 και αντικατέστησε την κινητή ραδιοτηλεφωνία ή αλλιώς τεχνολογία "0G". Με την είσοδο του 1G εισήχθησαν τα κυψελοειδή δίκτυα, όπου μια γεωγραφική περιοχή χωρίζονταν σε εξάγωνα που εξυπηρετούνταν από χαμηλής ισχύος ασύρματους πομποδέκτες. Ένα από τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του 1G ήταν η χρήση της αναλογικής τεχνικής διαμόρφωσης συχνότητας. Το φάσμα συχνοτήτων διαμερίστηκε σε συχνότητες 30 kHz, οι οποίες ονομάζονταν κανάλια. Κάθε κανάλι χρησιμοποιούταν από έναν μόνο χρήστη κατά τη διάρκεια μιας κλήσης. Η καινοτομία της στρατηγικής επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων διευκόλυνε τις περιοχές κάλυψης, επιτρέποντας διάφορους χρήστες να χρησιμοποιούν τα ίδια κανάλια ταυτόχρονα. Αυτό ήταν δυνατό υπό την προϋπόθεση ότι η απόσταση μεταξύ των χρηστών ήταν αρκετή για να ελαχιστοποιηθεί η παρεμβολή, γνωστή ως διακαναλική παρεμβολή. Η εφαρμογή των προτύπων κινητής τηλεφωνίας 1G διέφερε ανάλογα με τις χώρες, με τα πρότυπα Nordic Mobile Telephone για τις σκανδιναβικές χώρες και το Advanced Mobile Phone System στην Αμερική. Διάφορα άλλα παγκοσμίως χρησιμοποιούμενα πρότυπα 1G περιλαμβάνουν το Total Access Communication System που αναπτύχθηκε στην Ευρώπη το πρότυπο C-450 που αναπτύχθηκε στη Δυτική Γερμανία και χρησιμοποιήθηκε επίσης στην Πορτογαλία και τη Νότια Αφρική, το Radiocom 2000 στη Γαλλία και το RTMI στην Ιταλία. [5] [6] [7] [8]

##### 1.1.1.2. Δομικά Στοιχεία

Τα δομικά συστατικά του δικτύου περιλαμβάνουν το Base Transceiver Station, το Public Switched Telephone Network και το Mobile Telephone Switching Office. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα handover κατά τη διάρκεια μιας κλήσης, ώστε να διατηρείται η συνδεσιμότητα και η ποιότητα της επικοινωνίας καθ' όλη τη διαδρομή. [5] [6] [7] [8]

## 1.1.2. Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών Δεύτερης Γενιάς

### 1.1.2.1. Το πρότυπο GSM

Το 1982, το Conference of European Posts and Telecommunications ανέλαβε μια φιλόδοξη πρωτοβουλία, τη διαμόρφωση ενός νέου προτύπου για την επερχόμενη γενιά τηλεπικοινωνιών. Αυτή η διαδικασία υπήρξε κρίσιμη για την εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών, καθορίζοντας τις προδιαγραφές του σημερινού τηλεπικοινωνιακού περιβάλλοντος. Η διαδικασία σχεδιασμού ολοκληρώθηκε υπό την εποπτεία του Telecommunications Standards Institute, το οποίο θέσπισε την ονομασία Global System for Mobile communications. Έπειτα από χρόνια έρευνας και ανάπτυξης, το 1991 ήρθε η ώρα για τη δεύτερη γενιά ασύρματων κυψελοειδών δικτύων να κάνει την πρώτη της εμφάνιση. Η εταιρεία Radiolinja στη Φιλανδία ήταν η πρώτη που υλοποίησε αυτό το πρότυπο, εισάγοντας επαναστατικές αλλαγές στον τομέα. Το 2G διέθετε σημαντικές βελτιώσεις, αποσκοπώντας στην αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου για να ανταποκριθεί στις αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών. Μία από τις πιο σημαντικές αλλαγές ήταν η μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή διαμόρφωση του σήματος. Επιπλέον, εφαρμόστηκε το Time Division Multiple Access, όπου μια συχνότητα μπορούσε να διαιρεθεί σε 8 χρονοθυρίδες, επιτρέποντας σε κάθε χρήστη να έχει μια δική του χρονική θυρίδα. Σε χώρες όπως η Ιαπωνία, χρησιμοποιήθηκε το Code Division Multiple Access, προσφέροντας ακόμη μεγαλύτερη χωρητικότητα. Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό του 2G ήταν η εισαγωγή του Subscriber Identity Module. Αυτή η κάρτα περιείχε ένα μοναδικό αναγνωριστικό, το International Mobile Subscriber Identity, το οποίο επέτρεπε στην τηλεφωνική συσκευή να ταυτοποιηθεί στον πλησιέστερο σταθμό βάσης. Πέρα από την απλή φωνητική επικοινωνία, το 2G άνοιξε νέους ορίζοντες επικοινωνίας μέσω του Short Message Service και του Multimedia Messaging Service. Επιπροσθέτως, πρόσφερε υποστήριξη για κρυπτογράφηση, ενισχύοντας την ασφάλεια των επικοινωνιών. [5] [6] [7] [8]

### 1.1.2.2. Τα πρότυπα GPRS και EDGE

Η εισαγωγή των προτύπων General Packet Radio Service και Enhanced Data rates for GSM Evolution αποτέλεσε μία σημαντική εξέλιξη από το αρχικό 2G. Αυτές οι τεχνολογίες άνοιξαν τον δρόμο για την περιήγηση στο διαδίκτυο μέσω κινητών συσκευών. Οι υπηρεσίες δεδομένων μπορούσαν τώρα να χρησιμοποιούν είτε τη μεταγωγή κυκλώματος, είτε τη μεταγωγή πακέτων, δίνοντας περισσότερη ευελιξία στους χρήστες. Σε αντίθεση, η φωνητική επικοινωνία διατηρήθηκε αμετάβλητη, εξακολουθώντας να χρησιμοποιεί την τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος. Τέλος, με την εισαγωγή του EDGE, χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 8 Phase Shift Keying. Αυτό επέτρεψε τη μεταφορά ενός τρίτου bit σε κάθε χρονοθυρίδα, με αποτέλεσμα να αυξηθεί περαιτέρω η ταχύτητα μετάδοσης. Η εξέλιξη αυτή αποτέλεσε ένα σημαντικό βήμα προς την επίτευξη πιο γρήγορων και αποτελεσματικών τηλεπικοινωνιών. [5] [6] [7] [8]

### 1.1.2.3. Δομικά Στοιχεία

Η δομή του δικτύου είναι σύνθετη και περιλαμβάνει αρκετά στοιχεία. Αυτά μπορούν να καταταχθούν σε τρία βασικά συστήματα: το Base Station Subsystem, το Network Switching Subsystem και το Operation Support System. Το BSS είναι το στοιχείο που επικοινωνεί άμεσα με τις κινητές συσκευές. Αποτελείται από το Base Transceiver Station και τον Base Station Controller. Το BTS μεταδίδει και λαμβάνει σήματα από τις κινητές συσκευές, ενώ το BSC ελέγχει και διαχειρίζεται πολλαπλούς BTS. Από την άλλη πλευρά, το NSS ασχολείται με τη δρομολόγηση της φωνητικής κίνησης και των δεδομένων. Αυτό το υποσύστημα αποτελείται από το Mobile Switching Center, το Visitor Location Register και το Home Location Register. Το MSC διαχειρίζεται την εναλλαγή και τη δρομολόγηση κλήσεων, ενώ τα VLR και HLR αποθηκεύουν πληροφορίες για τους συνδρομητές και τις τοποθεσίες τους. Τέλος, το OSS αναλαμβάνει τη συνολική διαχείριση του δικτύου. Περιλαμβάνει

το Network Management System και το Element Management System, EMS. Το NMS παρέχει μια κεντρικοποιημένη εικόνα του δικτύου και επιτρέπει την παρακολούθηση, την ρύθμιση και την αντιμετώπιση προβλημάτων, ενώ το EMS επιβλέπει τη διαχείριση των μεμονωμένων στοιχείων του δικτύου, όπως τα BTS και MSC. [5] [6] [7] [8]

### **1.1.3. Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών Τρίτης Γενιάς**

#### **1.1.3.1. Το πρότυπο UMTS**

Το 1999, το International Telecommunication Union προχώρησε στην οριστικοποίηση της προδιαγραφής International Mobile Telecommunications 2000. Η απόφαση αυτή είχε ως στόχο τη δημιουργία ενός διεθνούς προτύπου για την τρίτη γενιά ασύρματων κυψελοειδών δικτύων, γνωστή ως Universal Mobile Telecommunications System. Η τεχνολογία που επελέγη για την υλοποίηση του UMTS ήταν το CDMA, καθώς αντικατέστησε τον μη συμβατό συνδυασμό των TDMA και CDMA. Στο CDMA, σε κάθε χρήστη ανατίθεται ένας μοναδικός κωδικός για τη διαμόρφωση του σήματος που μεταδίδει. Αυτοί οι κωδικοί είναι ορθογώνιοι, επιτρέποντας την αποφυγή αλληλεπίδρασης και τον διαχωρισμό των διάφορων σημάτων από τον δέκτη. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων. Με την εφαρμογή του 3G, εισήχθησαν καινοτομίες στον τρόπο μετάδοσης φωνής και δεδομένων. Η μετάδοση φωνής πραγματοποιείται μέσω μεταγωγής κυκλώματος, ενώ η μετάδοση δεδομένων γίνεται αποκλειστικά μέσω μεταγωγής πακέτων. Παράλληλα, εισήχθησαν τεχνικές Quality of Service, QoS, οι οποίες επιτρέπουν την προτεραιοποίηση συγκεκριμένων μεταδόσεων. Ένα άλλο κρίσιμο χαρακτηριστικό του 3G ήταν η δυνατότητα διεθνούς περιαγωγής, επιτρέποντας σε έναν χρήστη να ταξιδεύει σε άλλες χώρες διατηρώντας την πρόσβαση στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας με την ίδια κάρτα SIM. Ακόμη, η τρίτη γενιά των κινητών τηλεπικοινωνιών άνοιξε νέους ορίζοντες στην επικοινωνία, εισάγοντας τις εφαρμογές πολυμέσων, όπως το video streaming και το video calling. Αυτές οι εφαρμογές επέτρεψαν στους χρήστες να απολαμβάνουν πλούσιο περιεχόμενο μέσω των κινητών δικτύων. Ωστόσο, το Δεκέμβριο του 2021, το δίκτυο 3G καταργήθηκε επίσημα στην Ελλάδα, με σκοπό την επαναχρησιμοποίηση του φάσματός του για την υποστήριξη των δικτύων νέας γενιάς. [5] [6] [7] [8]

#### **1.1.3.2. Τα πρότυπα HSPA και HSPA Plus**

Το έτος 2005 χαρακτηρίστηκε από μία ακόμα εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών, με την παρουσίαση της τεχνολογίας High Speed Packet Access. Το HSPA αποτέλεσε την εξέλιξη του UMTS και ήταν βασισμένη σε δύο σημαντικές βελτιώσεις: την High Speed Downlink Packet Access και την High Speed Uplink Packet Access. Η κύρια επίδραση αυτών των τεχνολογιών ήταν η αύξηση των ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων και η βελτίωση της αξιοπιστίας της σύνδεσης. Αυτό επιτεύχθηκε μέσω της εφαρμογής προηγμένων τεχνικών διαμόρφωσης, όπως το Quadrature Amplitude Modulation, στις μορφές 16QAM και 64QAM. Στη συνέχεια, το 2009, παρουσιάστηκε μια περαιτέρω εξέλιξη του HSPA, το High Speed Packet Access Plus. Το HSPA+ προσέφερε ακόμα μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, προσφέροντας στην προσπάθεια της αύξησης της απόδοσης του δικτύου. Μέσω αυτής της τεχνολογικής προόδου, οι χρήστες επωφελήθηκαν από την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων, επιτρέποντας την άνετη ανταλλαγή πληροφοριών και την πρόσβαση σε ποικίλες πολυμεσικές εφαρμογές. Συνολικά, η εξέλιξη προς το HSPA, καθώς και το HSPA+, επέφεραν σημαντική πρόοδο στην ταχύτητα και την απόδοση του δικτύου. Επιπλέον, οι εξελίξεις αυτές προσέφεραν σημαντικές προοπτικές και επιδόσεις στον τομέα της κινητής επικοινωνίας, προσφέροντας αυξημένες δυνατότητες και προηγμένες λειτουργίες στους χρήστες. [5] [6] [7] [8]

### 1.1.3.3. Δομικά Στοιχεία

Το 3G δίκτυο αποτελείται από διάφορα δομικά στοιχεία, τα οποία συνεργάζονται για την παροχή ασύρματης επικοινωνίας. Κύριος συντελεστής σε αυτή τη διαδικασία είναι το UMTS Terrestrial Radio Access Network, το οποίο αποτελεί τον πυρήνα της επικοινωνίας μεταξύ των κινητών συσκευών και του κεντρικού δικτύου. Το UTRAN αποτελείται από δύο κεντρικά στοιχεία: τα NodeB και τους Radio Network Controllers. Τα NodeB, στην ουσία, είναι σταθμοί βάσης που παρέχουν την ασύρματη επικοινωνία στις κινητές συσκευές, ενώ είναι επίσης υπεύθυνα για τη μετάδοση και τη λήψη των σημάτων. Κάθε NodeB συνδέεται με έναν RNC, ο οποίος έχει υπό την ευθύνη του τη λειτουργία ενός ή περισσότερων NodeB. Ο RNC διαχειρίζεται την κατανομή των πόρων, την ρύθμιση και τη διακοπή κλήσεων, καθώς και τις μεταβιβάσεις κατά τη μετάβαση των χρηστών από το ένα NodeB στο άλλο. Αυτό σημαίνει ότι ελέγχει επίσης την κατανομή των καναλιών και τον έλεγχο της ισχύος. Τέλος, είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι η επικοινωνία του RNC με το κεντρικό δίκτυο γίνεται μέσω μιας ενσύρματης σύνδεσης. Έτσι, παρά την ασύρματη φύση της επικοινωνίας που παρέχει το UTRAN, η επικοινωνία με το κεντρικό δίκτυο διατηρείται με την ασφάλεια και τη σταθερότητα μιας ενσύρματης σύνδεσης. [5] [6] [7] [8]

### 1.1.4. Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών Τέταρτης Γενιάς

#### 1.1.4.1. Το πρότυπο LTE

Το 2008, το 3rd Generation Partnership Project όρισε τις προϋποθέσεις για το πρότυπο International Mobile Telecommunications Advanced, το οποίο αφορούσε την Τέταρτη Γενιά Ασύρματων Κυψελοειδών Δικτύων. Το εν λόγω πρότυπο απέκτησε το όνομα Long Term Evolution. Αντίθετα με το 3GPP, το Institute of Electrical and Electronics Engineers προχώρησε στη δημιουργία ενός αυτόνομου προτύπου, γνωστού ως IEEE 802.16m ή WiMAX, το οποίο ωστόσο δεν είχε μεγάλη απήχηση. Το LTE είχε στόχο την ραγδαία αύξηση των ταχυτήτων μεταφοράς δεδομένων. Σύμφωνα με το πρότυπο, σε περιπτώσεις υψηλής κινητικότητας, όπως είναι η κίνηση μέσα σε ένα αυτοκίνητο με ταχύτητα 70 km/h, η ταχύτητα μετάδοσης θα έπρεπε να είναι τουλάχιστον 100 Mbps. Αντίθετα, σε περιπτώσεις χαμηλής κινητικότητας, όπως ένας πεζός ή κάποιος που κάθεται, η ταχύτητα μετάδοσης θα έπρεπε να είναι τουλάχιστον 1 Gbps. Το 4G εισήγαγε μια νέα τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης, γνωστή ως Orthogonal Frequency Division Multiple Access. Στο OFDMA, το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων διασπάται σε μικρότερες υποσυχνότητες, οι οποίες στη συνέχεια αποδίδονται σε διάφορους χρήστες. Κάθε υποσυχνότητα είναι ορθογώνια με τις άλλες, πράγμα που επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη δεδομένων από πολλούς χρήστες σε διαφορετικές υποσυχνότητες, αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα και την χωρητικότητα του δικτύου. Επιπρόσθετα, στο 4G χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά η τεχνική Multiple Input Multiple Output. Το MIMO χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές και στις δύο πλευρές του πομπού και του δέκτη για τη μετάδοση και την λήψη πολλαπλών χωρικά διαχωρισμένων ροών δεδομένων ταυτόχρονα στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Η μεταγωγή πακέτων χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά και στη μετάδοση δεδομένων και στη μετάδοση φωνής στο 4G, καταργώντας τελείως τη μεταγωγή κυκλώματος. Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη τεχνολογιών όπως το Voice over LTE, το οποίο επιτρέπει τη δρομολόγηση της μετάδοσης φωνής μέσω IP πακέτων, προσφέροντας μεγαλύτερη καθαρότητα φωνής κατά τη διάρκεια των κλήσεων. Τέλος, το 4G, λόγω των υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων που προσφέρει, συνέβαλε στην εξέλιξη των πολυμέσων στις κινητές συσκευές. Επέτρεψε την υψηλής ανάλυσης video streaming και video calling ενισχύοντας την εμπειρία των χρηστών. [5] [6] [7] [8]



#### 1.1.4.2. Δομικά Στοιχεία

Το 4G έχει μια πολύπλοκη αρχιτεκτονική δικτύου, η οποία βασίζεται σε διάφορα δομικά συστατικά για τη λειτουργία της. Αυτά τα στοιχεία είναι: το Evolved UTRAN, το Packet Data Network Gateway, το Mobility Management Entity, το eNodeB, το Evolved Packet Core και το Home Subscriber Server. Ξεκινώντας, έχουμε το EPC του 4G, το οποίο αντικαθιστά το δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος του 3G. Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προόδου, καθώς το EPC επιτρέπει την πακεταρισμένη μετάδοση δεδομένων, βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα και την ταχύτητα της επικοινωνίας. Συνεχίζοντας, αναφέρουμε το eNodeB, το οποίο χειρίζεται το Radio Access Network και συνδέει τα επίπεδα χρήστη και ελέγχου. Αυτό είναι ουσιαστικό για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της απόδοσης της επικοινωνίας. Μετά από αυτό, το HSS παίζει επίσης ζωτικό ρόλο, καθώς αποθηκεύει τα δεδομένα των συνδρομητών. Αυτό είναι σημαντικό για τη διαχείριση των πληροφοριών των χρηστών και την παροχή αξιόπιστων υπηρεσιών. Το P-GW είναι ακόμη ένα κρίσιμο στοιχείο, το οποίο συνδέει το Packet Data Network με τον εξωτερικό κόσμο. Κάθε PDN είναι αναγνωρίσιμο μέσω ενός Access Point Name, το οποίο επιτρέπει την αποτελεσματική δρομολόγηση των δεδομένων. Τέλος, το S-GW διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στη δρομολόγηση δεδομένων προς το P-GW, βεβαιώνοντας ότι η επικοινωνία διατηρείται ομαλή και αποτελεσματική σε όλη τη διάρκεια της μετάδοσης. [5] [6] [7] [8]

#### 1.1.5. Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών Πέμπτης Γενιάς

##### 1.1.5.1. Η αρχή των Δικτύων Νέας Γενιάς

Το 2018, το 3rd Generation Partnership Project καθόρισε το πρότυπο International Mobile Telecommunications 2020, το οποίο αναφέρεται στην Πέμπτη Γενιά Ασύρματων Κυψελοειδών Δικτύων. Ο βασικός στόχος του 5G είναι να προωθήσει τρία βασικά στοιχεία: Enhanced Mobile Broadband, Ultra Reliable Low Latency Communications και Massive Machine Type Communications. [2] [5] [6] [7] [8]

##### 1.1.5.2. eMBB, URLLC και mMTC

Το eMBB επικεντρώνεται στην παροχή υπηρεσιών κινητής ευρυζωνικότητας υψηλής ταχύτητας, με ταχύτητες δεδομένων που μπορούν να φτάνουν τα 20 Gbps. Μέσω του eMBB, το 5G προσφέρει βελτιωμένες ταχύτητες και χωρητικότητα διαδικτύου, υποστηρίζοντας υπηρεσίες ροής υψηλής ποιότητας, όπως βίντεο 4K και 8K, εφαρμογές επαυξημένης και εικονικής πραγματικότητας και πολλά άλλα. Το URLLC, από την άλλη πλευρά, αφορά επικοινωνίες χαμηλής καθυστέρησης και υψηλής αξιοπιστίας, που είναι κρίσιμες για εφαρμογές όπως η αυτόνομη οδήγηση, ο τηλεχειρισμός κρίσιμων υποδομών και ο βιομηχανικός αυτοματισμός. Προσφέρει υπηρεσίες επικοινωνίας εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης (λιγότερο από 1 ms) και υψηλής αξιοπιστίας (99,999%). Επιπρόσθετα, το mMTC αφορά την σύνδεση μεγάλου αριθμού συσκευών που απαιτούν συνδεσιμότητα χαμηλής κατανάλωσης, χαμηλού κόστους και χαμηλής ταχύτητας δεδομένων. Αυτό είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές όπως το Internet of Things, έξυπνες πόλεις και δίκτυα αισθητήρων. Το mMTC προσφέρει υποστήριξη για μεγάλο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών (έως 1 εκατομμύριο συσκευές ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο), επικοινωνίες χαμηλής κατανάλωσης και μεγάλης εμβέλειας. [2] [5] [6] [7] [8]

##### 1.1.5.3. Λειτουργίες NSA, SA και η προοπτική του NOMA

Το 5G λειτουργεί σε δύο καταστάσεις: Non-Standalone Access και Standalone Access. Το NSA αναφέρεται σε μια μέθοδο ανάπτυξης όπου το δίκτυο 5G βασίζεται στην υπάρχουσα υποδομή του 4G. Σε αυτήν τη λειτουργία, το 5G λειτουργεί παράλληλα με το 4G, χρησιμοποιώντας το δίκτυο 4G για σηματοδότηση και έλεγχο, ενώ το 5G New Radio για να χειρίζεται τα δεδομένα. Από την άλλη

πλευρά, το SA αναφέρεται σε μια αυτόνομη ανάπτυξη της τεχνολογίας 5G, που δεν βασίζεται στην υπάρχουσα υποδομή του 4G. Το SA διαθέτει το δικό του δίκτυο, το οποίο είναι κατασκευασμένο εξολοκλήρου για την τεχνολογία 5G, επιτρέποντας την πλήρη απόδοση των πλεονεκτημάτων του 5G. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι, παρόλο που το 5G συνεχίζει να χρησιμοποιεί το OFDMA ως τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, υπάρχουν μελέτες για την χρήση του Non-Orthogonal Multiple Access. στο μέλλον. Το NOMA επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται την ίδια ζώνη συχνοτήτων και χρονοθυρίδων χρησιμοποιώντας πολυπλεξία στον τομέα της ισχύος. [2] [5] [6] [7] [8]

## **1.2. Σημαντικότητα Εκτίμησης Καναλικών Συνθηκών**

### **1.2.1. Προκλήσεις Ασύρματης Μετάδοσης**

Οι τηλεπικοινωνίες έχουν επέλθει με θριαμβευτικό τρόπο σε ένα ευρύ φάσμα της καθημερινής μας ζωής. Προσφέρουν ασύρματη πρόσβαση σε ένα πλήθος υπηρεσιών, από τηλεφωνικές κλήσεις και πλοήγηση στο διαδίκτυο, έως ανταλλαγή μηνυμάτων, ιατρικές εφαρμογές και αυτόνομα αυτοκίνητα. Αυτή η έκταση των ελευθεριών που προσφέρουν οι ασύρματες επικοινωνίες θα ήταν αδύνατη με την χρήση μόνο των ενσύρματων συστημάτων. Για να επιτευχθεί αυτή η ασύρματη σύνδεση, τα δίκτυα επικοινωνίας χρησιμοποιούν σειρά από κεραίες που έχουν εγκατασταθεί σε επιλεγμένες τοποθεσίες. Οποιοσδήποτε χρήστης διαθέτει συμβατή συσκευή μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτές τις κεραίες, ανεξάρτητα από τη θέση του, είτε σε ανοιχτό χώρο, εσωτερικό χώρο, πυκνό αστικό ή αραιό αγροτικό περιβάλλον, είτε κινούμενος με μεγάλη ταχύτητα ή ακόμα και στατικός. Οι προκλήσεις που συναντά το σήμα κατά την ασύρματη μετάδοση δεν είναι ευκαταφρόνητες. Η κεραία και η συσκευή εργάζονται από κοινού για να αντιμετωπίσουν πληθώρα πιθανών εμποδίων, από την παρεμπόδιση από φυσικά αντικείμενα, την εξασθένηση του σήματος, την παρεμβολή και τον θόρυβο, έως τις πολλαπλές διαδρομές που προκαλούνται από τις ανακλάσεις του σήματος. Πριν προχωρήσουμε σε μια πιο λεπτομερή ανάλυση, αξίζει να εξετάσουμε την πορεία του σήματος. Τα ψηφιακά δεδομένα που έχουν προετοιμαστεί για μετάδοση υπόκεινται πρώτα σε διαδικασία διαμόρφωσης με την εφαρμογή μιας φέρουσας συχνότητας, χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως το 8-PSK στο 2G, το 64-QAM στο 3G και το 256-QAM σε μεταγενέστερες γενιές. Κατά την εκπομπή του σήματος, εφαρμόζονται συγκεκριμένες τεχνικές μετάδοσης, όπως το TDMA στο 2G, το CDMA στο 3G και το OFDMA στο 4G και 5G. Το σήμα συνήθως εκπέμπεται από πολλαπλές κεραίες με τη χρήση τεχνικών όπως το MIMO. Όταν το σήμα φτάνει στον παραλήπτη, είναι ήδη αλλοιωμένο από τα πολλαπλά εμπόδια στο περιβάλλον διάδοσης. Η κεραία παραλήπτης αντιμετωπίζει αυτό το αλλοιωμένο σήμα, το αποδιαμορφώνει και εξαγεί τα αρχικά δεδομένα. Έτσι, παρά τα εμπόδια και τις προκλήσεις που παρουσιάζονται κατά την ασύρματη μετάδοση δεδομένων, οι σύγχρονες τεχνολογίες επικοινωνίας επιτυγχάνουν με επιτυχία την ανταλλαγή πληροφοριών. [5] [6] [7] [8]

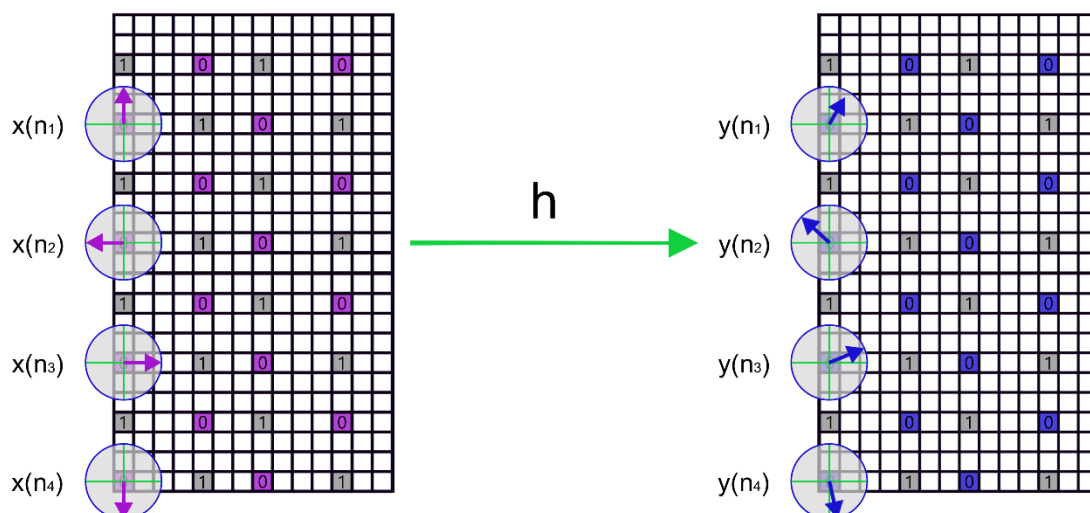
### **1.2.2. Τεχνικές Εκτίμησης Καναλιού**

Η εκτίμηση καναλιού αποτελεί μια σημαντική διαδικασία στο πεδίο των ασύρματων επικοινωνιών. Πρόκειται για την εκτίμηση των ιδιοτήτων ενός ασύρματου καναλιού επικοινωνίας που λειτουργεί ανάμεσα σε έναν πομπό και έναν δέκτη. Στην διαδικασία αυτή εκτιμώνται το πλάτος, η φάση και η καθυστέρηση, πληροφορίες που χρησιμοποιούνται για την αντιστάθμιση των βλαβών και τη βελτίωση της ποιότητας του λαμβανόμενου σήματος. Υπάρχουν δύο κύριες τεχνικές για την εκτίμηση καναλιού. Η πρώτη από αυτές είναι η εκτίμηση μέσω της χρήσης πιλοτικών συμβόλων. Σε αυτή την μέθοδο, ο πομπός εισάγει προκαθορισμένα πιλοτικά σύμβολα σε ειδικές θέσεις μέσα στην ακολουθία των συμβόλων δεδομένων, πριν την μετάδοση του σήματος. Αυτά τα πιλοτικά σύμβολα θα περάσουν από το ίδιο περιβάλλον διάδοσης με τα σύμβολα δεδομένων και θα υποστούν τις ίδιες βλάβες. Ο δέκτης, γνωρίζοντας τη θέση και την προκαθορισμένη τιμή των πιλοτικών συμβόλων, μπορεί να ανακτήσει αυτά τα σύμβολα και να εφαρμόσει αλγόριθμους όπως το Least Squares Method, το Mean

Squared Error και Minimum Mean Squared Error. Το αποτέλεσμα αυτών των αλγορίθμων αποτελεί την απόκριση του καναλιού και χρησιμοποιείται για να αναιρεθούν οι βλάβες στα σύμβολα δεδομένων, διορθώνοντας έτσι το λαμβανόμενο σήμα. Ο δεύτερος τρόπος εκτίμησης είναι η τυφλή εκτίμηση, η οποία δεν απαιτεί τη χρήση πιλοτικών συμβόλων. Αυτή η τεχνική είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν το εύρος ζώνης είναι περιορισμένο και το κανάλι μεταβάλλεται αργά. Οι τεχνικές τυφλής εκτίμησης βασίζονται σε στατιστικές μεθόδους, όπως το Least Absolute Shrinkage and Selection Operator και το Expectation Maximization, για την εκτίμηση των ιδιοτήτων του καναλιού με βάση το λαμβανόμενο σήμα. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι, χωρίς την εκτίμηση του καναλιού, τα δεδομένα θα φτάνουν στον δέκτη αλλοιωμένα και οι προσπάθειες για σύγχρονη ασύρματη επικοινωνία με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης θα είναι αδύνατες. Για να διευκρινιστεί περαιτέρω η διαδικασία της εκτίμησης του καναλιού, παρακάτω παρουσιάζεται ένα απλό μοντέλο ψηφιακού συστήματος επικοινωνίας.

$$y(n) = h(n) * x(n) + w(n)$$

Οι συμβολικές παραστάσεις αυτές επιτρέπουν την κατανόηση της διαδικασίας επικοινωνίας σε αυτό το πλαίσιο. Το  $y(n)$  συμβολίζει το λαμβανόμενο σήμα. Το  $x(n)$  δείχνει το μεταδιδόμενο σήμα, το οποίο μπορεί να είναι ένα ψηφιακό σύμβολο ή μια ακολουθία συμβόλων που μεταφέρει την επιθυμητή πληροφορία. Η ένδειξη  $h(n)$  αναφέρεται στην παλμική απόκριση του καναλιού επικοινωνίας κατά τη χρονική στιγμή  $n$ . Αυτή η απόκριση περιγράφει την αλλοίωση που υφίσταται το μεταδιδόμενο σήμα καθώς διέρχεται από το κανάλι. Το σύμβολο  $*$  δηλώνει τη λειτουργία συνέλιξης, μια μαθηματική επιχείρηση που μοντελοποιεί την επίδραση της απόκρισης του καναλιού στο σήμα. Τέλος, το  $w(n)$  αναπαριστά τον θόρυβο που προστίθεται στη χρονική στιγμή  $n$ , ο οποίος μπορεί να προέρχεται είτε από το ίδιο το κανάλι είτε από ηλεκτρονικά εξαρτήματα του δέκτη. Αυτός ο θόρυβος εισάγει ανεπιθύμητες παρεμβολές στο σήμα. Στην εξίσωση αυτή, το λαμβανόμενο σήμα  $y(n)$  προκύπτει από το μεταδιδόμενο σήμα  $x(n)$ , το οποίο έχει αλλοιωθεί από την απόκριση του καναλιού  $h(n)$ , και τον θόρυβο  $w(n)$ . Ο κύριος στόχος της επεξεργασίας σήματος είναι να ανακτήσει το μεταδιδόμενο σήμα  $x(n)$  από το λαμβανόμενο σήμα  $y(n)$ , με γνώση της απόκρισης του καναλιού  $h(n)$  και του θορύβου  $w(n)$ . Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται πώς τα πιλοτικά σύμβολα θα υποστούν αλλοίωση λόγω της απόκρισης του καναλιού. [17] [18] [19]



Εικόνα 1.2.2. Μεταβολές στο πλάτος καθώς και στην φάση.

### 1.3. Στόχος των Αναδιρθώσιμων Ευφυών Επιφανειών

#### 1.3.1. Προκλήσεις από το Διαδίκτυο των Πάντων και τα Δίκτυα Νέας Γενιάς

Η ασύρματη επικοινωνία βρίσκεται αντιμέτωπη με μια ποικιλία από προκλήσεις που είναι αποτέλεσμα του περίπλοκου και απρόβλεπτου περιβάλλοντος διάδοσης. Αυτό το περιβάλλον χαρακτηρίζεται από αντανάκλασεις, περιθλάσεις και σκέδαση, οι οποίες προκαλούν διάδοση πολλαπλών διαδρομών, εξασθένιση σήματος και παρεμβολές. Αυτές οι συνθήκες μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση της ποιότητας του σήματος, της ταχύτητας της σύνδεσης και της χωρητικότητας του συστήματος. Στο πλαίσιο της εποχής του Internet of Everything, αναμένεται εκθετική αύξηση των συσκευών που θα συνδέονται στο διαδίκτυο. Αυτό θα επιφέρει μεγάλη πίεση στα συστήματα κινητών επικοινωνιών. Τα δίκτυα 5G είναι υπό ταχεία ανάπτυξη παγκοσμίως και αποτελούν την πρώτη προσπάθεια ανάπτυξης των δικτύων της επόμενης γενιάς, με στόχο τα eMBB, URLLC και mMTC. Ωστόσο, το 5G αντιμετωπίζει ήδη σημαντικά προβλήματα. Έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες για την ανάπτυξη τεχνολογιών που ενισχύουν την απόδοση του 5G, όπως το Massive MIMO, το mmWave και το Network Densification. Ωστόσο, η εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών αντιμετωπίζει διάφορες προκλήσεις. Το Massive MIMO απαιτεί μεγάλο αριθμό κεραιών και αναμεταδοτών, πράγμα που αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας και το κόστος. Επίσης, η επικοινωνία με mmWave, παρόλο που επωφελείται από το μεγάλο διαθέσιμο εύρος ζώνης, είναι ευαίσθητη σε μπλοκαρίσματα και απώλειες λόγω απορρόφησης. Παράλληλα, το Network Densification, παρόλο που μπορεί να ενισχύσει την κάλυψη και τη χωρητικότητα του δικτύου, προκαλεί αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, αυξάνει το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης και δυσκολεύει τη διαχείριση πόρων. Ακόμα, αποτελεί σημαντική πρόκληση η ανάπτυξη τεχνικών που θα εγγυώνται την αυστηρή απαίτηση για QoS των δικτύων νέας γενιάς, παρέχοντας αδιάλειπτη και πανταχού παρούσα συνδεσιμότητα. Απαιτείται λοιπόν μια ισορροπία μεταξύ της μέγιστης δυνατής κάλυψης και της ελαχιστοποίησης του κόστους, με την αύξηση των ταχυτήτων μετάδοσης και την μείωση της καθυστέρησης να αποτελούν θεμελιώδη στόχους. Συνεπώς, η αναζήτηση αποτελεσματικών λύσεων στην εποχή του IoE παραμένει ένα κεντρικό ζήτημα. Η ανάπτυξη και η εφαρμογή κατάλληλων τεχνολογιών απαιτεί διαρκή ανανέωση, για την επίτευξη της αποδοτικότητας και της αξιοπιστίας που αναμένεται από τα δίκτυα νέας γενιάς. [2]

#### 1.3.2. Η Προσφορά του RIS

Με ιδιαίτερο ενδιαφέρον, παρατηρούμε ότι μία από τις πιθανές απαντήσεις στις προαναφερόμενες προκλήσεις εντοπίζεται στην εφαρμογή των Reconfigurable Intelligent Surfaces. Συγκεκριμένα, το RIS αποτελεί μια επίπεδη επιφάνεια, η οποία συνθέεται από ένα μεγάλο αριθμό μικρών παθητικών και ανεξάρτητων στοιχείων. Αυτά τα στοιχεία είναι ικανά να διαμορφώνουν τόσο τη φάση όσο και το πλάτος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που ανακλάται από αυτά. Περισσότερο αναλυτικά, με τον κατάλληλο έλεγχο των μετατοπίσεων φάσης σε αυτά τα στοιχεία, τα ανακλώμενα σήματα είναι σε θέση να κατευθύνονται και να εστιάζονται σε επιθυμητές κατευθύνσεις. Αυτή η δυνατότητα έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της ισχύος και της ποιότητας του λαμβανόμενου σήματος στον δέκτη. [1] [9]

#### 1.3.3 Στόχοι του RIS

Το RIS έχει προταθεί ως μία επαναστατική τεχνολογία με σκοπό την επίτευξη των παρακάτω στόχων.

- Επέκταση κάλυψης για να υποστηρίξει αδιάκοπη επικοινωνία και υπερυψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, δημιουργώντας μια εικονική σύνδεση οπτικής επαφής για την παράκαμψη του φραγμού σήματος μεταξύ των πομποδεκτών.

- Βελτίωση της ισχύος και της κατάταξης του καναλιού για την αύξηση του κέρδους της χωρικής πολυπλεξίας και της φασματικής απόδοσης προσθέτοντας περισσότερα ελεγχόμενα μονοπάτια σήματος μεταξύ των πομποδεκτών.
- Βελτίωση των στατιστικών/κατανομής του καναλιού για την επίτευξη υπερ-αξιόπιστων επικοινωνιών μετατρέποντας, για παράδειγμα, τα κανάλια Rayleigh/γρήγορης ξαφνικής αλλαγής (σε σενάρια υψηλής κινητικότητας) σε αντίστοιχα κανάλια Rician/αργής ξαφνικής αλλαγής.
- Μείωση των παρεμβολών για την βελτίωση της ποιότητας της εμπειρίας του χρήστη ακυρώνοντας/ανακατεύοντας αποτελεσματικά τις παρεμβολές των ίδιων καναλιών/κελιών, ενώ βελτιώνεται η ποιότητα της λήψης του επιθυμητού σήματος.
- Βελτίωση της πυκνότητας των συνδέσεων για την υποστήριξη τεράστιων συνδεσιμότητων με οικονομικό τρόπο, χωρίς την ανάγκη για πυκνή εγκατάσταση ενεργών σταθμών βάσης (BSs)/σημείων πρόσβασης (APs) που καταναλώνουν πολύ ενέργεια.
- Βελτίωση της ακρίβειας για όλες τις εφαρμογές, παρέχοντας ελεγχόμενη αντανάκλαση του σήματος και λειτουργώντας ως το αναφορικό σημείο για τοπική ανίχνευση.

Εκτός από τις παραπάνω ελκυστικές λειτουργίες, το RIS μπορεί να επιτύχει παθητική δημιουργία δέσμης σε αμφίδρομο διαύλου επικοινωνίας χωρίς καθυστερήσεις επεξεργασίας, αυτοπαρεμβολή και ενίσχυση θορύβου, προσφέροντας ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών ενεργών αναμεταδοτών, όπως οι αναμεταδότες μονόδρομου διαύλου επικοινωνίας με καθυστέρηση επεξεργασίας καθώς και οι αναμεταδότες αμφίδρομο διαύλου επικοινωνίας που απαιτούν περίπλοκη ακύρωση αυτοπαρεμβολής. Επιπλέον, το RIS διαθέτει και άλλα πρακτικά πλεονεκτήματα, όπως χαμηλό προφίλ, ελαφρύ βάρος και συμμορφωτική γεωμετρία, τα οποία διευκολύνουν την ευέλικτη, διαφανή και μεγάλης κλίμακας εγκατάστασή του στα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα. [1]

#### 1.4. Σημαντικότητα Εκτίμησης του Καναλιού σε Αναδιαρθρώσιμες Ευφυής Επιφάνειες

Η τεχνολογία του RIS έχει προσελκύσει έντονο ενδιαφέρον στον κλάδο των επικοινωνιών, κυρίως λόγω των εκπληκτικών δυνατοτήτων της σε συνδυασμό με τις πρακτικές οικονομίες που προσφέρει. Η κύρια ικανότητα του RIS που τραβά τα βλέμματα είναι η δυνατότητά της να βελτιώνει σημαντικά την απόδοση των συστημάτων επικοινωνίας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας και της πολυπλοκότητας του υλικού εξοπλισμού, που συνοδεύει την ενσωμάτωση της τεχνολογίας RIS. Καίριο στοιχείο για την επιτυχία των συστημάτων που ενσωματώνουν το RIS, είναι η εκτίμηση των καναλικών συνθηκών. Το συγκεκριμένο στάδιο διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη διασφάλιση αξιόπιστης επικοινωνίας. Διαμέσου της εκτίμησης του καναλιού, είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι Πληροφορίες Κατάστασης Καναλιού (Channel State Information, CSI), ένα στοιχείο ζωτικής σημασίας για την επίτευξη αποτελεσματικής επικοινωνίας. Αφού προσδιοριστεί η τρέχουσα κατάσταση του καναλιού, το RIS μπορεί να διαμορφωθεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, προσαρμόζοντας την λειτουργία του στο περιβάλλον διάδοσης. Καταρχάς, θα αναδείξουμε την αποφασιστική σημασία και τις θετικές διαστάσεις της ακριβούς και προσεκτικής εκτίμησης του καναλιού.

- Βελτιωμένη απόδοση: Η προσαρμογή του RIS βάσει της ακριβούς εκτίμησης καναλιού ενισχύει την ενέργεια του σήματος προς τον προοριζόμενο δέκτη, μειώνει τις παρεμβολές και αυξάνει τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.
- Διαμόρφωση δέσμης: Η διαμόρφωση δέσμης είναι μια τεχνική επεξεργασίας σήματος που χρησιμοποιείται για μετάδοση ή λήψη κατευθυντικού σήματος. Στα συστήματα που

υποστηρίζονται από RIS, η παθητική διαμόρφωση δέσμης είναι βασικό στοιχείο και το CE βοηθά στο σχεδιασμό του.

- Μειωμένη κατανάλωση ενέργειας: Η ακριβής εκτίμηση του καναλιού από το RIS οδηγεί σε αποτελεσματικότερη διαχείριση των ενεργειακών πόρων, μειώνοντας έτσι την συνολική ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος.
- Μείωση της καθυστέρησης: Σε ευαίσθητες στον χρόνο εφαρμογές, όπως η ροή βίντεο ή βίντεο κλήσεις ή ακόμα και τα αυτόνομα οχήματα, η ακριβής εκτίμηση καναλιού επιτρέπει στο RIS να αντιδρά γρήγορα στις αλλαγές στο περιβάλλον διάδοσης, εξασφαλίζοντας επικοινωνία με χαμηλή καθυστέρηση.
- Αυξημένη ανθεκτικότητα: Με την σωστή εκτίμηση καναλιού, το RIS μπορεί να προσαρμόζεται καλύτερα σε διάφορα σενάρια επικοινωνίας, όπως εξασθένιση, σκίαση ή παρεμβολές, εξασφαλίζοντας αξιόπιστη επικοινωνία ακόμη και σε δύσκολα περιβάλλοντα.

Αντιστοίχως, η ανεπαρκής ή ανακριβής εκτίμηση του καναλιού σε συστήματα που ενσωματώνουν το RIS, μπορεί να προκαλέσει μια πλειάδα ανεπιθύμητων και δυσμενών συνεπειών.

- Υποβαθμισμένη ποιότητα σήματος: Η ανακριβής εκτίμηση καναλιού μπορεί να οδηγήσει σε μη βέλτιστη διαμόρφωση, προκαλώντας μειωμένη ισχύ σήματος στο δέκτη και δυνητικά αυξημένες παρεμβολές σε άλλους χρήστες.
- Χαμηλότερη φασματική απόδοση: Η ανεπαρκής εκτίμηση καναλιού μπορεί να εμποδίσει την βέλτιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος, με αποτέλεσμα η χωρητικότητα και οι ρυθμοί δεδομένων του συστήματος επικοινωνίας να επηρεαστούν αρνητικά.
- Αυξημένη καθυστέρηση: Η ανακριβής εκτίμηση καναλιού μπορεί να προκαλέσει καθυστερήσεις στην ικανότητα προσαρμογής του RIS στις αλλαγές του περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα αυξημένη καθυστέρηση σε εφαρμογές ευαίσθητες στο χρόνο.
- Μειωμένη ανθεκτικότητα: Η ανεπαρκής εκτίμηση του καναλιού μπορεί να εμποδίσει την ικανότητα του RIS να αντιμετωπίζει δύσκολα σενάρια επικοινωνίας, όπως εξασθένιση, σκίαση ή παρεμβολές, με τελικό αποτέλεσμα την αναξιόπιστη επικοινωνία.
- Υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας: Η ανακριβής εκτίμηση του καναλιού μπορεί να οδηγήσει σε λιγότερο αποδοτική χρήση των ενεργειακών πόρων, τόσο στον πομπό όσο και στο RIS, καθώς το σύστημα αγωνίζεται να διατηρήσει αξιόπιστη επικοινωνία.

Συνεπώς, είναι απαραίτητη η επαρκής εκτίμηση του καναλιού για την καλή λειτουργία του συστήματος. [1] [16]

## 1.5. Κίνητρο

Η αυξανόμενη ανάγκη για αξιόπιστες, υψηλής ταχύτητας ασύρματες επικοινωνίες σε έναν κόσμο που διαρκώς ψηφιοποιείται, δημιουργεί μία προκλητική αλλά μια ελκυστική ευκαιρία για έρευνα. Μεταξύ των πολλών προσπαθειών για βελτίωση των ασύρματων επικοινωνιών, η τεχνολογία των RIS κεντρίζει το ενδιαφέρον ως μια πρόσφατη και πολλά υποσχόμενη τεχνολογική προσέγγιση. Παρόλο που η έρευνα για το RIS είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο, η δυναμική τους προβλέπεται να επιφέρει ουσιαστικές αλλαγές στην αρχιτεκτονική και τη λειτουργία των ασύρματων δικτύων επικοινωνίας. Η δυνατότητά τους να αναμορφώνουν δυναμικά το περιβάλλον διάδοσης των σημάτων μπορεί να επιτρέψει την επίλυση κρίσιμων προβλημάτων που αντιμετωπίζουν τα σύγχρονα συστήματα επικοινωνίας, όπως είναι η εξάντληση φάσματος, οι παρεμβολές και η εξασθένιση του σήματος. Παρά τα πολλά οφέλη του RIS, υπάρχουν ακόμα σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν πριν από την ευρεία πρακτική εφαρμογή τους. Μεταξύ αυτών, η εκτίμηση καναλιού, η ανάπτυξη αποτελεσματικών αλγορίθμων για τον έλεγχο του RIS, η αντιμετώπιση των περιορισμών και των ατελειών του υλικού, καθώς και η αντιμετώπιση των πρακτικών ζητημάτων που σχετίζονται με την

ανάπτυξη του RIS, είναι ζητήματα που απαιτούν προσεκτική έρευνα και ανάλυση. Αυτή η διπλωματική προτίθεται να κατανοήσει και να αναλύσει τις δυνατότητες και τις προκλήσεις του RIS στα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας. Μέσα από αυτή την προσπάθεια, ελπίζουμε να προάγουμε την ευρύτερη κατανόηση του RIS. [1]





## Κεφάλαιο 2

### 2.1. Λειτουργία των Αναδιαρθρώσιμων Ευφυών Επιφανειών

#### 2.1.1. Τρία Βασικά Στάδια Λειτουργίας

Στο πεδίο των ασύρματων επικοινωνιών, η τεχνολογία του RIS αναδεικνύεται σε έναν παράγοντα που επαναπροσδιορίζει τα δεδομένα του τομέα. Καθώς η ζήτηση για ταχύτερα και αποτελεσματικότερα συστήματα επικοινωνίας αυξάνεται, το RIS έχει αποτελέσει αντικείμενο μείζονος ενδιαφέροντος για ερευνητές και μηχανικούς. Η ιδιαιτερότητα της τεχνολογίας RIS βρίσκεται στην ικανότητα μετατροπής του περιβάλλοντος σε ενεργό συμμετέχοντα της διαδικασίας της επικοινωνίας, προσφέροντας βελτιωμένη απόδοση και ενεργειακή αποδοτικότητα. Το RIS λειτουργεί έτσι ώστε να μπορεί να διαχειρίζεται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, ελέγχοντας την φάση και το πλάτος τους. Το RIS είναι συγκροτημένο από μικρά, κατά μήκος κύματος, στοιχεία γνωστά ως μετα-άτομα, τα οποία μπορούν να υποστούν ηλεκτρονικό έλεγχο για την επίτευξη του επιθυμητού χειρισμού των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το RIS βρίσκει τις ρίζες του στον τομέα των μετα-επιφανειών, τεχνητές επιφάνειες που μπορούν να ρυθμίζουν τις ιδιότητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μετα-επιφάνειες, το RIS είναι αναδιαρθρώσιμο και "έξυπνο", δηλαδή, μπορεί να προσαρμόζεται σε μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα και στις διαφοροποιημένες απαιτήσεις της επικοινωνίας. Η λειτουργία του RIS μπορεί να διακριθεί σε τρία βασικά στάδια:

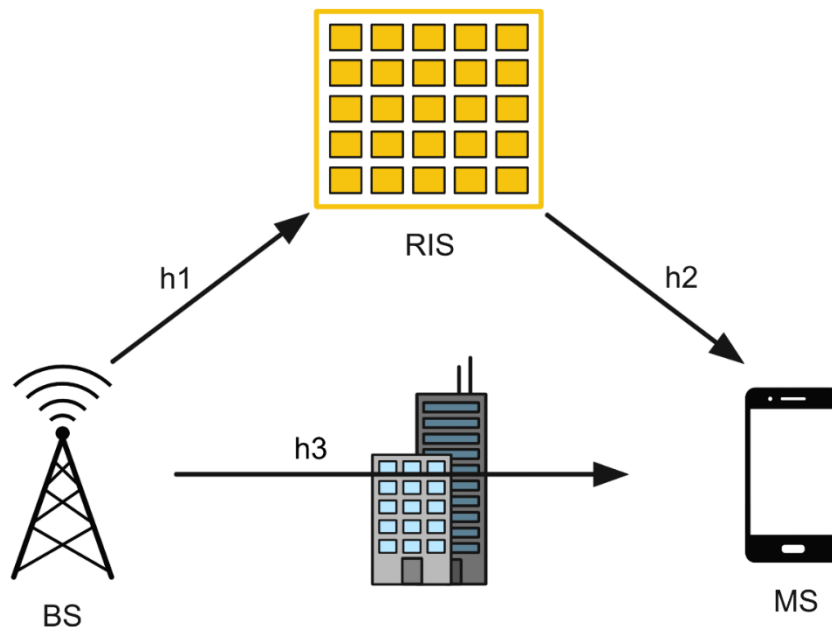
- Αλληλεπίδραση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων: Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε ένα RIS, αλληλεπιδρά με τα μετα-άτομα, προκαλώντας μια απόκριση βάσει του σχεδιασμού και της διαμόρφωσης των ατόμων.
- Χειρισμός του ηλεκτρομαγνητικού κύματος: Μέσω της προσαρμογής των ιδιοτήτων των μετα-ατόμων, το RIS μπορεί να χειρίζεται τα προσπίπτοντα κύματα, προσαρμόζοντας τη φάση και το πλάτος των ανακλώμενων κυμάτων.
- Αξιοποίηση του κύματος: Το διαμορφωμένο κύμα μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας. Για παράδειγμα, το RIS μπορεί να εστιάσει το σήμα προς έναν συγκεκριμένο δέκτη, ενισχύοντας την ισχύ του σήματος και μειώνοντας τις παρεμβολές από άλλες πηγές.

Για το μέλλον, το RIS παρουσιάζει τεράστια δυναμική για να προωθήσει την ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών, όχι μόνο ως προς την ταχύτητα και την απόδοση, αλλά και στο πλαίσιο της ενεργειακής αποδοτικότητας. [1] [4]

#### 2.1.2. Σενάριο Λειτουργίας στον Πραγματικό Κόσμο

Ας εξετάσουμε ένα σενάριο ασύρματης επικοινωνίας όπου ένα BS εξυπηρετεί ένα MS μέσα σε μια πυκνή αστική περιοχή. Όταν το BS προσπαθεί να επικοινωνήσει άμεσα με το MS σε ένα περιβάλλον χωρίς άμεση οπτική επαφή, το BS αντιμετωπίζει προβλήματα όπως η διαχείριση πολλαπλών μονοπατιών, η σκίαση και η παρεμβολή μεταξύ των διάφορων χρηστών, οι οποίες επηρεάζουν αρνητικά την ποιότητα του σήματος. Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα, τοποθετούμε ένα RIS στην πρόσοψη ενός κτιρίου που βρίσκεται ανάμεσα στο BS και στο MS. Το RIS βοηθά στην ενίσχυση της επικοινωνίας, παρέχοντας ένα μονοπάτι με άμεση οπτική επαφή LOS μεταξύ του BS και του MS. Το BS εκπέμπει σήματα προς το RIS με στόχο την εξυπηρέτηση του MS. Όταν το σήμα προσκρούει στο RIS, αλληλεπιδρά με τα μεταστοιχεία που απαρτίζουν την επιφάνειά του. Κάθε μεταστοιχείο είναι σχεδιασμένο να ανταποκρίνεται στο προσπίπτον ηλεκτρομαγνητικό κύμα με έναν συγκεκριμένο τρόπο, ανάλογα με την φυσική του δομή και την εφαρμοσμένη τάση. Το RIS διαθέτει μια μονάδα ελέγχου που λαμβάνει πληροφορίες για το ασύρματο περιβάλλον και, βασιζόμενη σε αυτές, υπολογίζει την ιδανική ρύθμιση για κάθε μεταστοιχείο ώστε να ελέγχει επαρκώς το προσπίπτον σήμα. Αυτή η μονάδα ελέγχου ρυθμίζει τα μεταστοιχεία (όπως οι δίοδοι varactor ή τα μικρομηχανικά

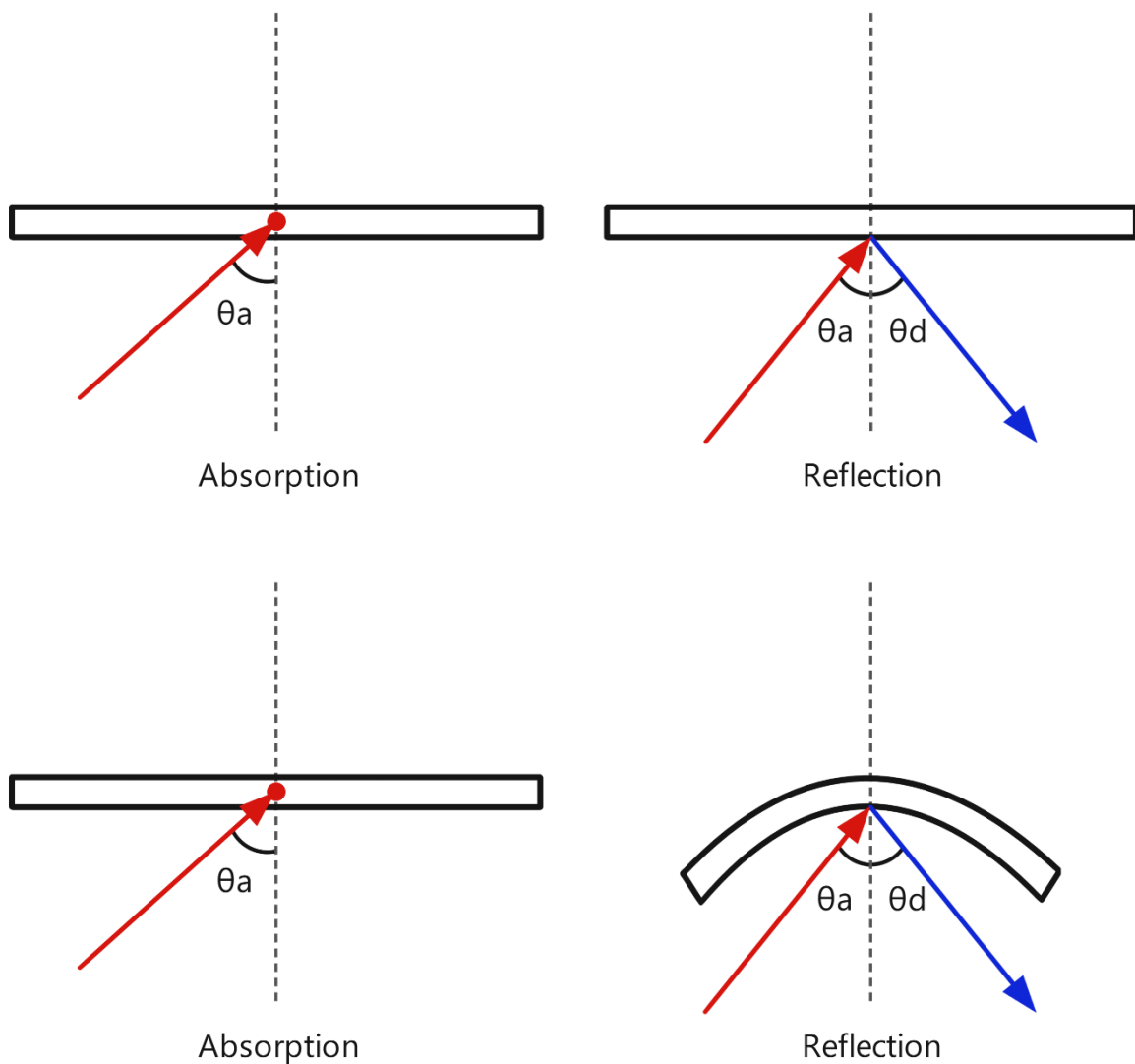
συστήματα - MEMS) για να επιτύχει την επιθυμητή διαμόρφωση. Το RIS διαχειρίζεται το προσπίπτον σήμα, ελέγχοντας την φάση και την έντασή του μέσω των μεταστοιχείων. Στοχεύει στην εστίαση της ενέργειας του μεταδιδόμενου σήματος προς το MS, για να βελτιωθεί η επικοινωνιακή απόδοση και να ελαχιστοποιηθεί η παρεμβολή προς άλλους χρήστες. Επομένως, το σήμα από το BS διέρχεται από το RIS και φτάνει στο MS με βελτιωμένη ενέργεια και ποιότητα. Αυτή η βελτίωση οφείλεται στην ικανότητα του RIS να συγκεντρώνει την ενέργεια του σήματος στη σωστή κατεύθυνση, αυξάνοντας την ισχύ του σήματος που φτάνει στον προορισμό. Επιπρόσθετα, το RIS μπορεί να αντιμετωπίσει τα προβλήματα που προκαλούνται από την πολλαπλή διάδοση και τη σκίαση στο ασύρματο περιβάλλον. Μέσω της ρύθμισης των μεταστοιχείων, το RIS μπορεί να κατευθύνει το σήμα να ακολουθήσει την καλύτερη διαδρομή προς το MS, αποφεύγοντας τα εμπόδια και βελτιώνοντας την ποιότητα της σύνδεσης. Συνολικά, η χρήση του RIS μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση της ασύρματης επικοινωνίας σε σύνθετα και πυκνοκατοικημένα αστικά περιβάλλοντα, παρέχοντας καλύτερη κάλυψη και αύξηση της ικανότητας διαχείρισης της χωρητικότητας του δικτύου. [1] [13]



Εικόνα 2.1.2. Το RIS προσφέρει LOS επικοινωνία.

### 2.1.3. Καταστάσεις Λειτουργίας των Παθητικών Στοιχείων

Οι τρόποι λειτουργίας των παθητικών στοιχείων στο πλαίσιο του RIS διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο αλληλεπίδρασής τους με τα προσπίπτοντα ηλεκτρομαγνητικά κύματα στα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας. Συγκεκριμένα, αναφέρονται ο τρόπος απορρόφησης και ο τρόπος ανάκλασης. Κάθε ένας από αυτούς τους τρόπους λειτουργίας προσφέρει μοναδικές δυνατότητες και εφαρμογές, εξαρτώμενα από τις ειδικές απαιτήσεις και τους στόχους του σεναρίου επικοινωνίας. Στις παρακάτω εικόνες αριστερά φαίνεται το στοιχείο σε λειτουργία απορρόφησης και δεξιά φαίνεται το στοιχείο σε λειτουργία ανάκλασης. Ουσιαστικά για να αντιστοιχίσουμε το πως λειτουργεί το RIS σε λειτουργία ανάκλασης μπορούμε να θεωρήσουμε ότι με την εφαρμογή κατάλληλης τάσης στα μετα-άτομα η επιφάνεια του RIS λειτουργεί σαν ένα παραβολικό ανακλαστήρα. [1] [12] [16]



Εικόνα 2.1.3. Χειρισμός του σήματος από τα παθητικά στοιχεία

### 2.1.3.1. Λειτουργία Απορρόφησης

Το RIS, κατά τη λειτουργία απορρόφησης, είναι κατασκευασμένο ώστε να απορροφά την ενέργεια των προσπιπτόντων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, ελαχιστοποιώντας την ανάκλαση και μειώνοντας τις παρεμβολές. Αυτή η λειτουργική χρήση βρίσκεται σε ευρεία υπόσταση σε σενάρια όπου η εξομάλυνση των παρεμβολών ή ο μετριασμός της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών αποτελεί κρίσιμη πτυχή. Με την απορρόφηση των ανεπιθύμητων σημάτων ή την ελαχιστοποίηση των ανακλάσεων από εμπόδια, ένα RIS σε λειτουργία απορρόφησης μπορεί να βελτιστοποιήσει το SNR και να ενισχύσει την συνολική απόδοση του συστήματος επικοινωνίας. Για να επιτευχθεί η απορρόφηση, τα μετα-άτομα του RIS είναι επιμελώς διαμορφωμένα ώστε η αντίσταση της επιφάνειας να ταιριάζει με την αντίσταση του περιβάλλοντος μέσου, συνήθως αέρα. Η ταύτιση της σύνθετης αντίστασης μειώνει τον συντελεστή ανάκλασης, ωθώντας το ηλεκτρομαγνητικό κύμα να απορροφάται από το RIS αντί να ανακλάται. Τα μετα-άτομα εντός του RIS μπορούν να ρυθμιστούν ηλεκτρονικά, προσαρμόζοντας την επίδοση απορρόφησης σε ένα δυναμικό ασύρματο περιβάλλον. Σε συγκεκριμένες εφαρμογές, το RIS σε λειτουργία απορρόφησης μπορεί να είναι χρήσιμο για την δημιουργία ενός ελεγχόμενου ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος, καθίσταται επωφελές σε σενάρια όπως η ασφαλής επικοινωνία,

όπου η ελαχιστοποίηση της πιθανότητας υποκλοπής σήματος είναι απαραίτητη. Μία πρόσθετη εφαρμογή του RIS στη λειτουργία απορρόφησης είναι η μείωση των παρεμβολών στα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας. Απορροφώντας τα σήματα από ανεπιθύμητες πηγές ή πολλαπλές διαδρομές, μπορεί να αυξήσει την απόδοση της επικοινωνίας για τους προγραμματισμένους χρήστες. Αυτή η δυνατότητα αποδεικνύεται ιδιαίτερα πολύτιμη σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα ή εσωτερικούς χώρους, όπου η διάδοση πολλαπλών διαδρομών και οι παρεμβολές μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την απόδοση της επικοινωνίας. [1] [12] [16]

### **2.1.3.2. Λειτουργία Ανάκλασης**

Η λειτουργία ανάκλασης του RIS αφορά κυρίως την διαχείριση των χαρακτηριστικών των προσερχόμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω της ανάκλασης. Η φάση και το πλάτος των ανακλώμενων κυμάτων είναι παράμετροι που ελέγχονται από το RIS, με σκοπό τη διαμόρφωση του κύματος για την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων. Αυτοί οι στόχοι μπορεί να περιλαμβάνουν την κατεύθυνση του σήματος προς έναν συγκεκριμένο δέκτη, την εστίαση της ενέργειας του μεταδιδόμενου σήματος για την ενίσχυση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος σε μια θέση-στόχο, ή την καταστολή του σήματος σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις για την μείωση των παρεμβολών. Η λειτουργία ανάκλασης αποδεικνύεται εξαιρετικά ευεργετική σε σενάρια όπου η βελτίωση της κάλυψης, η ενίσχυση της ισχύος του σήματος ή η μείωση των παρεμβολών αποτελεί τον κύριο στόχο. Το RIS, όταν βρίσκεται σε λειτουργία ανάκλασης, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση των ασύρματων επικοινωνιακών συστημάτων μέσω του ελέγχου της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Για παράδειγμα, σε πυκνό αστικό περιβάλλον, ένα RIS τοποθετημένο στην πρόσοψη ενός κτιρίου, θα μπορούσε να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά το φαινόμενο της σκίασης που προκαλείται από το ίδιο το κτίριο, επαναπροσανατολίζοντας το σήμα προς έναν συγκεκριμένο δέκτη. Σε ένα διαφορετικό σενάριο, το RIS μπορεί να εφαρμοστεί για την εστίαση της ενέργειας ενός μεταδιδόμενου σήματος προς μια συγκεκριμένη περιοχή, εξασφαλίζοντας υψηλότερη ισχύ του λαμβανόμενου σήματος και βελτιωμένη κάλυψη. Τέλος, σε ένα σύστημα επικοινωνίας με πολλούς χρήστες, το RIS θα μπορούσε να κατευθύνει τα ανακλώμενα σήματα προς τους επιθυμητούς δέκτες, καταστέλλοντας παράλληλα τα σήματα προς άλλες κατευθύνσεις. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να μειώνει τις παρεμβολές και να βελτιώνει την απόδοση της επικοινωνίας για όλους τους χρήστες. [1] [12] [16]

### **2.1.4. Λειτουργία Βάση του Τύπου του RIS**

Το RIS, ανάλογα με τον σχεδιασμό και τη λειτουργικότητά του, μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο κύριες κλάσεις: το ενεργητικό RIS και το παθητικό RIS. Αμφότεροι οι τύποι χαρακτηρίζονται από μοναδικά χαρακτηριστικά, έχοντας πλεονεκτήματα και προοπτικές εφαρμογές σε διάφορα σενάρια ασύρματης επικοινωνίας. [12]

#### **2.1.4.1. Ενεργού Τύπου RIS**

Το ενεργό RIS διακρίνεται για την ικανότητά του να ρυθμίζει το πλάτος των προσπίπτων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Πέραν της απλής αντανάκλασης των εισερχόμενων σημάτων, τα ενεργά στοιχεία του RIS μπορούν να ενισχύσουν το επανεκπεμπόμενο σήμα, καταφέροντας να βελτιώνουν την ισχύ και την ποιότητά του. Οι εν λόγω επιφάνειες εφοδιάζονται με ενεργά στοιχεία, όπως ενισχυτές, που τους παρέχουν τη δυνατότητα να αυξάνουν την ισχύ των ανακλώμενων σημάτων, προσθέτοντας έτσι επιπλέον βαθμούς ελευθερίας στο σύστημα επικοινωνίας. Η χρήση της ενεργού RIS τεχνολογίας μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική σε περιπτώσεις όπου το σήμα είναι αδύναμο. [12]

#### **2.1.4.2. Παθητικού Τύπου RIS**

Αντίθετα με το ενεργό RIS, το παθητικό RIS δεν προϋποθέτει τη χρήση πρόσθετων ενεργών στοιχείων για τη διαχείριση των ασύρματων σημάτων. Αποτελείται από μία επίπεδη επιφάνεια που

ενσωματώνει μια ποικιλία ανακλαστικών στοιχείων, τα οποία ανακατευθύνουν τα εισερχόμενα ασύρματα σήματα. Κάθε ανακλαστικό στοιχείο σε ένα παθητικό RIS σχεδιάζεται με σκοπό την αντανάκλαση του εισερχόμενου σήματος προς την κατεύθυνση του δέκτη. Η τεχνολογία παθητικού RIS, παρότι αποτελεί μια πιο ενεργειακά αποδοτική και λιγότερο πολύπλοκη επιλογή σε σχέση με το ενεργό RIS, ίσως να μην είναι τόσο αποτελεσματική σε περιπτώσεις όπου το σήμα είναι αδύναμο. Ωστόσο, καθώς δεν απαιτεί ενεργά στοιχεία, το παθητικό RIS είναι γενικά λιγότερο πολύπλοκο, ενεργοβόρο και δαπανηρό από το ενεργό RIS, γεγονός που το καθιστά εξαιρετικά ελκυστικό για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Το παθητικό RIS μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της απόδοσης των ασύρματων επικοινωνιακών συστημάτων με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα, μπορεί να συμβάλει στην εστίαση της ενέργειας των μεταδιδόμενων σημάτων προς τους προβλεπόμενους δέκτες, ενισχύοντας κατ' αυτόν τον τρόπο το SNR και μειώνοντας τις παρεμβολές. Το παθητικό RIS μπορεί επίσης να αποτρέπει τις αρνητικές συνέπειες της πολλαπλής διάδοσης ή της σκίασης, ανακατευθύνοντας τα προσπίπτοντα κύματα προς την επιθυμητή κατεύθυνση ή παρέχοντας εναλλακτικές διαδρομές διάδοσης. [12]

## 2.2. Πλεονεκτήματα των Αναδιαρθρίσιμων Ευφυών Επιφανειών

### 2.2.1. Κύρια Πλεονεκτήματα

Η τεχνολογία του RIS έχει επιδείξει σημαντική πρόοδο, δίνοντας υποσχέσεις για έναν ενδεχομένως μετασχηματιστικό ρόλο στην εξέλιξη των συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας. Με την ικανότητα να διαχειρίζεται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, παρέχει μια σειρά από πλεονεκτήματα σε σχέση με τους συμβατικούς τρόπους αναμετάδοσης. Τα κύρια πλεονεκτήματα της χρήσης του RIS παρουσιάζονται παρακάτω.

- **Εύκολη εγκατάσταση:** Το RIS είναι μια παθητική συσκευή, κατασκευασμένη από ηλεκτρομαγνητικά υλικά. Έχει την δυνατότητα να εγκατασταθεί σε διάφορες δομές, συμπεριλαμβανομένων, αλλά όχι περιορισμένων σε, κτίρια, εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους.
- **Βελτίωση της φασματικής απόδοσης:** Το RIS είναι σε θέση να επαναδιαμορφώνει το περιβάλλον διάδοσης αποζημιώνοντας την απώλεια ισχύος σε μακρινές αποστάσεις. Μπορεί να δημιουργήσει εικονικές ζώνες οπτικής επαφής (Line of Sight, LoS) μεταξύ των BS και MS μέσω της παθητικής αντανάκλασης του σήματος.
- **Φιλικό προς το περιβάλλον:** Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά συστήματα αναμετάδοσης σήματος το RIS είναι σε θέση να αναδιαμορφώσει το προσπίπτον σήμα ελέγχοντας την φασική μετατόπιση κάθε αντανακλαστικού στοιχείου. Έτσι, η εγκατάσταση των RIS είναι πιο ενεργειακά αποδοτική και φιλική προς το περιβάλλον από τα παραδοσιακά συστήματα AF και DF.
- **Συμβατότητα:** Τα RISs υποστηρίζουν αμφίδρομη επικοινωνία και πλήρους ζώνης μετάδοση λόγω του γεγονότος ότι απλώς αντανακλούν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Επιπλέον, τα ασύρματα δίκτυα που ενσωματώνουν RIS είναι συμβατά με τα πρότυπα και τον εξπλιισμό των υφιστάμενων ασύρματων δικτύων.

Λόγω των προαναφερθέντων ελκυστικών χαρακτηριστικών, το RIS αναγνωρίζεται ως αποτελεσματική λύση για τον μετριασμό ενός ευρέος φάσματος προκλήσεων σε εμπορικές αλλά και στρατιωτικές εφαρμογές. [11]

## 2.2.2. Πλεονεκτήματα σε Σχέση με Relays

### 2.2.2.1. Πολυπλοκότητα Υλικού

Οι αναμεταδότες απαιτούν συνήθως μια εξωτερική πηγή ενέργειας για να λειτουργήσουν. Είναι εξοπλισμένα με ενεργά ηλεκτρονικά εξαρτήματα, όπως μετατροπείς ψηφιακού σε αναλογικό (DAC) και αντίστροφα (ADC), μίκτες, ενισχυτές ισχύος για μετάδοση και ενισχυτές χαμηλού θορύβου για την λήψη. Επιπλέον, για την εφαρμογή της αποκωδικοποίησης και προώθησης (DF) καθώς και την αναμετάδοση ενίσχυσης και προώθησης (AF), χρειάζονται πολλά ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Η ανάπτυξη των ρελέ είναι συνεπώς δαπανηρή και ενεργοβόρα, ειδικά όταν εφαρμόζεται σε σχέδια με πολλαπλές κεραιές σε ζώνες συχνοτήτων χιλιοστών και υποχιλιοστών κυμάτων. Η πολυπλοκότητα αυξάνεται ακόμα περισσότερο εάν χρησιμοποιούνται full duplex relays, καθώς απαιτείται η εξάλειψη της αυτο-παρεμβολής με τη χρήση εξειδικευμένων κεραιών και μεθόδων αναλογικής/ψηφιακής επεξεργασίας σήματος. Ακόμα, τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα είναι ευαίσθητα στον θόρυβο, ο οποίος μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση των συμβατικών πρωτοκόλλων αναμετάδοσης. Στην αναμετάδοση AF, για παράδειγμα, ο θόρυβος ενισχύεται. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση DF αναμετάδοσης, αλλά αυτό αυξάνει την πολυπλοκότητα και την κατανάλωση ενέργειας λόγω της επιπλέον επεξεργασίας του σήματος. Αντιθέτως, το RIS το οποίο είναι φτιαγμένο από μεταλλικά ή διηλεκτρικά στοιχεία επάνω σε γειωμένο διηλεκτρικό υπόστρωμα. Επιτυγχάνει την ρύθμιση των παραμέτρων του μέσω ηλεκτρονικών κυκλωμάτων χαμηλής ισχύος και χαμηλής πολυπλοκότητας. [4]

### 2.2.2.2. Θόρυβος

Στα relays εμφανίζουν μια σημαντική ευαισθησία στον πρόσθετο θόρυβο, ο οποίος μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση των παραδοσιακών μεθόδων αναμετάδοσης. Για παράδειγμα, κατά την αναμετάδοση Amplify-and-Forward (AF), ο θόρυβος ενισχύεται από τα relays. Μπορεί να ελαττώσουμε την επίδραση του επιπλέον θορύβου μέσω της μεθόδου αναμετάδοσης Decode-and-Forward (DF), αλλά αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πολυπλοκότητας της επεξεργασίας του σήματος και της κατανάλωσης ενέργειας, λόγω της αποκωδικοποίησης και επανακωδικοποίησης του σήματος. Σε περίπτωση Full-Duplex (FD) αναμετάδοσης, η απόδοση του συστήματος επιδεινώνεται περαιτέρω από την αυτο-παρεμβολή του βρόχου. Από την άλλη πλευρά, το RIS που λειτουργεί ως ανακλαστήρας δεν επηρεάζεται από τον επιπλέον θόρυβο. [4]

### 2.2.2.3. Αποδοτικότερη Χρησιμοποίηση Φάσματος

Η φασματική απόδοση των συστημάτων επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το επιλεγμένο μοντέλο διαύλου επικοινωνίας. Στην περίπτωση της χρήσης Half-Duplex, η επιτεύξιμη ταχύτητα αποκλιμακώνεται συνήθως κατά παράγοντα δύο, καθώς χρησιμοποιούνται διαφορετικοί φυσικοί πόροι για τα δεδομένα που εκπέμπονται από τον πομπό και τον repeater. Ωστόσο, ο λόγος σήματος προς θόρυβο από άκρο σε άκρο μπορεί να βελτιωθεί εκμεταλλευόμενος πιο ευνοϊκές συνθήκες διάδοσης για το αναμεταδιδόμενο σήμα, καθώς και με τον οπτιμισμό του συνδυασμού του άμεσου και του αναμεταδιδόμενου σήματος. Στην περίπτωση της χρήσης Full-Duplex, ο επιτεύξιμος ρυθμός δεν μειώνεται στο μισό, ωστόσο, το relay επηρεάζεται από την υπολειπόμενη αυτο-παρεμβολή, ενώ το repeater επηρεάζεται από την επιμένουσα αυτο-παρεμβολή, και ο δέκτης υποφέρει από την παρεμβολή που παράγεται από την ταυτόχρονη μετάδοση του πομπού και του repeater. Από την άλλη πλευρά, το RIS, που λειτουργεί ως ανακλαστήρας, δεν επηρεάζεται από τις περιοριστικές συνθήκες της ημι-αμφίδρομης λειτουργίας και της αυτο-παρεμβολής βρόχου. [4]

### 2.2.2.4. Απαιτήσεις Ισχύος

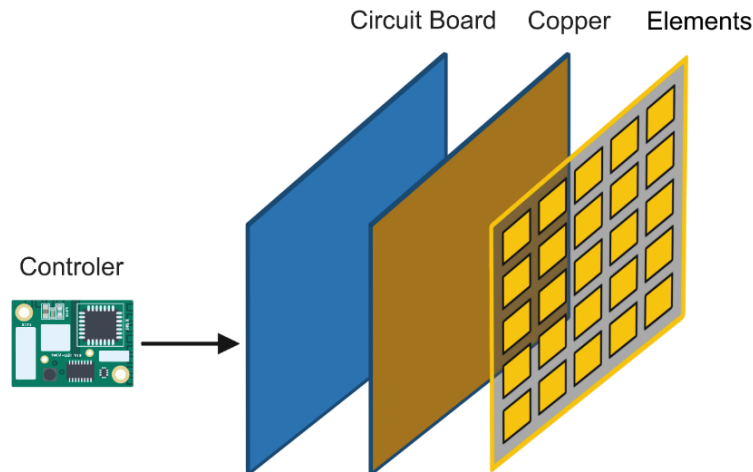
Το repeater απαιτεί ανεξάρτητη πηγή ενέργειας για τη λειτουργία του, η οποία χρησιμοποιείται για τη μετάδοση των σημάτων (RF ισχύς) καθώς και για την παροχή ενέργειας στα ηλεκτρονικά του

εξαρτήματα. Αντίθετα, το RIS είναι κατάλληλο για σχεδόν παθητικές υλοποιήσεις, καθώς η μεταεπιφάνεια μπορούν να υλοποιηθούν με πλήρως παθητικά εξαρτήματα, και χαμηλής ισχύος ενεργά εξαρτήματα (switches or varactors διακόπτες ή βαράκτορες) απαιτούνται μόνο για τη διασφάλιση της επαναρυθμιζόμενης ικανότητάς τους. Επίσης, η φύση της χαμηλής ισχύος των διακοπών και βαράκτορων καθιστά την ενεργειακή συγκομιδή κατάλληλο υποψήφιο για την υλοποίηση κοντά σε παθητικές, υλοποιήσεις. Στα συστήματα με repeater, η συνολική RF ισχύς κατανέμεται μεταξύ του πομπού και του repeater, έτσι ώστε να διασφαλίζεται ο συνολικός περιορισμός της ισχύος. Στα συστήματα με RIS, ο πομπός αξιοποιεί τη συνολική RF ισχύ. Η ισχύς που ανακλάται από το RIS εξαρτάται από τη μετάδοσή του, η οποία μπορεί να βελτιστοποιηθεί μέσω της κατάλληλης σχεδίασης της μεταεπιφάνειας. Σε μια ιδανική περίπτωση, η συνολική ισχύς που ανακλάται από το RIS είναι η ίδια με τη συνολική ισχύ της κυματομορφής που προσπίπτει σε αυτό. [4]

## **2.3. Κατασκευαστική Δομή των Αναδιαρθρώσιμων Ευφυών Επιφανειών**

### **2.3.1. Ανάλυση Στρωμάτων**

Το RIS είναι μια καλά οργανωμένη διάταξη που αποτελείται από μια δισδιάστατη σειρά παθητικών στοιχείων, τα οποία ρυθμίζονται ηλεκτρονικά, με σκοπό τον ελεγχόμενο έλεγχο των εισερχόμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Αυτή η διάταξη συναρμολογείται κυρίως από δύο μέρη: την κυψέλη και τον ελεγκτή. Η κυψέλη, ως το πρωταρχικό δομικό στοιχείο του RIS, φέρει την ευθύνη για την ανάκλαση και την διαμόρφωση των εισερχόμενων κυμάτων. Είναι φτιαγμένη από τρία συστατικά μέρη: ένα μεταλλικό επίθεμα, ένα υπόστρωμα και ένα μεταλλικό επίπεδο γείωσης. Το μεταλλικό επίθεμα ασχολείται με την ανάκλαση των εισερχόμενων κυμάτων, ενώ το υπόστρωμα προσφέρει υποστήριξη σε αυτό. Το μεταλλικό επίπεδο γείωσης, από την άλλη πλευρά, παίζει τον ρόλο της απομόνωσης της κυψέλης από το εξωτερικό περιβάλλον, περιορίζοντας έτσι τις απώλειες από τα ανακλώμενα κύματα. Ο ελεγκτής της διάταξης, έχει ως ρόλο τον ελεγχόμενο έλεγχο της συμπεριφοράς κάθε στοιχείου της κυψέλης. Έχει τη δυνατότητα να προσαρμόσει τη φάση και το πλάτος των ανακλώμενων κυμάτων εφαρμόζοντας διαφορετικές τάσεις σε κάθε στοιχείο. Η σύνδεση με τα στοιχεία της κυψέλης επιτυγχάνεται μέσω ενός συστήματος καλωδίων που μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια και τα σήματα ελέγχου σε κάθε στοιχείο. Ο ελεγκτής θα μπορούσε να είναι μια Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (CPU), μια Διάταξη Προγραμματιζόμενων Πυλών Πεδίου (FPGA), ή ένα Ολοκληρωμένο Κύκλωμα Ειδικής Εφαρμογής (ASIC). Η δομή του RIS μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο βασικές τάξεις, βάσει του αριθμού των στρωμάτων των κυψελών: μονόστρωμη και πολύστρωμη. Στην πρώτη περίπτωση, όλα τα στοιχεία βρίσκονται στο ίδιο στρώμα, γεγονός που απλοποιεί τη διαδικασία κατασκευής και μειώνει το κόστος, αλλά προσφέρει περιορισμένη δυνατότητα αναδιαμόρφωσης, λόγω του περιορισμένου αριθμού των στοιχείων. Αντίθετα, στη δομή των πολλαπλών στρωμάτων, τα στοιχεία είναι κατανομημένα σε διάφορα στρώματα, αυξάνοντας τον συνολικό αριθμό των στοιχείων και την δυνατότητα αναδιαμόρφωσης του RIS. Ωστόσο, αυτή η δομή είναι πιο περίπλοκη και δαπανηρή στην κατασκευή. [9] [10] [14]



Εικόνα 2.3.1. Τα στρώματα του RIS.

### 2.3.2. Ανάλυση Υλικών

Ένα από τα βασικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του RIS είναι το Διοξείδιο του Βαναδίου (Vanadium Dioxide,  $\text{VO}_2$ ). Αυτό το υλικό είναι γνωστό για την ιδιότητα μετάβασης του από μέταλλο σε μονωτή. Ένα στρώμα  $\text{VO}_2$  τοποθετείται σε έναν πίνακα με μικρο-θερμάστρες υψηλής πυκνότητας το οποίο μπορούν να ενεργοποιηθούν ηλεκτρονικά. Με αυτόν τον έλεγχο, η θερμότητα μπορεί να μεταφερθεί σε επιλεγμένες περιοχές του στρώματος  $\text{VO}_2$ , μετατρέποντάς το σε ένα πολύ αγωγίμο μέταλλο. Αυτή η τεχνική επιτρέπει τη δυναμική αλλαγή του σχήματος της επιφάνειας που ανακλάει με υψηλή ταχύτητα. Ένα άλλο υλικό που χρησιμοποιείται στο RIS είναι το γραφένιο. Τα πλασμόνια του γραφενίου επιδεικνύουν μικρότερες απώλειες σε σχέση με τις συμβατικές μεταλλικές μεταδιαφανείς επιφάνειες. Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται στο RIS περιλαμβάνουν τα υλικά μεταβολής φάσης όπως τα χαλκογονίδια και τους υγρούς κρυστάλλους. Αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται στην ρύθμιση των στοιχείων του RIS, άρα είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη επαναδιαμόρφωσης. Το RIS μπορεί επίσης να υλοποιηθεί μέσω τυποποιημένων διαδικασιών κατασκευής της βιομηχανίας, καθιστώντας το κατάλληλο για κατασκευή μεγάλης κλίμακας, που απαιτείται για τις μελλοντικές έξυπνες πόλεις που θα χρησιμοποιούν 6G. Επιπλέον, τα εμφανιζόμενα 2D υλικά van der Waals χρησιμοποιώντας πολωτικά πλάσματα παρέχουν νέες προσεγγίσεις για δυναμική ρύθμιση στο φάσμα των THz. Εκτός από αυτά τα υλικά, το RIS χρησιμοποιεί επίσης ηλεκτρονικές προσεγγίσεις όπως το τρανζίστορ συμπληρωματικό μέταλλο-οξειδίου-ημιαγωγού (Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS), την δίοδο Schottky (Schottky Diode), και το Τρανζίστορ Υψηλής Κινητικότητας Ηλεκτρονίων (High Electron Mobility Transistor, HEMT). Αυτά τα ηλεκτρονικά στοιχεία χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της φάσης των σημάτων που ανακλώνται από το RIS. [14]

#### 2.3.2.1. Διοξείδιο του Βαναδίου

Το διοξείδιο του βαναδίου είναι ένα αξιοσημείωτο υλικό που υφίσταται μια μετάβαση φάσης γύρω στους 67 βαθμούς Κελσίου. Στη φάση της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργεί ως μονωτής, αλλά όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, μετατρέπεται σε μέταλλο. Η μετάβαση φάσης συνοδεύεται από μια δραστική αλλαγή στις ηλεκτρικές και οπτικές ιδιότητες του υλικού. Αυτές οι ιδιότητες, ειδικά η απότομη αλλαγή στην αγωγιμότητά του, το καθιστούν ενδιαφέρον υποψήφιο για διάφορες εφαρμογές, όπως έξυπνα παράθυρα, συσκευές μνήμης, αισθητήρες και φυσικά RIS. Για το RIS, η μοναδική ιδιότητα του διοξειδίου του βαναδίου να μεταβαίνει από μονωτική σε μεταλλική κατάσταση με



θερμοκρασία, ηλεκτρικό πεδίο ή οπτική διέγερση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ενεργό χειρισμό της απόκρισης των στοιχείων του RIS. Αυτό μπορεί να γίνει ρυθμίζοντας τη θερμοκρασία ή εφαρμόζοντας ηλεκτρική τάση στα στοιχεία VO<sub>2</sub> στο RIS. Η ταχύτητα μεταγωγής είναι υψηλή και η αλλαγή στις ιδιότητες είναι δραματική, καθιστώντας έτσι το RIS που βασίζεται σε VO<sub>2</sub> δυνητικά πολύ αποτελεσματικό στον δυναμικό χειρισμό των σημάτων ασύρματης επικοινωνίας. Η ενσωμάτωση του διοξειδίου του βαναδίου στο RIS, θα μπορούσε ενδεχομένως να επιτρέψει τη δυναμική επαναδιαμόρφωση του RIS σε γρήγορες ταχύτητες, επιτρέποντας έτσι ένα πιο προσαρμόσιμο περιβάλλον επικοινωνίας. Μία από τις πιθανές προκλήσεις είναι η ανάγκη τοπικού ελέγχου της φάσης του VO<sub>2</sub>, η οποία μπορεί να απαιτεί εξελιγμένα συστήματα κατασκευής και ελέγχου. [14] [15]

### 2.3.2.2. Συμπληρωματικοί Ημιαγωγοί Οξειδίων Μετάλλου

Η τεχνολογία CMOS είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία στην κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Χρησιμοποιείται σε μικροεπεξεργαστές, μικροελεγκτές, στατική μνήμη RAM και πολλά άλλα ψηφιακά λογικά κυκλώματα. Το CMOS διακρίνεται για την υψηλή αντίστασή του στο θόρυβο και τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Όταν πρόκειται για την εφαρμογή της τεχνολογίας CMOS στο πλαίσιο των RIS, το CMOS χρησιμοποιείται συνήθως για την κατασκευή της μονάδας ελέγχου του RIS. Ο έλεγχος των παθητικών στοιχείων ενός RIS, δηλαδή η προσαρμογή των ιδιοτήτων τους, συνήθως επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Η χρήση της τεχνολογίας CMOS επιτρέπει τον ακριβή, αποτελεσματικό και γρήγορο έλεγχο της κατάστασης κάθε μεμονωμένου στοιχείου στην επιφάνεια. Αυτό επιτρέπει υψηλό βαθμό επαναδιαμόρφωσης και προσαρμοστικότητας. Τα επιμέρους στοιχεία μπορούν να ρυθμιστούν δυναμικά για τη βελτιστοποίηση της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με βάση τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του σεναρίου επικοινωνίας. Επιπλέον, η χρήση του CMOS στο RIS μπορεί επίσης να προσφέρει έναν τρόπο ενσωμάτωσης των δυνατοτήτων ανίχνευσης στην επιφάνεια. Για παράδειγμα, με την ενσωμάτωση πρόσθετων κυκλωμάτων στη σχεδίαση, το RIS θα μπορούσε ενδεχομένως να ανιχνεύσει αλλαγές στο περιβάλλον διάδοσης και να προσαρμόσει τη διαμόρφωσή του σε πραγματικό χρόνο, χωρίς να απαιτείται εξωτερική είσοδος ή έλεγχος. [14]

### 2.3.2.3. Δίοδος Schottky

Μια δίοδος Schottky είναι ένας τύπος σύνδεσης μετάλλου-ημιαγωγού όπου η διεπαφή μεταξύ του μετάλλου και του ημιαγωγού σχηματίζει ένα φράγμα Schottky, επίσης γνωστό ως ανορθωτική διασταύρωση. Το βασικό χαρακτηριστικό μιας διόδου Schottky είναι η χαμηλή πτώση τάσης προς τα εμπρός και η γρήγορη λειτουργία μεταγωγής, γεγονός που την καθιστά χρήσιμη σε πολλές ηλεκτρονικές εφαρμογές. Όσον αφορά το RIS, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δυναμική και γρήγορη προσαρμογή της συμπεριφοράς των στοιχείων της επιφάνειας. Η χαμηλή πτώση τάσης προς τα εμπρός σημαίνει ότι μπορούν να γίνουν αλλαγές με λιγότερη κατανάλωση ενέργειας, ενώ η γρήγορη εναλλαγή επιτρέπει τις ρυθμίσεις να γίνονται ταχύτατα. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε ένα δυναμικό περιβάλλον όπου τα χαρακτηριστικά διάδοσης μπορεί να αλλάζουν γρήγορα, όπως σε ένα κινούμενο όχημα. Ένας πιθανός τρόπος για την ενσωμάτωση των διόδων Schottky σε ένα RIS θα ήταν να χρησιμοποιηθούν ως στοιχεία μεταγωγής που ελέγχουν την κατάσταση των επιμέρους επιφανειακών στοιχείων. Προσαρμόζοντας τις διόδους, οι ιδιότητες των μετα-ατόμων μπορούν να τροποποιηθούν και ως εκ τούτου, η συμπεριφορά των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που αλληλεπιδρούν με το RIS μπορεί να ελεγχθεί. Επιπλέον, λόγω των τους ιδιοτήτων, οι διόδοι Schottky θα μπορούσαν ενδεχομένως να χρησιμοποιηθούν για τη συλλογή ενέργειας από τα προσπίπτοντα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδοσία του ίδιου του RIS ή άλλων συνδεδεμένων συσκευών. [14]

#### 2.3.2.4. Τρανζίστορ Ηλεκτρονίων Υψηλής Κινητικότητας

Το HEMT είναι τρανζίστορ φαινομένου πεδίου που εκμεταλλεύεται την υψηλή κινητικότητα ηλεκτρονίων προκειμένου να επιτύχει γρήγορες ταχύτητες μεταγωγής και λειτουργία υψηλής συχνότητας. Χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές όπως δορυφορικοί δέκτες, συστήματα ραντάρ, κινητά τηλέφωνα και άλλα συστήματα επικοινωνίας. Στο πλαίσιο του RIS, τα HEMT μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο ως ελεγκτές καθώς ο έλεγχος των παθητικών στοιχείων, δηλαδή η προσαρμογή των ιδιοτήτων τους, επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Τα HEMT μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτόν τον μηχανισμό ελέγχου λόγω της γρήγορης ταχύτητας μεταγωγής και της λειτουργίας υψηλής συχνότητας. Η γρήγορη ταχύτητα μεταγωγής μπορεί να παρέχει δυναμικό έλεγχο της κατάστασης των στοιχείων του RIS, επιτρέποντας γρήγορες ρυθμίσεις με βάση το περιβάλλον επικοινωνίας. Η λειτουργία υψηλής συχνότητας καθιστά τα HEMT κατάλληλα για τον έλεγχο RIS σε σενάρια επικοινωνίας υψηλής συχνότητας, όπως συστήματα επικοινωνίας mmWave ή ακόμα και terahertz. Επιπλέον, οι τιμές χαμηλού θορύβου των HEMT τα καθιστούν κατάλληλα για ευαίσθητες εφαρμογές όπου η διατήρηση της ακεραιότητας του σήματος είναι κρίσιμη. Αυτό θα μπορούσε να βελτιώσει περαιτέρω την απόδοση του RIS ελαχιστοποιώντας τον θόρυβο που εισάγεται από τον μηχανισμό ελέγχου. [14]



## Κεφάλαιο 3

### 3.1. Εκτίμηση Καναλιού σε Αναδιαρθρώσιμες Ευφυείς Επιφάνειες

#### 3.1.1. Κύρια Προβλήματα σε Συστήματα με RIS

Τα πολλαπλά οφέλη χαρακτηρίζουν το RIS κατάλληλο για την ενσωμάτωσή του στις ασύρματες επικοινωνίες. Ωστόσο, υπάρχουν κάποια πρακτικά ζητήματα και προκλήσεις που απαιτούν άμεση αντιμετώπιση κατά την υποστήριξη των ασύρματων επικοινωνιών με τη χρήση του RIS. Οι κύριες προκλήσεις περιλαμβάνουν την εκτίμηση/απόκτηση καναλιού RIS, τον πρακτικό σχεδιασμό παθητικής δέσμησης/αντανάκλασης της RIS με ατελείς πληροφορίες CSI, καθώς και διάφορους περιορισμούς και ατέλειες υλικού. [1]

#### 3.1.2. Εκτίμηση/Απόκτηση Καναλιού σε RIS

Προκειμένου να επιτευχθεί υψηλός βαθμός ελέγχου του ασύρματου περιβάλλοντος επικοινωνίας από το RIS, η απόκτηση ακριβούς πληροφορίας CSI στα συστήματα επικοινωνίας που βασίζονται σε RIS είναι αναγκαία, αλλά πρακτικά προκλητική, λόγω των ακόλουθων δύο κύριων αιτιών. Καταρχάς, λόγω της έλλειψης ενεργών στοιχείων για την επεξεργασία του σήματος, τα παθητικά στοιχεία του RIS, που έχουν χαμηλό κόστος, μπορούν μόνο να αντανάκλουν τα εισερχόμενα σήματα, χωρίς τη δυνατότητα να μεταδίδουν/λαμβάνουν πιλοτικά σήματα για την εκτίμηση του καναλιού, όπως κάνουν οι ενεργοί αναμεταδότες σε συμβατικά συστήματα ασύρματης επικοινωνίας. Δεύτερον, το RIS αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό παθητικών στοιχείων τα οποία έχουν διαφορετικούς συντελεστές καναλιού που πρέπει να εκτιμηθούν, με αποτέλεσμα μια σημαντική αύξηση στην επιβάρυνση συστήματος. [1]

#### 3.1.3. Πρακτικός Σχεδιασμός Παθητικής Δέσμησης/Αντανάκλασης σε RIS

Ο βέλτιστος παθητικός σχεδιασμός δέσμησης/αντανάκλασης του RIS εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις διαθέσιμες πληροφορίες CSI, οι οποίες είναι δύσκολο να αποκτηθούν με απόλυτη ακρίβεια. Σε διαφορετικά σενάρια διαθεσιμότητας CSI (π.χ. μη τέλει άμεσο CSI και/ή στατιστικό CSI), η παθητική αντανάκλαση του RIS πρέπει να σχεδιαστεί κατάλληλα σε συνεργασία με τους ενεργούς πομποδέκτες προκειμένου να επιτευχθεί ανθεκτική επικοινωνιακή απόδοση υπό τον περιορισμό των σφαλμάτων του CSI. Πέραν του σχεδιασμού του RIS βασισμένο στο CSI, μια άλλη πρακτική προσέγγιση είναι η σχεδίαση της αντανάκλασης του RIS μέσω παθητικής εκπαίδευσης δέσμης, όπου οι δέσμες επιλέγονται από έναν σχεδιασμένο κώδικα, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για σαφείς πληροφορίες CSI. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση μπορεί να απαιτήσει μεγάλο χρόνο εκπαίδευσης εάν δεν υπάρχουν προηγούμενες πληροφορίες για το CSI, καθώς το RIS πρέπει να αναζητήσει εξαντλητικά μεταξύ μεγάλου αριθμού παθητικών δεσμών λόγω του μεγάλου αριθμού των στοιχείων του. Επιπλέον, διάφορες ρυθμίσεις συστήματος (π.χ. μονός/πολλαπλοί χρήστες, μονό/πολλαπλά RIS, μονή/πολλαπλή κεραία BS/MS, και στενοζωνική/ευρυζωνική επικοινωνία) και σχεδιαστικοί στόχοι (μεγιστοποίηση ρυθμού, ελαχιστοποίηση παρατεταμένης/καθυστερημένης μετάδοσης κ.λπ.) οδηγούν γενικά σε διαφορετικούς σχεδιασμούς αντανάκλασης. [1]

#### 3.1.4. Περιορισμοί και Ατέλειες Υλικού

Το RIS αντιμετωπίζει διάφορους περιορισμούς και ατέλειες στην πράξη, οι οποίοι μπορεί να περιορίσουν τη δυνατότητά του να αντανάκλα τα σήματα, όπως τη διακριτή μετατόπιση φάσης/πλάτους και τη φάση-εξαρτώμενη από το πλάτος των στοιχείων που αντανάκλουν, καθώς και την αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών. Ως εκ τούτου, τόσο η εκτίμηση καναλιού του RIS όσο και η παθητική δέσμηση/αντανάκλασή της πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τα πρακτικά μοντέλα αντανάκλασης που μπορούν να αποτυπώνουν με ακρίβεια τους περιορισμούς και τις ατέλειες/ελαττώματα του υλικού του, ώστε να μεγιστοποιηθούν τα κέρδη της απόδοσής του στην πράξη. [1]

### 3.2.1. Εκτίμηση Καναλιού για Διαφορετικές Αρχιτεκτονικές RIS

Έχει γίνει αναφορά προηγουμένως ότι το RIS αποτελεί τεχνολογία που φαίνεται να κατέχει ελπιδοφόρο μέλλον, αιτιολογημένα, για την αναβάθμιση των αποδόσεων συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας μέσω του προηγμένου ελέγχου του περιβάλλοντος διάδοσης. Είναι ζωτικής σημασίας, για την πλήρη εκμετάλλευση των ικανοτήτων που προσφέρει ένα RIS, η λεπτομερής εκτίμηση του καναλιού για την βελτιστοποίηση της διάταξης του RIS και την ενίσχυση της απόδοσης του συστήματος. Για να ερευνηθεί αυτή η σημαντική πτυχή ενός συστήματος με ενσωματωμένο RIS, θα παρουσιαστούν δύο μέθοδοι εκτίμησης καναλιού, καθεμία κατάλληλη για δύο διαφορετικές αρχιτεκτονικές RIS. Η πρώτη μέθοδος αποκαλείται "Ξεχωριστή Εκτίμηση Καναλιού με Ημι-Παθητικό RIS" και η δεύτερη "Διαδοχική Εκτίμηση Καναλιού με Πλήρως Παθητικό RIS". Στην "Ξεχωριστή Εκτίμηση Καναλιού με Ημι-Παθητικό RIS", το ημι-παθητικό RIS αντιπροσωπεύει μια κατηγορία αρχιτεκτονικής RIS που ενσωματώνει αισθητήρια στοιχεία παράλληλα με τα παθητικά στοιχεία που ανακλούν τα προσπίπτοντα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Ο αριθμός των αισθητήριων στοιχείων είναι σημαντικά μικρότερος συγκριτικά με τον αριθμό των ανακλώμενων στοιχείων. Αυτά τα αισθητήρια στοιχεία δίνουν την δυνατότητα στο ημι-παθητικό RIS να αντλεί και να αναλύει τα προσπίπτοντα σήματα. [1]

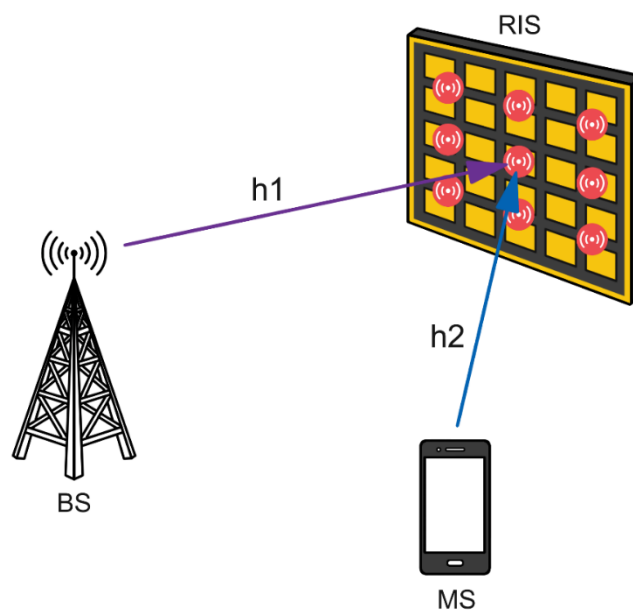
### 3.2.2. Ξεχωριστή Εκτίμηση Καναλιού με το Ημι-παθητικό RIS

Στη μεθοδολογία της ξεχωριστής εκτίμησης καναλιού με την χρήση ημι-παθητικού RIS, τα κανάλια που ενώνουν το RIS με το BS και το RIS με το MS αξιολογούνται ξεχωριστά. Αυτή η διαδικασία ξεκινά με την αξιολόγηση του καναλιού ανάμεσα στο BS και το RIS. Στο στάδιο αυτό, το BS εκπέμπει ένα γνωστό πιλοτικό σήμα προς το RIS με τη χρήση των κεραιών του. Το πιλοτικό σήμα είναι σχεδιασμένο με τρόπο που διευκολύνει τον δέκτη να αξιολογήσει το κανάλι βασιζόμενος στις γνωστές χαρακτηριστικές ιδιότητες του εκπεμπόμενου σήματος. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, τα στοιχεία του RIS διατηρούν ένα σταθερό συντελεστή ανάκλασης, εξασφαλίζοντας την συνέπεια της απόκρισης τους στα προσερχόμενα κύματα. Αυτό καθιστά την εκτίμηση του καναλιού πιο απλή και περιορίζει τα πιθανά σφάλματα που προκαλούνται από το RIS. Το RIS, λαμβάνει το πιλοτικό σήμα, και επεξεργάζεται την πληροφορία για να εξάγει μια εκτίμηση για το κανάλι BS-RIS. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω διαφόρων τεχνικών, όπως το LS, του MMSE ή άλλων προηγμένων μεθόδων εκτίμησης. Στη συνέχεια, το RIS ανακλά το πιλοτικό σήμα προς το MS, διατηρώντας την ίδια ρύθμιση του συντελεστή ανάκλασης όπως κατά την εκτίμηση του καναλιού BS-RIS. Το MS λαμβάνει το σήμα και το επεξεργάζεται για να αξιολογήσει το κανάλι RIS-MS, χρησιμοποιώντας παρόμοιες τεχνικές με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του καναλιού BS-RIS. Με την ανεξάρτητη εκτίμηση των καναλιών BS-RIS και RIS-MS, το συνολικό κανάλι μεταξύ του BS και του MS μπορεί να προκύψει μέσω της συνδυαστικής αξιολόγησης των επιμέρους καναλιών. Με τις εκτιμώμενες πληροφορίες για το κανάλι, μπορούν να εφαρμοστούν αλγόριθμοι βελτιστοποίησης για τον προσδιορισμό της καταλληλότερης διαμόρφωσης του RIS που θα μεγιστοποιεί τις επιθυμητές μετρικές απόδοσης, όπως το SNR, την ενεργειακή απόδοση και την φασματική απόδοση. Με τη βέλτιστη διαμόρφωση του RIS που καθορίζεται με βάση τις ξεχωριστές εκτιμήσεις των καναλιών, το RIS μπορεί τώρα να ελέγχει την φάση των ανακλώμενων σημάτων κατά την επικοινωνία. Αυτό μπορεί να ενισχύσει την απόδοση του ασύρματου συστήματος επικοινωνίας, βελτιώνοντας την ποιότητα της σύνδεσης, την κάλυψη και την χωρητικότητα. Αυτή η προσέγγιση λειτουργεί καλά για το σύστημα αμφίδρομης επικοινωνίας με διαίρεση χρόνου εκμεταλλευόμενη την αμοιβαιότητα του καναλιού για την απόκτηση της Αντίστροφης Πληροφορίας Κατάστασης Καναλιού από το RIS προς το BS ή και τους χρήστες. Ωστόσο, μπορεί να μην είναι εφαρμόσιμο στο σύστημα αμφίδρομης επικοινωνίας με διαίρεση συχνότητας εκτός εάν οι ενεργοί αισθητήρες που μπορούν να μεταδίδουν και να λαμβάνουν πιλοτικά

σύμβολα κάτι που ακυρώνει τον κύριο στόχο του RIS. Για να κρατηθεί χαμηλά το κόστος μπορούν να εγκατασταθούν περιορισμένος αριθμός αισθητήριων συσκευών. [1]

### 3.2.3. Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις

Η ξεχωριστή εκτίμηση καναλιού για ημι-παθητικό RIS προσφέρει μια σειρά από οφέλη. Καταρχάς, επιφέρει απλότητα. Ανεξάρτητα αξιολογώντας τα κανάλια μεταξύ του πομπού και του RIS, καθώς και του RIS και του δέκτη, η συνολική διαδικασία αξιολόγησης των καναλιών γίνεται απλούστερη και ενσωματώνεται εύκολα σε υφιστάμενα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας. Επιπροσθέτως, επιφέρει μείωση της πιθανότητας σφάλματος στην αξιολόγηση. Καθώς το RIS διατηρεί σταθερό συντελεστή ανακλαστικότητας κατά τη διάρκεια της αξιολόγησης των καναλιών, τα ενδεχόμενα σφάλματα που ενδέχεται να εισάγει το RIS ελαχιστοποιούνται, καταλήγοντας σε πιο ακριβείς εκτιμήσεις των καναλιών. Παρ' όλα αυτά, η διαφοροποιημένη αξιολόγηση των καναλιών αντιμετωπίζει κάποιες προκλήσεις. Η πρώτη είναι η αυξημένη επιβάρυνση που σχετίζεται με την εκπαίδευση. Επειδή τα κανάλια πομπού-RIS και RIS-δέκτη αξιολογούνται ανεξάρτητα, η συνολική επιβάρυνση της εκπαίδευσης για την αξιολόγηση των καναλιών μπορεί να αυξηθεί, ενδεχομένως μειώνοντας τη φασματική απόδοση. Η δεύτερη πρόκληση αφορά την περιορισμένη επεκτασιμότητα. Καθώς ο αριθμός των στοιχείων του RIS αυξάνεται, η πολυπλοκότητα της διαδικασίας αξιολόγησης των καναλιών μπορεί να αυξηθεί, καθιστώντας πιο απαιτητική την υλοποίησή της σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. [1]



Εικόνα 3.2.3. Ξεχωριστή εκτίμηση καναλιού με ημι-παθητικό RIS.

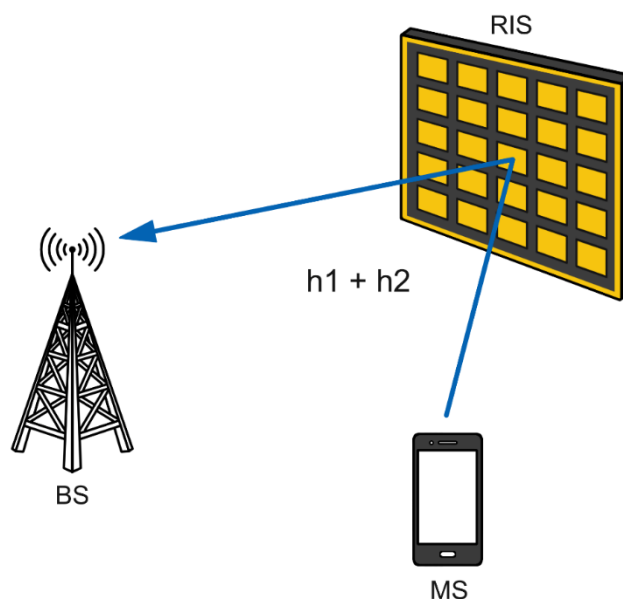
### 3.2.4. Διαδοχική Εκτίμηση Καναλιού με Πλήρως Παθητικό RIS

Τα πλήρως παθητικά RIS είναι μια κατηγορία αρχιτεκτονικών RIS που απαρτίζονται εξολοκλήρου από παθητικά στοιχεία, αντανακλώνοντας μόνο τα εισερχόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Η απλότητα στο σχεδιασμό και η εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με τα ημι-παθητικά RIS καθιστούν αυτήν την κατηγορία ιδιαίτερα ελκυστική για ποικίλες εφαρμογές ασύρματης επικοινωνίας. Όσον αφορά τη διαδικασία εκτίμησης του καναλιού, στην περίπτωση των πλήρως παθητικών RIS ακολουθείται μια προσέγγιση διαδοχικής εκτίμησης. Σε αυτήν την προσέγγιση, το σύνθετο κανάλι ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη, το οποίο συμπεριλαμβάνει την επίδραση των καναλιών BS-RIS και RIS-MS, εκτιμάται απευθείας. Το BS εκπέμπει ένα προκαθορισμένο πιλοτικό σήμα προς το RIS. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, τα στοιχεία του RIS προσαρμόζονται για να ανακλούν τα

εισερχόμενα κύματα με διαφορετικούς συντελεστές ανάκλασης, δηλαδή με διαφορετικές ρυθμίσεις πλάτους και φάσης. Το MS αναλύει το λαμβανόμενο σήμα για να εκτιμήσει το σύνθετο κανάλι ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη, λαμβάνοντας υπόψη την συνδυασμένη επίδραση των καναλιών BS-RIS και RIS-MS. Βασισμένοι στο εκτιμώμενο σύνθετο κανάλι, χρησιμοποιούμε αλγόριθμοι βελτιστοποίησης για να καθορίσουμε την ιδανική διαμόρφωση του RIS που θα μεγιστοποιήσει την επιθυμητή μετρική απόδοσης, όπως το SNR, η ενεργειακή απόδοση ή η φασματική απόδοση. [1]

### 3.2.5. Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις

Η προσέγγιση της διαδοχικής εκτίμησης καναλιού για πλήρως παθητικά RIS φέρει μαζί της αρκετά οφέλη. Από τα πλέον εμφανή, περιλαμβάνεται η μείωση της επιβάρυνσης που σχετίζεται με την εκπαίδευση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, κατά την άμεση εκτίμηση του σύνθετου καναλιού, η επιβάρυνση της εκπαίδευσης ενδέχεται να μειωθεί σημαντικά σε σχέση με ξεχωριστές τεχνικές εκτίμησης καναλιού, ενισχύοντας έτσι τη φασματική απόδοση. Επιπλέον, η δυνατότητα επέκτασης είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας. Από τη στιγμή που το σύνθετο κανάλι εκτιμάται απευθείας, η διαδοχική εκτίμηση καναλιού μπορεί να προσαρμοστεί πιο ευέλικτα σε μεγαλύτερες διαδικασίες RIS, οι οποίες ίσως περιλαμβάνουν πολλά στοιχεία. Παρόλα αυτά, είναι απαραίτητο να λάβουμε υπόψη μας και ορισμένες προκλήσεις που ενδέχεται να προκύψουν. Η αύξηση του σφάλματος εκτίμησης είναι ένας τέτοιος παράγοντας, καθώς τα διάφορα στοιχεία του RIS μπορεί να ρυθμιστούν με διαφορετικούς συντελεστές ανάκλασης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτίμησης καναλιού. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο σφάλμα εκτίμησης σε σύγκριση με την ανεξάρτητη εκτίμηση καναλιού, το οποίο ενδέχεται να επηρεάσει την ακρίβεια του εκτιμώμενου σύνθετου καναλιού. Το πρόβλημα της πολυπλοκότητας αποτελεί επίσης μια ενδεχόμενη πρόκληση. Η διαδοχική εκτίμηση καναλιού απαιτεί την εφαρμογή σύνθετων αλγορίθμων βελτιστοποίησης για τον προσδιορισμό της ιδανικής διαμόρφωσης του RIS, με βάση το εκτιμώμενο σύνθετο κανάλι, κάτι που ενδέχεται να προσφέρει υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα και να είναι δύσκολο στην υλοποίηση. Τόσο η ανεξάρτητη εκτίμηση καναλιού με ημι-παθητικό RIS όσο και η διαδοχική εκτίμηση καναλιού με πλήρως παθητικό RIS παρουσιάζουν τα δικά τους πλεονεκτήματα και προκλήσεις. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εκτίμησης καναλιού θα εξαρτηθεί από την συγκεκριμένη αρχιτεκτονική RIS, την επιθυμητή απόδοση του συστήματος και τους περιορισμούς που ισχύουν για το σενάριο ασύρματης επικοινωνίας. [1]



Εικόνα 3.2.4. Διαδοχική εκτίμηση καναλιού με παθητικό RIS.

### 3.2.6. Σύγκριση/Συνδυασμός Ξεχωριστής και Διαδοχικής Εκτίμησης Καναλιού

Οι προσεγγίσεις ξεχωριστής και διαδοχικής εκτίμησης καναλιού έχουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Μια αρχική σύγκριση έδειξε ότι η διαδοχική εκτίμηση καναλιού έχει υψηλότερη ακρίβεια εκτίμησης με λιγότερο κόστος υλικού και κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, τα λάθη στο CSI και οι συμβιβασμοί κόστους-απόδοσης εξαρτώνται από τεχνικές επεξεργασίας σημάτων, μοντέλα καναλιού, σχέδια εκπαίδευσης και περιορισμούς υλικού. Ο συνδυασμός των δύο μοντέλων εκτιμήσεων, θα μπορούσε να αυξήσει την αποδοτικότητα της εκτίμησης. Για παράδειγμα, το στατικό κανάλι BS-RIS μπορεί να εκτιμηθεί αποτελεσματικά με αισθητήριες συσκευές στο RIS χρησιμοποιώντας την προσέγγιση ξεχωριστής εκτίμησης καναλιού, ενώ τα δυναμικά κανάλια RIS-MS μπορούν να εκτιμηθούν σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας την προσέγγιση διαδοχικής εκτίμησης καναλιού. Αυτή η υβριδική μέθοδος εκτίμησης προσφέρει την δυνατότητα να μειώσει τον πραγματικό χρόνο εκπαίδευσης και να βελτιώσει την εφαρμογή και για τα δύο συστήματα TDD και FDD. Ωστόσο, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση αυτής της προσέγγισης παραμένει ανοικτό πρόβλημα, το οποίο απαιτεί περαιτέρω έρευνα. [1]

### 3.3. Εκτίμηση Καναλιού για Διαφορετικές Εγκαταστάσεις Συστημάτων RIS

Δεδομένου ότι διαφορετικές διατάξεις σε συστήματα που ενσωματώνουν RIS επιβάλλουν γενικά διάφορες απαιτήσεις για CSI, απαιτούνται συνεπώς εξατομικευμένα σχέδια εκτίμησης καναλιών για την επίτευξη υψηλής αποδοτικότητας εκπαίδευσης και ακρίβειας εκτίμησης. [1]

#### 3.3.1. Σύστημα Μονού Χρήστη με Μοναδικό RIS

Σε ένα σύστημα μονού χρήστη με ένα RIS, το αποτελεσματικό κανάλι αποτελείται από την υπερθέτιση των άμεσων και των αντανακλώμενων καναλιών που σχετίζονται με έναν μεγάλο αριθμό στοιχείων του RIS. Το επιπλέον φορτίο εκπαίδευσης για την εκτίμηση του πλήρους CSI του  $\{\vec{h}_n\}_n^N = 1$  είναι γενικά ανάλογο με τον αριθμό των αντανακλούμενων στοιχείων  $N$ , οδηγώντας σε μεγάλη καθυστέρηση εκτίμησης. Για τη μείωση του φορτίου εκπαίδευσης στο σύστημα, τα υπάρχοντα έργα για την εκτίμηση του καναλιού μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε SISO, MISO και MIMO. Προηγούμενες έρευνες έχουν αντιμετωπίσει το πρόβλημα εκτίμησης του καναλιού RIS υπό τα SISO και MISO, όπου το άμεσο/συνδυασμένο CSI εκτιμήθηκε σε μία ή πολλές κεραίες του BS ανεξάρτητα, βασισμένο στο πρότυπο αντανάκλασης εκπαίδευσης RIS και στα πιλοτικά σήματα που στάλθηκαν από τον μοναδικό χρήστη με μία κεραία. Ωστόσο, αυτά τα σχήματα εκτίμησης του καναλιού RIS δεν μπορούν να επεκταθούν αποτελεσματικά στην πιο γενική διάρθρωση MIMO, καθώς τα πιλοτικά σήματα από πολλαπλές κεραίες εκπομπής είναι περίπλοκα συνδεδεμένα σε πολλαπλές κεραίες λήψης. Διάφορα σχήματα εκτίμησης του διαδοχικού καναλιού βασισμένα στη συμπεριλαμβανόμενη αίσθηση προτάθηκαν για το σύστημα MIMO που υποστηρίζεται από RIS, και η βαθιά μάθηση έχει εμφανιστεί ως μια υποσχόμενη μέθοδος για την εκμάθηση του απευθείας/συνδυασμένου CSI αποτελεσματικά από πιλότους/δεδομένα στα συστήματα MISO και MIMO. Η παραγοντοποίηση/αποσύνθεση μητρώων χρησιμοποιήθηκε για τη μείωση της υψηλής διαστατικότητας του συνδυασμένου καναλιού MIMO, διευκολύνοντας την εκτίμηση του καναλιού. [1]

Όπως προαναφέρθηκε, το τελικό κανάλι είναι η υπέρθεση του άμεσου καναλιού και των ανακλώμενων καναλιών που σχετίζονται με έναν μεγάλο αριθμό στοιχείων RIS. Ειδικότερα, για την περίπτωση ενός χρήστη με  $K = 1$  (όπου ο δείκτης χρήστη  $k$  παραλείπεται χωρίς να προκαλεί σύγχυση), το διαδοχικό κανάλι μπορεί να επεκταθεί ως  $\vec{H} \triangleq [\vec{h}_1, \vec{h}_2, \dots, \vec{h}_n]$ , και έτσι το ληφθέν σήμα στο BS μπορεί να εκφραστεί ως:

$$y_B^{(t)} = \sqrt{P_u} \left( (x^{(t)})^T \otimes I_{MB} \right) \vec{H} \theta^{(t)} + V_B^{(t)}$$



$$y_B^{(t)} = \sqrt{P_u} \left( (x^{(t)})^T \otimes I_{MB} \right) \left( \sum_{n=1}^N \vec{h}_n \theta_n^{(t)} \right) + V_B^{(t)}$$

Βασιζόμενοι στην εξίσωση, το συνολικό κόστος εκπαίδευσης για την επίλυση του πλήρους CSI των  $\{\vec{h}_n\}_n^N = 1$  είναι γενικά ανάλογο με τον αριθμό των ανακλαστικών στοιχείων  $N$  και έτσι μπορεί να προκαλέσει μεγάλη καθυστέρηση. Ως εκ τούτου, το πώς θα μειωθεί αποτελεσματικά το συνολικό κόστος εκπαίδευσης για το σύστημα ενός χρήστη με την υποστήριξη του RIS αποτελεί ένα κρίσιμο πρόβλημα. [1]

Ας αναλύσουμε την εξίσωση:

- $y_B^{(t)}$ : Αντιπροσωπεύει το λαμβανόμενο σήμα τη στιγμή  $t$ .
- $P_u$ : Υποδηλώνει την ισχύ μετάδοσης του σήματος του χρήστη.
- $x^{(t)}$ : Χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει το μεταδιδόμενο σήμα τη στιγμή  $t$ .
- $I_{MB}$ : Υποδηλώνει τον αριθμό των στοιχείων.
- $\vec{H}\theta^{(t)}$ : Αντιπροσωπεύει την διαδρομή του καναλιού τη στιγμή  $t$ . Το  $\theta(t)$  δείχνει ότι οι συνθήκες του καναλιού αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου.
- $V_B^{(t)}$ : Αντιπροσωπεύει τον θόρυβο στο σύστημα τη στιγμή  $t$ .
- $\otimes$ : Το σύμβολο αυτό χρησιμοποιείται για να δηλώσει το γινόμενο Kronecker, μια μορφή πολλαπλασιασμού πίνακα.

### 3.3.2. Σύστημα Πολλαπλών Χρηστών με Μοναδικό RIS

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό αυτού του συστήματος είναι ότι όλοι οι χρήστες μοιράζονται το ίδιο κανάλι BS-RIS στα αντίστοιχα διαδοχικά κανάλια BS-RIS-MS. Αυτό το κοινό χαρακτηριστικό των καναλιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της εκτίμησης καναλιού BS-RIS-MS. Ακόμα αξίζει να σημειωθεί ότι η εκτίμηση του BS-RIS θα είναι απλούστερη αφού είναι τυπικά κατάσταση χαμηλής αλλαγής, το διαδοχικό κανάλι μπορεί να επεκταθεί ως  $\vec{H} \triangleq [\vec{h}_1, \vec{h}_2, \dots, \vec{h}_n]$ , και έτσι το ληφθέν σήμα στο BS μπορεί να εκφραστεί ως:

$$y_B^{(t)} = \sqrt{P_u} \left( (x^{(t)})^T \otimes I_{MB} \right) \vec{H}_k \theta^{(t)} + V_B^{(t)}$$

Η εξίσωση είναι παρόμοια με την παραπάνω με την μόνη διαφορά το  $K=1, \dots, N$ . Κατά συνέπεια, ο χρόνος εκπαίδευσης που προκύπτει θα κλιμακώνεται με τον αριθμό των χρηστών και μπορεί να γίνει πρακτικά απαράδεκτος εάν ο αριθμός των χρηστών  $K$  είναι μεγάλος. [1]

### 3.3.3. Διπλό/Πολλαπλό Σύστημα RIS

Σε ένα σύστημα με διπλό RIS, ένα πρόσθετο RIS (RIS 2) εγκαθίσταται κοντά στο BS μαζί με την συμβατική μονό RIS (RIS 1) κοντά στο MS. Αυτό εισάγει νέες προκλήσεις στην εκτίμηση του καναλιού. Το κανάλι μεταξύ ενός MS και του BS σε αυτό το σύστημα αποτελείται από την υπερκάλυψη του διπλού ανακλαστικού συνδέσμου, των δύο μονών ανακλαστικών συνδέσμων και του άμεσου συνδέσμου. Το κανάλι μεταξύ των RIS 1 και RIS 2 παίζει επίσης έναν ρόλο στο σύστημα. Οι σύνθετα συνδεδεμένοι σύνδεσμοι που βασίζονται στην RIS με διαφορετικούς αριθμούς ανακλαστικών σημάτων απαιτούν την εκτίμηση πολλαπλών συντελεστών καναλιού, καθιστώντας τις υφιστάμενες τεχνικές για την εκτίμηση καναλιού σε μονό RIS μη εφαρμόσιμες. [1]

### 3.3.4. Ευρυζωνικό Σύστημα με Μοναδικό RIS

Σε ευρυζωνικά συστήματα, όπως τα σύγχρονα ασύρματα συστήματα που βασίζονται συνήθως στην τεχνολογία OFDM, το RIS είναι ζωτικής σημασίας για την ενίσχυση της επικοινωνίας. Ωστόσο, η εκτίμηση του καναλιού σε συστήματα ευρυζωνικής επικοινωνίας που ενσωματώνουν RIS είναι

σύνθετη λόγω της συνελκτικής τους φύσης, σε αντίθεση με τα συστήματα στενής ζώνης. Το κανάλι που δημιουργείται από τη συνέλιξη των καναλιών BS-RIS και RIS-MS, επηρεασμένο από τον συντελεστή ανακλαστικότητας του RIS και με τα πολλαπλά εφέ διαδρομών, απαιτεί εκτίμηση περισσότερων συντελεστών καναλιού, καθιστώντας τις παραδοσιακές μεθόδους εκτίμησης στενής ζώνης αναποτελεσματικές. Συνεπώς, υπάρχει ανάγκη για πιο αποτελεσματικές λύσεις για την εκτίμηση καναλιού σε ευρυζωνικά συστήματα που υποστηρίζονται από RIS. [1]

### 3.4. Μέθοδοι Επεξεργασίας Σήματος για Εκτίμηση Καναλιού σε RIS

Έχουν αφιερωθεί σημαντικές προσπάθειες έρευνας για τον σχεδιασμό αποτελεσματικών αλγορίθμων εκτίμησης καναλιού με βάση διάφορες μεθόδους επεξεργασίας σημάτων, όπως οι μέθοδοι LS/MMSE, η συμπίεσμένη αίσθηση, η παραγοντοποίηση μητρώων και η βαθιά μάθηση. [1]

#### 3.4.1. Κλασσικές Μεθόδους Εκτίμησης

Σε συστήματα που ενσωματώνουν RIS, οι δύο μέθοδοι εκτίμησης LS και MMSE μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του διαδοχικού καναλιού. Για να διασφαλιστεί η εφικτότητα αυτών των μεθόδων εκτίμησης και να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα εκτίμησης του καναλιού, το πρότυπο αντανάκλασης της εκπαίδευσης και η ακολουθία των πιλοτικών συμβόλων πρέπει να σχεδιαστούν προσεκτικά. Επιπλέον το πρότυπο μοτίβο εκπαίδευσης ON/OFF υιοθετήθηκε στο RIS για να διευκολύνει την εκτίμηση. Ειδικότερα, το απευθείας κανάλι BS-MS εκτιμάται αρχικά χρησιμοποιώντας συμβατικές μεθόδους με όλα τα στοιχεία του RIS στην κατάσταση OFF. Στη συνέχεια, το διαδοχικό κανάλι BS-RIS-MS εκτιμάται με την εναλλαγή των στοιχείων του RIS σε κατάσταση ON (και με τα υπόλοιπα σε κατάσταση OFF) διαδοχικά στον χρόνο. Αυτή η προσέγγιση είναι απλή για την εφαρμογή. Ωστόσο, το μοτίβο εκπαίδευσης ON/OFF υποφέρει από σημαντική απώλεια λόγω αντανάκλασης και την παρεμβολή από το απευθείας κανάλι και τα δύο από τα οποία υποβαθμίζουν την ακρίβεια της εκτίμησης του καναλιού. Για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα, αναπτύχθηκε αργότερα το μοτίβο πλήρους ενεργοποίησης του RIS για εκπαίδευση, όπου όλα τα αντανάκλαστικά στοιχεία του είναι ενεργοποιημένα καθόλη τη διάρκεια ολόκληρου του χρόνου εκπαίδευσης. [1]

#### 3.4.2. Συμπίεσμένη Αίσθηση

Σε συστήματα που λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες, όπως το mmWave και το THz, υπάρχουν μόνο ένας περιορισμένος αριθμός διαδρομών διασποράς μεταξύ του BS και του RIS ή MS, λόγω της σοβαρής εξασθένησης και των απωλειών λόγω των εμποδίων. Ως αποτέλεσμα, τα κανάλια που σχετίζονται με το RIS παρουσιάζουν ισχυρή αραιότητα χαμηλή κατάταξη στον χωρικό/γωνιακό τομέα, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί για τη μείωση του επιπλέον φόρτου εκπαίδευσης. Η αραιότητα των καναλιών μπορεί να αξιοποιηθεί με την Συμπίεσμένη Αίσθηση για την αποκατάσταση του CSI από έναν περιορισμένο αριθμό μετρήσεων. Αυτό είναι ιδιαίτερα ευεργετικό στα συστήματα που υποστηρίζονται από το RIS, όπου ο αριθμός των στοιχείων του RIS μπορεί να είναι πολύ μεγάλος. [1]

#### 3.4.3. Παραγοντοποίηση/Αποσύνθεση Μητρώων

Σε σύγκριση με το πρόβλημα εκτίμησης γραμμικού καναλιού σε συμβατικά συστήματα χωρίς RIS, το πρόβλημα εκτίμησης δισδιάστατου καναλιού είναι γενικά δυσκολότερο να λυθεί λόγω του διαδοχικού καναλιού υψηλής διάστασης. Μια στρατηγική για να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία είναι να αποσυνθέσουμε το διαδοχικό κανάλι υψηλής διάστασης σε μια σειρά υποκαναλιών χαμηλότερης διάστασης που είναι πιο εύκολο να εκτιμηθούν με χαμηλότερο φορτίο εκπαίδευσης. Εδώ είναι όπου η παραγοντοποίηση μητρώων χρησιμεύει. Ωστόσο, ένα κύριο ζήτημα στην παραγοντοποίηση μητρώων είναι η ασάφεια της κλίμακας για την επίλυση του καναλιού BS-RIS και του καναλιού RIS-MS. Αυτό σημαίνει ότι βάσει του ληφθέντος σήματος, δεν είναι δυνατόν να επιλυθεί μοναδικά το κανάλι BS-RIS και το κανάλι RIS-MS με ξεχωριστό τρόπο. [1]

### 3.4.4. Βαθιά Μάθηση

Ο σχεδιασμός της παθητικής διαμόρφωσης δέσμης αποτελεί μια δύσκολη εργασία λόγω της υψηλής διαστατικότητας του προβλήματος. Οι παραδοσιακές μέθοδοι βελτιστοποίησης μπορεί να μην είναι αποτελεσματικές ή ακόμη και εφικτές για αυτήν την εργασία, ειδικά όταν ο αριθμός των στοιχείων του RIS είναι μεγάλος. Εδώ είναι όπου η Βαθιά Μάθηση βοηθάει, εκπαιδεύοντας ένα βαθύ νευρωνικό δίκτυο την βέλτιστη παθητική διαμόρφωση δέσμης. Ωστόσο, η απόδοση της παθητικής διαμόρφωσης δέσμης στην πράξη δεν καθορίζεται απλώς από τη θέση του χρήστη, αλλά και από άλλες παραμέτρους όπως η μικρή κλίμακας ξαφνική αλλαγή, που δεν μπορεί να χαρακτηριστεί πλήρως από τις τοποθεσίες του πομπού και του δέκτη. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, μπορούν εκμεταλλευτούν τα ληφθέντα πιλοτικά σύμβολα. Όλη αυτή η διαδικασία μειώνει ιδιαίτερα το κόστος εκπαίδευσης. [1]

### 3.5. Σχεδιασμός Παθητικής Δέσμης RIS με Πρακτικό CSI

Η παθητική διαμόρφωση/ανάκλαση του RIS μπορεί να βελτιστοποιηθεί με τη χρήση τεχνικών εκτίμησης καναλιού, αλλά η απόκτηση τέλει CSI είναι δύσκολη λόγω παραγόντων όπως η γήρανση του καναλιού, ο περιορισμένος εκπαιδευτικός χρόνος και η παρεμβολή θορύβου. Οι μελέτες έχουν διερευνήσει τον πρακτικό σχεδιασμό παθητικής διαμόρφωσης/ανάκλασης του RIS, λαμβάνοντας υπόψη ατελές CSI και στατιστικό/υβριδικό CSI. Άλλη γραμμή έρευνας στοχεύει στην παράκαμψη της εκτίμησης καναλιού μέσω της χρήσης παθητικής εκπαίδευσης δέσμης και τεχνικών βαθιάς μάθησης. [1]

#### 3.5.1.1. Σχεδιασμός Παθητικής Δέσμης RIS με Ατελές CSI

Υπάρχουν δύο ευρέως διαδεδομένα μοντέλα για τον χαρακτηρισμό του σφάλματος CSI λόγω της ατελούς εκτίμησης του καναλιού: το ντετερμινιστικό μοντέλο και το στοχαστικό μοντέλο. Το ημι-παθητικό RIS χρησιμοποιείται για να εκτιμήσει τα κανάλια ξεχωριστά, ενώ η πλήρως παθητική RIS εκτιμά το συνολικό κανάλι BS-RIS-χρήστη. Στο ντετερμινιστικό μοντέλο, το norm του σφάλματος CSI υποτίθεται ότι είναι ανώτερο από ένα σύνολο ντετερμινιστικών τιμών, εξασφαλίζοντας τη χειρότερη επίδοση μιας δεδομένης συνάρτησης χρησιμότητας, ανάμεσα σε όλα τα δυνατά CSI. Αντίθετα, το στοχαστικό μοντέλο μοντελοποιεί το σφάλμα CSI ως μια τυχαία μεταβλητή, εξασφαλίζοντας τη μη διακοπή λειτουργίας ενός δεδομένου στόχου χρησιμότητας. Η κύρια πρόκληση στον σχεδιασμό βρίσκεται στην επίτευξη ενός ανθεκτικού σχεδίου παθητικής δέσμης που εξυπηρετεί έναν άπειρο αριθμό δυνατών CSI, είτε στη χειρότερη περίπτωση είτε στην πιθανοτική έννοια. Το ανώτατο όριο και η διακύμανση του σφάλματος CSI αποτυπώνουν την αβεβαιότητα του CSI στα πρώτα και δεύτερα μοντέλα αντίστοιχα. Αυτά τα δύο μοντέλα σφάλματος CSI μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε πηγή σφαλμάτων CSI, εφόσον το ανώτατο όριο ή η διακύμανση τους μπορεί να καθοριστεί ορθά. [1]

#### 3.5.1.2. Ντετερμινιστικό Μοντέλο

Έχει προταθεί μια προσέγγιση βαθιάς ντετερμινιστικής πολιτικής κλίσης για τον σχεδιασμό ανθεκτικής δέσμης σε ένα σύστημα MISO μονού χρήστη με τη βοήθεια ενός RIS. Στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της ισχύος εκπομπής ενός BS εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα και τη χειρότερη περίπτωση ανακλώμενης και ανακτηθείσας ισχύος σήματος για το RIS, βελτιστοποιώντας τις φάσεις και τα πλάτη των ανακλάσεων του. Έχουν γίνει έρευνες για διάφορα συστήματα όπως ένα σύστημα MISO mmWave με ασφάλεια υπό το γεωμετρικό μοντέλο καναλιού προτείνοντας ένα βελτιωμένο αλγόριθμο AO βασισμένο σε ποινή για την αντιμετώπιση προβλημάτων μη σύγκλισης, ένα γνωστικό δίκτυο MISO και μία ανθεκτική ενεργή και παθητική διαμόρφωση δέσμης σε έναν δευτερεύοντα πομπό και πολλαπλά RIS υπό το ατελές CSI σε συνδέσεις που σχετίζονται με πρωτεύοντες χρήστες. Ο σχεδιασμός δέσμης για την ασφάλεια έχει αποκτήσει σημαντική προσοχή στη βιβλιογραφία, με μελέτες που επικεντρώνονται σε συστήματα MISO πολλαπλών RIS με πομπούς υποκλοπής και ατελής CSI σε συνδέσεις RIS-υποκλοπέων. Βρέθηκε ότι η χρήση του RIS βελτιώνει τη σχέση μεταξύ του ποσοστού μυστικότητας και της ενεργειακής απόδοσης ακόμη και με αβεβαιότητα στο CSI. Ο ανθεκτικός σχεδιασμός δέσμης στο ντετερμινιστικό μοντέλο έχει μελετηθεί εκτενώς σε διάφορα σενάρια,

δείχνοντας ότι η παθητική διαμόρφωση δέσμης μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση του ασύρματου συστήματος σε σύγκριση με παραδοσιακά συστήματα χωρίς RIS ή μη ανθεκτικά σχέδια που παραβλέπουν το σφάλμα CSI. [1]

### 3.5.1.3. Στοχαστικό Μοντέλο

Ο σχεδιασμός παθητικής δέσμης κάτω από το στοχαστικό μοντέλο είναι λιγότερο μελετημένος σε σχέση με τον ομόλογό του στο ντετερμινιστικό μοντέλο λόγω των πιο δύσκολων πιθανοτικών περιορισμών που εμπλέκονται. Ερευνητές έχουν προτείνει ένα αυτόματο κωδικοποιητή βασισμένο σε DNN και σχεδίασαν τη συνάρτηση ενεργοποίησης, τη συνάρτηση απώλειας και την επιλογή χαρακτηριστικών για τη βελτιστοποίηση της παθητικής δέσμης. Η προτεινόμενη προσέγγιση επιτυγχάνει συγκρίσιμη απόδοση με το SDR και καλή αντοχή ενάντια σε διάφορους τύπους σφαλμάτων CSI. Στην πιο γενική διάταξη του συστήματος, διάφορες μέθοδοι κυρτής προσέγγισης έχουν εφαρμοστεί για να χαλαρώσουν τις περίπλοκες πιθανοτικές συναρτήσεις στόχου ή περιορισμούς στα προβλήματα σχεδιασμού τους, κοινά με τις πρότυπες τεχνικές AO και SDR. Ένας τρόπος που έχει προταθεί είναι με ένα νέο αλγόριθμο κατεσταλμένης κυρτής προσέγγισης για να αντιμετωπίσουν τη δυσκολία λόγω της πιθανότητας διακοπής, εξασφαλίζοντας τη μη διακοπή λειτουργίας όλων των χρηστών. Ακόμα έχει προταθεί η εφαρμογή μιας διαφορετικής τεχνικής της ανισότητας Bernstein ή του κεντρικού θεωρήματος ορίου για να προσεγγίσουν τους πιθανοτικούς περιορισμούς διακοπής, εξασφαλίζοντας τη μη διακοπή λειτουργίας όλων των χρηστών. Εκτός από τα συστήματα πολυπλεκτικής εκπομπής MISO, έχει διερευνηθεί ο ανθεκτικός σχεδιασμός παθητικής δέσμης στο δίκτυο κογνιτιβής ραδιοφωνίας MISO με πολλαπλούς SUs και έναν μόνο PU. Χρησιμοποιείται ο περιορισμός σφαίρας για την παραγωγή ενός διαχειρίσιμου ανώτατου ορίου στην πιθανότητα διακοπής και επιλύθηκε το προσεγγιστικό πρόβλημα μέσω της μεθόδου AO. Βρέθηκε λοιπόν ότι όταν η αβεβαιότητα CSI είναι υψηλή, περισσότερη ισχύς πρέπει να διατίθεται στον τεχνητό θόρυβο αντί για το σήμα πληροφοριών του χρήστη. [1]

### 3.5.2. Σχεδιασμός Παθητικής Δέσμης RIS με Στατιστικό/Υβριδικό CSI

Ο σχεδιασμός παθητικής δέσμης RIS με στατιστικό/υβριδικό CSI έχει εξεταστεί για την ισορροπία της αντίθεσης μεταξύ της επιβάρυνσης της εκτίμησης του καναλιού και της απόδοσης του συστήματος. Το στατιστικό CSI στοχεύει στη μακροπρόθεσμη απόδοση, απαιτώντας μόνο τα στατιστικά στοιχεία των καναλιών, όπως διανομές, μέσες τιμές και δεύτερες στιγμές, τα οποία μεταβάλλονται πιο αργά από το άμεσο CSI. Αυτό εξοικονομεί χρόνο εκπαίδευσης αλλά θυσιάζει την απόδοση πραγματικού χρόνου λόγω της έλλειψης άμεσου CSI. Το υβριδικό CSI, εκμεταλλευόμενο τόσο το στατιστικό όσο και την άμεσο CSI, βελτιστοποιεί τον κοινό σχεδιασμό παθητικής δέσμης BS και RIS για την μεγιστοποίηση της μέσης χρησιμότητας πάνω στο στατιστικό CSI αλλά προϋποθέτοντας το διαθέσιμο άμεσο CSI. Μια εναλλακτική στρατηγική είναι η διαμόρφωση παθητικής δέσμης δύο χρονικών κλιμάκων, όπου η παθητική δέσμη του RIS σχεδιάζεται μακροπρόθεσμα με βάση το στατιστικό CSI σε όλους τους συνδέσμους, ενώ η ενεργή παθητική δέσμη του BS προσαρμόζεται δυναμικά με βάση τα αποτελεσματικά του κανάλια με όλους τους χρήστες σε πραγματικό χρόνο. Αυτά τα προβλήματα βελτιστοποίησης οδηγούν σε προκλήσεις για τη στοχαστική βελτιστοποίηση, τα οποία είναι γενικά πιο δύσκολο να λυθούν σε σύγκριση με τον σχεδιασμό παθητικής δέσμης υπό το τέλειο CSI ή το ατελές CSI με ντετερμινιστικά σφάλματα. [1]

#### 3.5.2.1. Στατιστικό CSI

Έχουν μελετηθεί βελτιστοποιήσεις για το μακροπρόθεσμο σχεδιασμό παθητικής δέσμης του RIS για τη μεγιστοποίηση της πιθανότητας κάλυψης σε ένα σύστημα πολλαπλών RIS μονού χρήστη SISO υπό το μοντέλο καναλιού Rayleigh. Διαπιστώθηκε ότι η συσχέτιση καναλιού ανάμεσα σε διάφορα στοιχεία του RIS μπορεί να ενισχύσει την πιθανότητα κάλυψης. Επίσης, εξετάστηκε ο κοινός μακροπρόθεσμος σχεδιασμός ενεργής και παθητικής δέσμης στο σύστημα μετάδοσης μονού χρήστη MISO κάτω από το μοντέλο καναλιού Rician-fading, λαμβάνοντας ένα σφιχτό ανώτατο όριο της εργοδικής χωρητικότητας. Συνεκτίμησαν επίσης την παρουσία ενός συν-καναλιού BS και εξέτασαν τον

αντίστοιχο μακροπρόθεσμο σχεδιασμό παθητικής δέσμης του RIS. Οι ερευνητές επίσης βελτιστοποίησαν τον κοινό μακροπρόθεσμο ενεργό και παθητικό σχεδιασμό δέσμης στο σύστημα MIMO μετάδοσης μονού χρήστη που υποστηρίζεται από RIS, επικεντρωμένοι στην εργοδική του χωρητικότητα. Χρησιμοποίησαν τη θεωρία τυχαίου πίνακα και τη μέθοδο αντιγραφής για να παράγουν μια μεγάλης κλίμακας προσέγγιση της εργοδικής χωρητικότητας. Συνέχισαν να εξετάζουν ένα πιο πρακτικό μοντέλο διπλής διάχυσης καναλιού για να λάβουν υπόψη την ελλιπή τάξη και τη χωρική συσχέτιση σε συστήματα ασύρματης επικοινωνίας που υποστηρίζονται από RIS. Οι ερευνητές εξέτασαν επίσης το μακροπρόθεσμο σχεδιασμό δέσμης κάτω από άλλες ρυθμίσεις συστημάτων, όπως το κανάλι παρεμβολής και την ασφάλεια του φυσικού στρώματος. Βελτιστοποίησαν τον μακροπρόθεσμο σχεδιασμό παθητικής δέσμης στο κανάλι παρεμβολής SISO χρησιμοποιώντας τον γενετικό αλγόριθμο, επιτυγχάνοντας εγγύτητα στη βέλτιστη απόδοση. Μεγιστοποίησαν επίσης τον εργοδικό μυστικό ρυθμό ενός ασφαλούς συστήματος επικοινωνίας MIMO με εμποδισμένο απευθείας σύνδεσμο BS-χρήστη/κατασκοπού και στατιστική CSI σε συνδέσμους που σχετίζονται με το RIS. [1]

### 3.5.2.2. Υβριδικό CSI

Το υβριδικό CSI (συνδυασμένο στιγμιαίο και στατιστικό CSI) είναι μια τεχνική που στοχεύει στη μεγιστοποίηση της μέσης ωφέλειας του συστήματος βάσει του στατιστικού CSI σε ένα υποσύνολο των συνδέσεων. Έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι για την αντιμετώπιση στοχαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης, όπως την κατάβαση συντονισμού μπλοκ, τη βελτιστοποίηση ομοιοπάθειας, τη διαχωριστική ποινή και την τεχνική μεγιστοποίησης-ελαχιστοποίησης. Έχει επίσης διερευνηθεί ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης του εργοδικού ποσοστού μυστικότητας σε ένα ασφαλές σύστημα MISO χρησιμοποιώντας την ανισότητα του Jensen και έναν αλγόριθμο προσέγγισης διπλής καμπύλης ποινής. Έχουν εξετασθεί επίσης η διαμόρφωση ενεργητικής και παθητικής δέσμης δύο χρόνων, επικεντρώνοντας στο σύστημα MISO μονού χρήστη με τη βοήθεια του RIS, δύο προσεγγίσεις με βάση τη βαθιά μάθηση, και διαμόρφωση ενεργητικής/παθητικής δέσμης στο BS/RIS σε ένα σύστημα MISO mmWave βάσει του γεωμετρικού μοντέλου καναλιού. Έχουν προταθεί προηγμένοι αλγόριθμοι όπως η τεχνική βαθιάς ανάπτυξης και το στοχαστικό SCA δύο χρόνων για την επίλυση προβλημάτων παρεμβολής μεταξύ χρηστών. Ο σχεδιασμός του υβριδικού CSI ισορροπεί ευέλικτα το συμβιβασμό μεταξύ απόδοσης και επιβάρυνσης, αλλά απαιτεί μια χειριστική προσέγγιση στη ωφέλεια του συστήματος και μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στη βελτιστοποίηση. Ορισμένες μελέτες απλοποίησαν το σχεδιασμό διαμόρφωσης δέσμης δύο χρόνων λαμβάνοντας υπόψη υποβέλτιστη ενεργητική διαμόρφωση δέσμης, που επηρεάζεται από απώλεια απόδοσης, ενώ άλλες ανέπτυξαν πιο περίπλοκους αλγορίθμους για την αντιμετώπιση αυτής της δυσκολίας. [1]

### 3.5.3. Σχεδιασμός Παθητικής Δέσμης RIS χωρίς Ρητό CSI

#### 3.5.3.1. Εκπαίδευση Δέσμης και Παρακολούθηση Καναλιών

Η εκπαίδευση δέσμης είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για τα συστήματα επικοινωνίας που ενσωματώνουν RIS με αραιά κανάλια, όπως στις υψηλής συχνότητας ζώνες. Στοχεύει στην επιλογή της καλύτερης δέσμης του RIS από ένα προκαθορισμένο βιβλίο κωδικών, που οδηγεί στην ισχυρότερη ισχύ σήματος στον δέκτη. Η διαδοχική εκπαίδευση μεμονωμένης δέσμης είναι η πιο απλή μέθοδος αλλά προκαλεί υψηλή επιβάρυνση εκπαίδευσης λόγω του μεγάλου αριθμού των στοιχείων του RIS. Μπορεί να εφαρμοστεί μια ιεραρχική μέθοδος εκπαίδευσης δέσμης για τη μείωση της επιβάρυνσης της εκπαίδευσης, αλλά απαιτεί συχνή ανατροφοδότηση από τους χρήστες για να βελτιώσει την επιλογή δέσμης. Ακόμα έχουν προταθεί νέες μέθοδοι εκπαίδευσης δέσμης, συμπεριλαμβανομένης μιας νέας μεθόδου εκπαίδευσης πολλαπλών δεσμών, τυχαίας εκπαίδευσης δέσμης και ενός καταναμημένου σχήματος εκπαίδευσης δεσμών. Αυτές οι μέθοδοι μειώνουν την επιβάρυνση της εκπαίδευσης για τα συστήματα πολλαπλών χρηστών που ενσωματώνουν RIS και βελτιώνουν τη συνολική απόδοση του συστήματος. Τα κανάλια RIS/BS-MS σε ασύρματα συστήματα είναι γενικά δυναμικά και συσχετισμένα στο χρόνο λόγω της κινητικότητας των χρηστών. Για να αποφύγουν τη συχνή εκπαίδευση, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι παρακολούθησης καναλιού/δέσμης. Αυτές οι μέθοδοι

μπορούν να χωριστούν σε τρεις κύριες κατηγορίες: ο αλγόριθμος βασισμένος στο εκτεταμένο φίλτρο Kalman, η παρακολούθηση καναλιού με βάση την εκτίμηση ταχύτητας, και η μέθοδος εκπαίδευσης δέσμης με μικρή λίστα. Ο αλγόριθμος που βασίζεται στο εκτεταμένο φίλτρο Kalman μοντελοποιεί τα κανάλια του RIS σε γειτονικές χρονικές θέσεις χρησιμοποιώντας την διαδικασία Markov, αλλά αντιμετωπίζει πιθανή ασυμφωνία δεσμών λόγω του μεγάλου αριθμού των στοιχείων ανάκλασης του RIS. Η παρακολούθηση καναλιού με βάση την εκτίμηση ταχύτητας εκτιμά τη γωνιακή ταχύτητα του χρήστη και προβλέπει την AoA/AoD του RIS-χρήστη για τον σχεδιασμό της παθητικής δέσμης του RIS. Η μέθοδος εκπαίδευσης δέσμης με μικρή λίστα επιλέγει έναν μικρό αριθμό ζευγαριών δεσμών υποψηφίων για γρήγορη εκπαίδευση, αλλά μπορεί να προκαλέσει υψηλή επιβάρυνση εκπαίδευσης σε περιπτώσεις πολλαπλών χρηστών. [1]

### 3.5.3.2. Σχεδιασμός Ανάκλασης με Βάση τη Βαθιά Μάθηση

Η παθητική διαμόρφωση δέσμης του RIS βασισμένη στην βαθιά μάθηση έχει χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό χωρίς ρητό CSI, εκμεταλλεύοντας τα πλεονεκτήματά της στη μάθηση της μη γραμμικής απεικόνισης από τα δεδομένα εκπαίδευσης. Ωστόσο, αυτή η διφασική μέθοδος σχεδιασμού μπορεί να μην είναι αποτελεσματική για τα ασύρματα συστήματα που υποστηρίζονται από RIS λόγω των περιορισμών της, όπως την ελαχιστοποίηση του σφάλματος εκτίμησης καναλιού, που προκαλεί διάδοση σφάλματος, και έχει υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα. Μια εναλλακτική προσέγγιση, η εκπαίδευση αντανάκλασης από άκρο σε άκρο, έχει προταθεί για την άμεση μάθηση του σχεδιασμού της παθητικής δέσμης χωρίς εκτίμηση/μάθηση καναλιού. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί τις πληροφορίες τοποθεσίας του χρήστη για να μάθει άμεσα τη βέλτιστη παθητική δέσμη του RIS σε εσωτερικό περιβάλλον. Δημιουργείται μια βάση δεδομένων αποτυπωμάτων για τη συλλογή του βέλτιστου παθητικού σχεδιασμού δέσμης σε προκαθορισμένες τοποθεσίες χρηστών, και εκπαιδεύεται ένα DNN για τη μάθηση της απεικόνισης από την τοποθεσία του χρήστη στην βέλτιστη παθητική δέσμη του RIS. Η απόδοση του στην πράξη καθορίζεται όχι μόνο από την τοποθεσία του χρήστη, αλλά και από άλλες παραμέτρους, όπως η μικρή κλίμακα εξασθένηση. Ακόμα υποστηρίζεται η εκμετάλλευση των λαμβανόμενων πιλότων για τη μάθηση του βέλτιστου σχεδιασμού παθητικής δέσμης για συστήματα με έναν χρήστη χρησιμοποιώντας την μέθοδο βελτιστοποίησης BCD για την απόκτηση των δεδομένων εκπαίδευσης. Τα αριθμητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι αυτή η μέθοδος μπορεί να επιτύχει υψηλότερο ρυθμό από την εκτίμηση καναλιού LS, καθώς μαθαίνει άμεσα τα χαρακτηριστικά του καναλιού από το σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική του DNN που είναι ανεξάρτητη της αλλαγής, χρησιμοποιήθηκε για να καταγράψει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διάφορων χρηστών και να βελτιστοποιήσει την ενεργή διαμόρφωση δέσμης του BS και την παθητική διαμόρφωση δέσμης του RIS. Χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές μη επιβλεπόμενης μάθησης για τη μάθηση των βαρών του DNN για τη μεγιστοποίηση της χρησιμότητας του δικτύου. Η προτεινόμενη μέθοδος επέτυχε συγκρίσιμη επίδοση ρυθμού με τη μέθοδο που βασίζεται στην τέλεια CSI και στη βελτιστοποίηση BCD, και μείωσε σημαντικά την επιβάρυνση εκπαίδευσης σε σύγκριση με την εκτίμηση MMSE γραμμικά. Αυτό υποδηλώνει ότι το νευρωνικό δίκτυο μπορεί να εξάγει πιο χρήσιμες πληροφορίες από τη ρητή εκτίμηση καναλιού για τον σχεδιασμό της παθητικής δέσμης του RIS. [1]

### 3.5.3.3. Άλλες Προσεγγίσεις

Άλλες προσεγγίσεις για τον σχεδιασμό παθητικής δέσμης του RIS χωρίς ρητό CSI περιλαμβάνουν την τυχαία παθητική διαμόρφωση δέσμης RIS, την ευκαιριακή παθητική διαμόρφωση δέσμης RIS, και πληροφορίες τοποθεσίας. Η τυχαία παθητική διαμόρφωση δέσμης του RIS είναι μια αποτελεσματική μέθοδος που δεν απαιτεί CSI και είναι ελεύθερη από βαρύ φορτίο εκτίμησης καναλιού. Επιτυγχάνει χαμηλότερη πιθανότητα διακοπής από σχεδιασμούς παθητικής δέσμης βασισμένα σε CSI, τα οποία απαιτούν μεγάλο φορτίο εκτίμησης καναλιού. Επιπλέον, οι πληροφορίες τοποθεσίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό παθητικής δέσμης χωρίς CSI, όταν το RIS είναι κατάλληλα τοποθετημένο για να επιτύχει LoS διαδρομές με τόσο το BS όσο και τους χρήστες. Ευρηματικοί αλγόριθμοι, όπως η βελτιστοποίηση με σμήνος σωματιδίων, μπορούν επίσης να υιοθετηθούν για τον σχεδιασμό παθητικής δέσμης χαμηλής πολυπλοκότητας χωρίς CSI. Ωστόσο, αρκετά κρίσιμα ζητήματα

σχεδιασμού πρέπει να επιλυθούν μελλοντικά. Για παράδειγμα, η μελέτη του σχεδιασμού αντανάκλασης βασισμένου στη βαθιά μάθηση σε πιο σύνθετα σενάρια, όπως πολυκυβελικά δίκτυα, περιβάλλοντα πολλαπλών διαδρομών και δίκτυα που υποστηρίζονται από πολλαπλά RIS, είναι ενδιαφέρουσα. Επιπλέον, πώς να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά όλες οι πληροφορίες από κάθε πλευρά για πιο αποτελεσματική εκπαίδευση δέσμης RIS δεν έχει ακόμη ερευνηθεί. Είναι ζωτικής σημασίας να χαρακτηρίσουμε το όριο απόδοσης για διάφορες προσεγγίσεις σχεδιασμού αντανάκλασης RIS χωρίς ρητό CSI και να αναπτύξουμε αποτελεσματικές μεθόδους για την προσέγγιση των αντίστοιχων ορίων τους. [1]

### 3.6. Περιορισμοί και Ατέλειες Υλικού RIS

Τα πρώτα έργα RIS υπέθεσαν ιδανικά μοντέλα υλικού για την εκτίμηση καναλιού και την παθητική διαμόρφωση δέσμης. Ωστόσο, αυτά τα μοντέλα μπορεί να προκαλέσουν απώλεια απόδοσης λόγω περιορισμών και ατελειών του υλικού. [1]

#### 3.6.1. Διακριτή Ανάκλαση σε Φάση/Πλάτος

Το ιδανικό μοντέλο ανάκλασης του RIS με συνεχώς ρυθμιζόμενη φάση/πλάτος είναι βολικό για βελτιστοποίηση και παρέχει χρήσιμα όρια απόδοσης, αλλά είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί λόγω του υψηλού κόστους υλοποίησης για την κατασκευή μετατοπιστών φάσης/ελεγκτών πλάτους υψηλής ανάλυσης. Αντίθετα, είναι πιο οικονομικά συμφέρον να εφαρμόσουμε το RIS με διακριτά και πεπερασμένα επίπεδα φάσης/πλάτους που απαιτούν μόνο ένα μικρό αριθμό bits ελέγχου για κάθε στοιχείο. Τα σύνολα διακριτών πλατών και φάσεων για κάθε στοιχείο του RIS μπορούν να εκφραστούν ως

$$F'_\beta = \{\bar{\beta}_1, \dots, \bar{\beta}_{k_\beta}\}$$

$$F'_\theta = \{\bar{\theta}_1, \dots, \bar{\theta}_{k_\theta}\}$$

όπου

$$0 \leq \bar{\beta}_m \leq \bar{\beta}_{m_1} \leq 1 \text{ για } 1 \leq m \leq m_1 \leq k_\beta$$

$$0 \leq \bar{\theta}_l \leq \bar{\theta}_{l_1} \leq 2\pi \text{ για } 1 \leq l \leq l_1 \leq k_\theta$$

Το πρόβλημα εκτίμησης του καναλιού μελετήθηκε υπό τον περιορισμό των διακριτών φασικών μετατοπίσεων RIS, χρησιμοποιώντας ένα σχεδόν ορθογώνιο πίνακα εκπαίδευσης DFT-Hadamard για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος εκτίμησης του καναλιού. Τα ON/OFF σχέδια εκπαίδευσης που βασίζονται στο δύο επιπέδων έλεγχο του πλάτους ερευνηθήκαν, αλλά γενικά υποφέρουν από σημαντική απώλεια ισχύος ανακλαστικότητας σε σύγκριση με το πλήρες ON με πλήρη ανακλαστικότητα σήματος. Για τον σχεδιασμό της παθητικής δέσμης με διακριτές φασικές μετατοπίσεις, μια άμεση προσέγγιση είναι η εξαντλητική αναζήτηση όλων των πιθανών επιπέδων φασικής μετατόπισης για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης της επικοινωνίας. Ωστόσο, αυτό μπορεί να προκαλέσει απαγορευτικά υψηλή πολυπλοκότητα υπολογισμών με φασικές μετατοπίσεις υψηλής ανάλυσης και έναν μεγάλο αριθμό ανακλαστικών στοιχείων. Πιο αποδοτικές προσεγγίσεις έχουν προταθεί για να αντιμετωπίσουν αυτό το ζήτημα, όπως η μέθοδος branch-and-bound, η τεχνική relax-and-quantize, η μέθοδος element-wise BCD και η μέθοδος βασισμένη στην ποινή. Μελετήθηκαν οι επιπτώσεις των μετατοπιστών φάσης χαμηλής ανάλυσης στην απόδοση της παθητικής δέσμης, δείχνοντας ότι ένας μετατοπιστής φάσης 3-bit επιτυγχάνει την πλήρη τάξη πολυπλοκότητας, ενώ ένας μετατοπιστής φάσης 2-bit είναι αρκετός για κοντινή απόδοση στη βάση συνεχούς τιμής όταν το μέγεθος του RIS γίνεται μεγάλο. [1]

### 3.6.2. Ανάκλαση με Πλάτος που Εξαρτάται από τη Φάση

Το πλάτος της ανακλασης των ανακλαστικών στοιχείων του RIS είναι μη σταθερό και μη γραμμικό ως προς την μετατόπιση της φάσης, καθιστώντας το δύσκολο για πρακτική εκτίμηση καναλιού και σχέδια παθητικής δέσμης. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, έχει προταθεί ένα προσαρμοσμένο πρότυπο εκπαίδευσης RIS χρησιμοποιώντας τη μέθοδο βελτιστοποίησης BCD. Αυτή η μέθοδος πέτυχε καλύτερη απόδοση στην πράξη από το συμβατικό σχέδιο εκπαίδευσης που υποθέτει ανεξάρτητο έλεγχο φάσης και πλάτους. Διάφορες μέθοδοι βελτιστοποίησης έχουν προταθεί για τον σχεδιασμό της παθητικής δέσμης υπό το μοντέλο ελέγχου του πλάτους εξαρτώμενο από τη φάση, συμπεριλαμβανομένης της μεθόδου element-wise BCD, η οποία βελτιστοποιεί επαναληπτικά κάθε φασική μετατόπιση με σταθερές επιδράσεις στο πλάτος της ανάκλασης. Η ποινική μέθοδος εφαρμόστηκε για την αντιμετώπιση του φασικά εξαρτώμενου ελέγχου του πλάτους προσθέτοντας έναν όρο ποινής που σχετίζεται με τις τιμές της ανάκλασής. Αριθμητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι και οι δύο μέθοδοι BCD στοιχείου προς στοιχείο και με ποινή επιτυγχάνουν ελκυστική απόδοση επικοινωνίας για συστήματα με μόνο έναν χρήστη με χαμηλή πολυπλοκότητα υπολογισμού. [1]

### 3.6.3. Αμοιβαία Επίδραση Σύζευξης μεταξύ Ανακλώσιμων Στοιχείων

Το αμοιβαίο εφέ σύζευξης μεταξύ των ανακλαστικών στοιχείων του RIS είναι μια σημαντική πρόκληση στην εκτίμηση του καναλιού και στα σχέδια της παθητικής διαμόρφωσης δέσμης. Η αντίσταση κάθε στοιχείου επηρεάζεται από τα γειτονικά του στοιχεία, οδηγώντας σε εξαιρετικά διασυνδεδεμένους συντελεστές ανακλαστικότητας. Αυτό αντίκειται στο συμβατικό μοντέλο υλικού RIS, το οποίο υποθέτει ανεξάρτητο έλεγχο ανακλαστικότητας μεταξύ διαφορετικών ανακλαστικών στοιχείων. Μια πιθανή λύση είναι η στρατηγική ομαδοποίησης στοιχείων, η οποία ομαδοποιεί τα γειτονικά στοιχεία σε μια επιφάνεια, μειώνοντας τον χρόνο εκπαίδευσης και παρακάμπτοντας το αμοιβαίο εφέ σύζευξης. Ωστόσο, χρειάζεται περισσότερη έρευνα για να κατανοηθεί πώς να ομαδοποιήσουμε κατάλληλα τα γειτονικά στοιχεία για να καταστειλούμε την ανεπιθύμητη αμοιβαία σύζευξη ενώ επιτυγχάνουμε ικανοποιητική απόδοση στην εκτίμηση του καναλιού και τον σχεδιασμό της παθητικής δέσμης. Για να διευκολυνθεί ο σχεδιασμός της παθητικής δέσμης στην παρουσία αμοιβαίας σύζευξης, έχει προταθεί ένα end-to-end μοντέλο επικοινωνιακού καναλιού βασισμένο στις εξισώσεις του Maxwell. Αυτό το μοντέλο περιλαμβάνει τις επιδράσεις της αμοιβαίας σύζευξης στον πομπό, τον δέκτη και το RIS, αλλά είναι πιο περίπλοκο λόγω του φασικά εξαρτώμενου πλάτους και της αυτοαντίστασης. Στη συνέχεια, υιοθετήθηκε η μέθοδος BCD στοιχείου προς στοιχείο για τον σχεδιασμό υψηλής ποιότητας υποβέλτιστης παθητικής δέσμης για τη γενική περίπτωση με σημαντική αμοιβαία σύζευξη. Αριθμητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των στοιχείων του RIS επιδεινώνει σημαντικά το τελικό SNR όταν η απόσταση μεταξύ τους είναι μικρότερη από μισό μήκος κύματος. Η μέθοδος BCD στοιχείου προς στοιχείο επεκτάθηκε αργότερα για τον σχεδιασμό παθητικής δέσμης RIS που λαμβάνει υπόψη την αμοιβαία σύζευξη σε κανάλια MIMO με παρεμβολές. [1]

### 3.6.4. Άλλες Ατέλειες/Βλάβες Υλικού

Τα ασύρματα συστήματα με RIS έχουν διάφορες υλικές ατελείες που μπορούν να προκαλέσουν παραμορφώσεις στην απόδοση, όπως τον θόρυβο των φάσεων του RIS, τις RF ελλείψεις του πομπού/δέκτη, την αναλογική ατέλεια, τα λάθη κβαντοποίησης και την μη γραμμικότητα του ενισχυτή. Αυτές οι ατελείες μπορούν να μοντελοποιηθούν ως τυχαίος θόρυβος με ομοιόμορφη κατανομή ή ως προσθετικός Γκαουσιανός θόρυβος με αυξανόμενη ισχύ θορύβου. Η πρόσφατη βιβλιογραφία έχει εξετάσει πρακτικές εκτιμήσεις καναλιού RIS και σχεδιασμούς παθητικής δέσμης υπό τις υλικές ατελείες του πομποδέκτη/RIS. Ωστόσο, οι επιπτώσεις αυτών των ατελειών στην εκτίμηση του καναλιού RIS δεν έχουν χαρακτηριστεί καλά, και απαιτείται περαιτέρω έρευνα για να κατανοηθούν καλύτερα οι επιπτώσεις τους. Έχει διαπιστωθεί ότι η υλική ατέλεια του RIS υποβαθμίζει το εφικτό ποσοστό περισσότερο όταν εξοπλίζεται με περισσότερα στοιχεία αντανάκλασης. Επίσης, αναλύθηκαν οι εργοδικές και οι διακοπτόμενες χωριτηκότητες των συστημάτων επικοινωνίας που υποβοηθούνται από



RIS με βάση το εκτεταμένο μοντέλο μεγέθυνσης σφάλματος, διαπιστώνοντας ότι η ικανότητα του συστήματος τείνει να κορεστεί όταν ο αριθμός των στοιχείων αντανάκλασης υπερβαίνει ένα κατώφλι λόγω των υλικών ατελειών του πομποδέκτη. Βρήκαν επίσης ότι δεν υπάρχει ανάγκη να χρησιμοποιηθούν πολλές αλυσίδες RF λόγω του τεράστιου κέρδους παθητικής διαμόρφωσης δέσμης του RIS. Επιδιώχθηκε επίσης να παραχθεί το εφικτό ποσοστό επικοινωνίας με την παρουσία λάθους κβαντοποίησης του BS και του θορύβου των φάσεων του RIS, διαπιστώνοντας ότι εάν ο αριθμός των στοιχείων αντανάκλασης του RIS είναι μεγάλος, η απόδοση του ποσοστού επικοινωνίας περιορίζεται από την ανάλυση των ADCs στα BS, ενώ ο θόρυβος των φάσεων του RIS προκαλεί μόνο μια σταθερή απώλεια ποσοστού. [1]

### 3.7. Λόγοι Εκτίμησης Καναλιού σε Αναδιαρθρώσιμες Ευφυείς Επιφάνειες

Η εκτίμηση του καναλιού είναι μια κρίσιμη πράξη σε κάθε σύστημα ασύρματης επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που ενσωματώνουν το RIS. Αρχικά ένα RIS είναι μια παθητική ανακλαστική επιφάνεια που εισάγει πρόσθετες μεταβλητές στο κανάλι, όπως μετατοπίσεις φάσης και απώλειες διαδρομής, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ποιότητα του σήματος. Η ακριβής εκτίμηση του καναλιού επιτρέπει στο ασύρματο σύστημα να αντισταθμίσει αυτές τις επιδράσεις βελτιστοποιώντας τις μετατοπίσεις φάσης ή/και το πλάτος των συντελεστών ανάκλασης των στοιχείων του RIS. Το περιβάλλον ασύρματης διάδοσης είναι δυναμικό και συνεχώς μεταβαλλόμενο και τα χαρακτηριστικά του καναλιού μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου. Η ακριβής εκτίμηση καναλιού βοηθά το σύστημα να προσαρμόζεται σε αυτές τις αλλαγές παρέχοντας ενημερωμένες πληροφορίες σχετικά με το κανάλι. Στα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας που χρησιμοποιούν το RIS, το σήμα ακολουθεί πολλαπλές διαδρομές μεταξύ πομπού και δέκτη, με αποτέλεσμα να έχουμε παρεμβολές πολλαπλών διαδρομών. Η ακριβής εκτίμηση καναλιού βοηθά στη μείωση της παρεμβολής πολλαπλών διαδρομών βελτιστοποιώντας την μετάδοση και την λήψη του σήματος. Η εκτίμηση του καναλιού είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος, όπως η μεγιστοποίηση του ρυθμού δεδομένων, της κάλυψης και της ενεργειακής απόδοσης. Βοηθά επίσης στη βελτίωση του SNR, το οποίος είναι ζωτικής σημασίας για μια αξιόπιστη ασύρματη επικοινωνία. [1]



## Κεφάλαιο 4

### 4.1. Ανάλυση Κώδικα

Παρακάτω ακολουθεί η περιγραφή κομματιών του κώδικα της προσομοίωσης.

```
clear; close all; clc;
```

Το πρόγραμμα ξεκινά με τις εντολές για τον καθαρισμό του περιβάλλοντος εργασίας, τον κλείσιμο όλων των γραφημάτων και την εκκαθάριση του command window.

```
numSym = 1000;  
subCarriers = 64;  
M = 16;  
pilotFrequency = 4;  
pilotEnergy = 1;  
cpLength = round(subCarriers * 0.1);  
L = 6;
```

Προσδιορίζονται πολλές παράμετροι που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα. Συγκεκριμένα, καθορίζονται ο αριθμός των συμβόλων OFDM (numSym), το μήκος των υποφορέων (subCarriers), η τάξη του συμβόλου διαμόρφωσης (M), η συχνότητα των πιλότων (pilotFrequency), η ενέργεια του πιλότου (pilotEnergy), το μήκος του κυκλικού προθέματος (cpLength) και το μήκος του καναλιού (L).

```
data = randi([0 M-1], numSym, subCarriers);
```

Δημιουργείται ο πίνακας data με τυχαία δεδομένα σειριακά. Οι αριθμοί που δημιουργούνται βρίσκονται μεταξύ 0 και M-1, όπου M είναι η τάξη του συμβόλου διαμόρφωσης.

```
dataModulated = qammod(data, M, 'UnitAveragePower', true);
```

Τα δεδομένα που δημιουργήθηκαν προηγουμένως διαμορφώνονται χρησιμοποιώντας την τεχνική QAM. Οι νέες τιμές αποθηκεύονται στον πίνακα dataModulated.

```
dataModulatedParallel = dataModulated.');
```

Ο πίνακας των παραμορφωμένων δεδομένων μετατρέπεται από σειριακή μορφή σε παράλληλη μορφή, δηλαδή κάθε σειριακή γραμμή αντιστοιχεί σε μια στήλη του πίνακα dataModulatedParallel.

```
pilotLocations = 1:pilotFrequency:subCarriers;  
dataLocations = setxor(1:subCarriers,pilotLocations);
```

Υπολογίζονται οι θέσεις των πιλότων και των δεδομένων. Οι θέσεις των πιλότων υπολογίζονται με βάση το διάστημα του pilotFrequency και αποθηκεύονται στον πίνακα pilotLocations. Οι θέσεις των δεδομένων υπολογίζονται χρησιμοποιώντας το setxor για να βρεθούν οι θέσεις που δεν είναι πιλότοι.

```
dataModulatedParallel(pilotLocations,:) = pilotEnergy *  
dataModulatedParallel(pilotLocations,);
```

Οι τιμές των πιλότων εισάγονται στις αντίστοιχες θέσεις του πίνακα dataModulatedParallel. Οι πιλότοι είναι πολλαπλασιασμένοι με την τιμή της ενέργειας του πιλότου (pilotEnergy).

```
dataIFFT = ifft(dataModulatedParallel);
```

Εφαρμόζεται ο αντίστροφος διακριτός μετασχηματισμός Fourier (IFFT) στις παραμορφωμένες τιμές των δεδομένων που έχουν μετατραπεί σε παράλληλη μορφή. Το αποτέλεσμα είναι ο πίνακας dataIFFT που περιέχει τα OFDM σύμβολα στο πεδίο του χρόνου.

```
dataIFFTSerial=dataIFFT.';
```

Ο πίνακας που περιέχει τα OFDM σύμβολα στη μορφή του χρόνου μετατρέπεται από παράλληλη μορφή σε σειριακή μορφή, έτσι ώστε να είναι έτοιμος για την προσθήκη προθεμάτων κυκλικής περιόδου.

```
guardIntervals = dataIFFTSerial(:,end-cpLength+1:end);  
OFDMSymbols = [guardIntervals dataIFFTSerial];
```

Προστίθενται προθέματα κυκλικής περιόδου (cyclic prefix) στα OFDM σύμβολα. Το τμήμα των δεδομένων μετά το τέλος του συμβόλου περιλαμβάνεται στα προθέματα κυκλικής περιόδου. Τα OFDM σύμβολα με τα προθέματα κυκλικής περιόδου αποθηκεύονται στον πίνακα OFDMSymbols.

```
d = 100;  
a = 3;  
transmitSNR = 10;  
noisePower = 10^(-transmitSNR/10);  
rayleighChannel = (d^(-a/2)) * sqrt(noisePower) * randn(1,L) + 1j *  
randn(1,L);  
h = abs(rayleighChannel);
```

Δημιουργείται ένα κανάλι τύπου Rician. Οι παράμετροι  $d$  (απόσταση),  $a$  (εκθέτης απώλειας),  $\text{transmitSNR}$  (λόγος σήματος προς θόρυβο),  $\text{noisePower}$  (ισχύς θορύβου) και  $K$  (παράγοντας  $K$ ) έχουν καθοριστικό ρόλο στον υπολογισμό του καναλιού. Οι πολύπλευροι όροι του καναλιού υπολογίζονται με βάση τη σχέση Rician και μια κατανομή Rayleigh που αντιπροσωπεύει την τυχαιότητα του περιβάλλοντος.

```
h = h./norm(h);
```

Το κανάλι φέρνεται στο μέγεθος του βαθμού του. Αυτή η προσαρμογή εξασφαλίζει ότι η ισχύς του καναλιού είναι 1, κάνοντας την πιο βολική για μελλοντικούς υπολογισμούς.

```
H = fft(h, subCarriers);
```

Το κανάλι  $h$  υποβάλλεται σε διακριτό μετασχηματισμό Fourier (FFT) για να δημιουργηθεί το συχνοτικό πεδίο του καναλιού  $H$ . Το  $H$  αντιπροσωπεύει τις υπολογισμένες κατανομές καναλιού σε συχνότητα.

```
OFDMSymbolsBStoRIS = filter(h, 1, OFDMSymbols.').';
```

Τα σύμβολα OFDM περνούν μέσα από το κανάλι προς RIS. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση της συνάρτησης `filter`, όπου το `OFDMSymbols` περνάει μέσα από το κανάλι  $h$ .

```
reflectionCoefficients = exp(1j * angle(H));  
reflectionCoefficientsMatrix = ones(subCarriers+cpLength, numSym);  
reflectionCoefficientsMatrix(cpLength+1:subCarriers+cpLength, :) =  
reshape repmat(reflectionCoefficients', numSym, 1), [subCarriers,  
numSym]);
```

Δημιουργούνται οι συντελεστές αντανάκλασης για το RIS. Το `reflectionCoefficients` περιέχει τη φάση του καναλιού  $H$ . Ο πίνακας `reflectionCoefficientsMatrix` δημιουργείται με σκοπό την αναπαράσταση των συντελεστών αντανάκλασης για κάθε OFDM σύμβολο.

```
OFDMSymbolsRISToMS = filter(h, 1, OFDMSymbols.').';
```

Τα OFDM σύμβολα μετά την ανάκλασή τους στο RIS περνάνε για δεύτερη φορά από το κανάλι.

```

count = 0;
snrVector = 0:4:40;
for snrTemp = snrVector
    SNR = snrTemp + 10*log10(log2(M));
    count = count + 1;
    disp(['Loop ', num2str(count), ' out of ',
num2str(length(snrVector)), '. SNR Value ', num2str(SNR)]);
    OFDMSymbolNoChannelAWGN = awgn(OFDMSymbols, SNR, 'measured' );
    OFDMSymbolsWithChannelAWGN = awgn(OFDMSymbolsRISToMS, SNR,
'measured' );

    OFDMNoChannelRemovedCP =
OFDMSymbolNoChannelAWGN(:, cpLength+1:subCarriers+cpLength);
    OFDMWithChannelRemovedCP =
OFDMSymbolsWithChannelAWGN(:, cpLength+1:subCarriers+cpLength);

    OFDMNoChannelParallel = OFDMNoChannelRemovedCP.';
    OFDMWithChannelParallel = OFDMWithChannelRemovedCP.';

    receivedFFTNoChannel = fft(OFDMNoChannelParallel);
    receivedFFTWithChannel = fft(OFDMWithChannelParallel);

```

Υλοποιείται ένα βρόχος για δοκιμή διαφορετικών τιμών του SNR. Ο λόγος SNR προσαυξάνεται με τον όρο  $10 \cdot \log_{10}(\log_2(M))$  για να ληφθεί υπόψη η αριθμοποίηση του συμβόλου QAM. Ο αριθμητικός μετρητής count αυξάνεται κατά ένα σε κάθε επανάληψη, ενώ εμφανίζεται μήνυμα για την πρόοδο της επανάληψης και την τιμή του SNR. Ακόμα εκτελείται FFT.

```

TxPilots = dataModulatedParallel(pilotLocations,:);
RxPilots = receivedFFTWithChannel(pilotLocations,:);

H_Pilot_LS= RxPilots./TxPilots;

for r = 1:numSym
    H_MMSE(:,r) = MMSE(RxPilots(:,r), TxPilots(:,r), subCarriers,
pilotFrequency, h, SNR);
end

for q = 1:numSym
    H_Data_LS(:,q) = interpolate(H_Pilot_LS(:,q).', pilotLocations,
subCarriers, 'spline');
end

H_Data_LS_Parallel = H_Data_LS.';
H_Data_MMSE_Parallel = H_MMSE.';

```

Πραγματοποιείται εκτίμηση του καναλιού. Οι πιλότοι που έχουν μεταφερθεί στον δέκτη εξάγονται για περαιτέρω ανάλυση. Οι εκτιμήσεις που πραγματοποιούνται περιλαμβάνουν την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (LS) και τη μέθοδο του ελαχίστων τετραγώνων με ελαφρύτερη παραμετροποίηση (MMSE). Επίσης, πραγματοποιείται γραμμική/κυρτή παρεμβολή (interpolation) για την εκτίμηση του καναλιού σε περιοχές που δεν έχουν πιλότους.

```

received_NoChannel = qamdemod(receivedFFTNoChannel.', M,
'UnitAveragePower', true) ;
received_Channel_LS =
qamdemod(((receivedFFTWithChannel.') ./ H_Data_LS_Parallel), M,
'UnitAveragePower', true) ;

```

```

received_Channel_MMSE =
gamdemod(((receivedFFTWWithChannel.')./(H_Data_MMSE_Parallel)), M,
'UnitAveragePower', true) ;

```

Πραγματοποιείται η αποδιαμόρφωση των δεδομένων που έχουν περάσει από το κανάλι. Χρησιμοποιούνται οι εκτιμήσεις του καναλιού που προέκυψαν από τις προηγούμενες διαδικασίες.

```

data_NoPilots = data(:,dataLocations);
rec_NoChannel = received_NoChannel(:,dataLocations);
rec_Channel_LS = received_Channel_LS(:,dataLocations);
rec_Channel_MMSE = received_Channel_MMSE(:,dataLocations);

```

Αφαιρούνται οι πιλότοι από τα ληφθέντα δεδομένα και τα αρχικά δεδομένα. Αυτό διευκολύνει τη σύγκριση των ληφθέντων και αναμενόμενων δεδομένων για τον υπολογισμό του σφάλματος.

```

[~, r_NoCH(count)] = symerr(data_NoPilots, rec_NoChannel) ;
[~, r_LS(count)] = symerr(data_NoPilots, rec_Channel_LS) ;
[~, r_MMSE(count)] = symerr(data_NoPilots, rec_Channel_MMSE) ;
end

```

Υπολογίζεται το συνολικό σφάλμα μεταξύ των αναμενόμενων και των ληφθέντων δεδομένων για κάθε SNR. Οι τιμές αποθηκεύονται στους πίνακες r\_NoCH, r\_LS και r\_MMSE. Αυτό το τμήμα κλείνει τον βρόχο για τις διάφορες τιμές SNR.

```

% Estimated channel power in dB
H_power_esti_dB_LS =
10*log10(abs(H_Data_LS_Parallel.*conj(H_Data_LS_Parallel)));
H_power_esti_dB_MMSE =
10*log10(abs(H_Data_MMSE_Parallel.*conj(H_Data_MMSE_Parallel)));

% Plot 1 - Bit Error Rate
figure;
semilogy(snrVector,r_NoCH,'-+');
hold on;
semilogy(snrVector,r_LS,'-o');
semilogy(snrVector,r_MMSE,'-s');
legend('No Channel','LS CE');
xlabel('SNR (dB)');
ylabel('Bit Error Rate (BER)');
title('Bit Error Rate vs. SNR');
legend('No Channel','LS Channel Estimation','MMSE Channel Estimation');
grid;
hold off;

% Plot 2 - Channel Comparison
figure;
hold on;
plot(H_power_dB(1:8:end),'+k','LineWidth',3);
plot(H_power_esti_dB_LS(1,(1:8:end)),'or','LineWidth',3);
plot(H_power_esti_dB_MMSE(1,(1:8:end)),'Sb','LineWidth',1);
title('ACTUAL AND ESTIMATED CHANNELS');
xlabel('Time in samples');
ylabel('Magnitude of coefficients');
legend('Actual','LS Channel Estimation','MMSE Channel Estimation');

```

Τα παραπάνω γραφήματα παρουσιάζουν σημαντικές πληροφορίες για την απόδοση του συστήματος επικοινωνίας και την ποιότητα της εκτίμησης καναλιού. Στο πρώτο γράφημα, σε ημιλογαριθμική κλίμακα (semilogy), παρουσιάζεται ο ρυθμός σφάλματος bit έναντι του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) για τρεις περιπτώσεις. Η μία περίπτωση είναι όταν δεν υπάρχει κανάλι (No Channel) και η άλλη περίπτωση είναι όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος εκτίμησης ελαχίστων τετραγώνων (LS CE) και οι τελευταία για την περίπτωση της μεθόδου εκτίμησης ελαχίστων τετραγώνων (MMSE CE). Εδώ μπορούμε να συγκρίνουμε την απόδοση της LS εκτίμησης, της MMSE εκτίμησης με την απόδοση του No Channel. Τα δεύτερο γράφημα παρουσιάζει το πραγματικό κανάλι σε σύγκριση με την εκτιμημένη μορφή του, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους εκτίμησης LS και MMSE. Οι γραφικές αναπαραστάσεις αυτές μας δίνουν μια εικόνα για το πόσο καλά οι εκτιμήσεις μας προσεγγίζουν το πραγματικό κανάλι, σε ποιες περιοχές η εκτίμηση είναι πιο ακριβής και πού ενδέχεται να υπάρχουν αποκλίσεις.

```
d = 100;
a = 3;
transmitSNR = 10;
noisePower = 10^(-transmitSNR/10);
K = 10;
ricianChannel = (d^(-a/2)) * sqrt(noisePower) * sqrt(K/(K+1)) +
sqrt(1/(2*(K+1))) * (randn(1,L) + 1j*randn(1,L));
h = abs(ricianChannel);
```

Πραγματοποιείται η προσομοίωση ενός καναλιού διάδοσης με ανακλάσεις, βάσει του μοντέλου Rayleigh. Καταρχάς, καθορίζουμε την απόσταση (d) μεταξύ του πομπού και του RIS καθώς και μεταξύ του RIS και του δέκτη. Ο παράγοντας παρακείμενης απώλειας (a) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απώλειας ισχύος στο κανάλι. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (transmitSNR) παίζει ρόλο στην ποιότητα του καναλιού. Υπολογίζουμε την ισχύ του θορύβου (noisePower) βασιζόμενοι στον λόγο σήματος προς θόρυβο. Στη συνέχεια, δημιουργούμε ένα Rayleigh κανάλι χρησιμοποιώντας την παρακείμενη απώλεια και την ισχύ του θορύβου. Το randn(1, L) παράγει τυχαίους αριθμούς από την κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση 1, δημιουργώντας μια προσομοίωση του Rayleigh fading καναλιού. Το h υπολογίζεται ως η απόλυτη τιμή του rayleighChannel, αντιπροσωπεύοντας την αμφίπλευρη απόκλιση της καναλικής απόκρισης.

## 4.2. Ανάλυση Σεναρίων

Στο πρώτο σενάριο της προσομοίωσης, χρησιμοποιούμε ένα Rician μοντέλο για το κανάλι επικοινωνίας. Το Rician μοντέλο προσομοιώνει ένα κανάλι με πολλαπλότητα που περιλαμβάνει και έναν κύριο παράγοντα και μια κατανομή Rayleigh που αντιπροσωπεύει την τυχαιότητα του περιβάλλοντος. Αυτό αντικατοπτρίζει καλύτερα πραγματικά κανάλια που περιλαμβάνουν συνιστώσες πορείας και σκέδασης σε περιβάλλοντα οπτικής επαφής. Στο δεύτερο σενάριο της προσομοίωσης, χρησιμοποιούμε ένα Rayleigh μοντέλο για το κανάλι επικοινωνίας. Το μοντέλο Rayleigh προσομοιώνει ένα κανάλι με αποκλειστική κατανομή Rayleigh, που αποτελεί συχνά απλούστερη προσέγγιση για περιβάλλοντα με μη οπτική επαφή. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για απλές αναλύσεις και συγκρίσεις με τις πιο πολύπλοκες συνθήκες του Rician μοντέλου. Γενικότερα και στα δύο σενάρια, περιγράφεται ένα πρόγραμμα που προσομοιώνει ένα σύστημα OFDM με χρήση QAM και εκτελεί διάφορα βήματα επεξεργασίας σήματος, αποκατάστασης καναλιού και εκτίμησης σφαλμάτων. Το πρόγραμμα εκτελείται για τέσσερις διαφορετικές αποστάσεις (d=100, d=200, d=300, d=400) μεταξύ πομπού και RIS καθώς και RIS και δέκτη, εξετάζοντας την επίδραση της απόστασης στην ποιότητα της επικοινωνίας. Το πρόγραμμα ξεκινά με την αρχικοποίηση παραμέτρων όπως ο αριθμός των συμβόλων OFDM, ο αριθμός των υποφορέων, η τάξη της συμβολοσειράς QAM, κ.λπ. Έπειτα, δημιουργούνται τυχαία δεδομένα και προετοιμάζονται για την υποβολή στο κανάλι. Τα δεδομένα υποβάλλονται σε

διαμόρφωση QAM, διανέμονται σε σύμβολα OFDM και προστίθενται πιλότοι για την εκτίμηση του καναλιού. Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται περαιτέρω επεξεργασίες, όπως η εισαγωγή κυκλικού προθέματος και η μετάδοση μέσω του καναλιού από τον πομπό στο RIS. Το κανάλι φέρει τον συντελεστή καναλιού  $h$ . Το πρόγραμμα συνεχίζει με τη διαδικασία της ανάκλασης από το RIS. Για την ανάκλαση του RIS, αρχικά, υπολογίζονται οι συντελεστές ανάκλασης για κάθε υποφορέα του σήματος, βασισμένοι στην γωνία που περιγράφει το κανάλι  $H$  και τη γωνία του RIS. Αυτοί οι συντελεστές αναπαριστούν την φάση ανάκλασης των κυμάτων στο RIS. Οι συντελεστές ανάκλασης για κάθε υποφορέα διατηρούνται σε έναν πίνακα, όπου κάθε στήλη αναπαριστά τον συντελεστή ανάκλασης για έναν συγκεκριμένο υποφορέα. Το σήμα που εκπέμπεται από τον πομπό διέρχεται μέσω του RIS. Αυτό επιτυγχάνεται πολλαπλασιάζοντας το με τον πίνακα των συντελεστών ανάκλασης. Συγκεκριμένα, για κάθε υποφορέα, το σήμα πολλαπλασιάζεται με τον αντίστοιχο συντελεστή ανάκλασης. Το σήμα που έχει υποστεί ανάκλαση από το RIS διαδίδεται μέσω του καναλιού από τον RIS στον δέκτη, όπως προηγουμένως. Έπειτα, το πρόγραμμα εκτελεί έναν βρόχο επανάληψης για διάφορα επίπεδα SNR. Σε κάθε επανάληψη, τα δεδομένα που έχουν μεταδοθεί μέσω του καναλιού υπόκεινται σε προσθήκη θορύβου Gaussian. Στη συνέχεια, αφαιρείται το κυκλικό πρόθεμα, πραγματοποιείται ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier (IFFT) και πραγματοποιείται η επιστροφή από σειριακή σε παράλληλη μορφή. Το πρόγραμμα στη συνέχεια εκτιμά το κανάλι χρησιμοποιώντας τους πιλότους που περιέχονται στα δεδομένα και υλοποιεί την εκτίμηση καναλιού χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους όπως την εκτίμηση Least-Squares (LS) και Minimum Mean Square Error (MMSE). Πραγματοποιεί την αποδιαμόρφωση των δεδομένων με βάση τις εκτιμήσεις του καναλιού και υπολογίζει το Bit Error Rate (BER) για κάθε επίπεδο SNR. Οι τιμές BER συγκρίνονται με τα αρχικά δεδομένα για τον υπολογισμό του ποσοστού σφαλμάτων. Τέλος, το πρόγραμμα δημιουργεί γραφήματα που απεικονίζουν τα αποτελέσματα, όπως το BER σε σχέση με το SNR για την περίπτωση χωρίς εκτίμηση, με εκτίμηση LS και με εκτίμηση MMSE. Επίσης, παρουσιάζονται γραφήματα που συγκρίνουν την πραγματική ισχύ του καναλιού με τις εκτιμώμενες τιμές από τις διάφορες μεθόδους εκτίμησης καναλιού.

### 4.3. Ανάλυση Σχημάτων

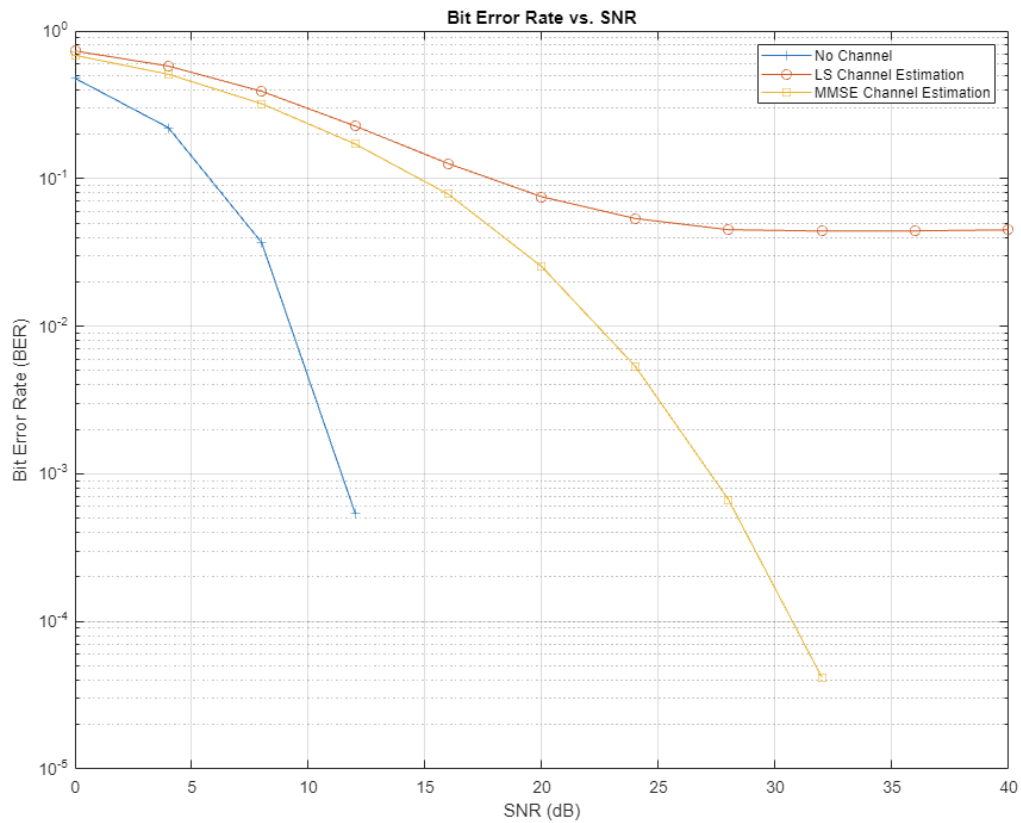
Παρακάτω αναλύονται τα σχήματα που προκύπτουν από την εκτέλεση του κώδικα. Ακολουθούν 16 σχήματα για 4 διαφορετικές τιμές αποστάσεων. Το πρόγραμμα κατά την εκτέλεση του επιστρέφει μόνο την επανάληψη που εκτελεί και την συγκεκριμένη τιμή SNR που χρησιμοποιεί για την συγκεκριμένη επανάληψη όπως φαίνεται παρακάτω.

Loop 1 out of 11. SNR Value 6.0206  
Loop 2 out of 11. SNR Value 10.0206  
Loop 3 out of 11. SNR Value 14.0206  
Loop 4 out of 11. SNR Value 18.0206  
Loop 5 out of 11. SNR Value 22.0206  
Loop 6 out of 11. SNR Value 26.0206

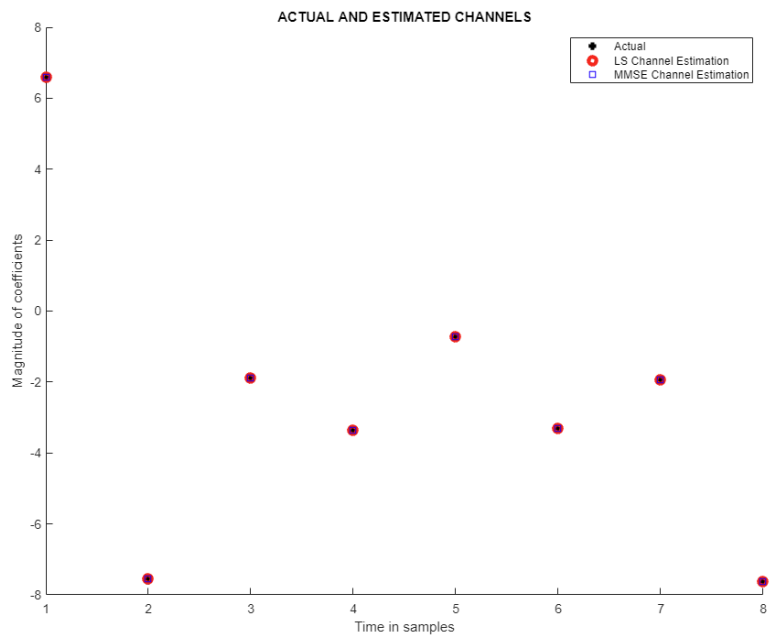
Loop 7 out of 11. SNR Value 30.0206  
Loop 8 out of 11. SNR Value 34.0206  
Loop 9 out of 11. SNR Value 38.0206  
Loop 10 out of 11. SNR Value 42.0206  
Loop 11 out of 11. SNR Value 46.0206



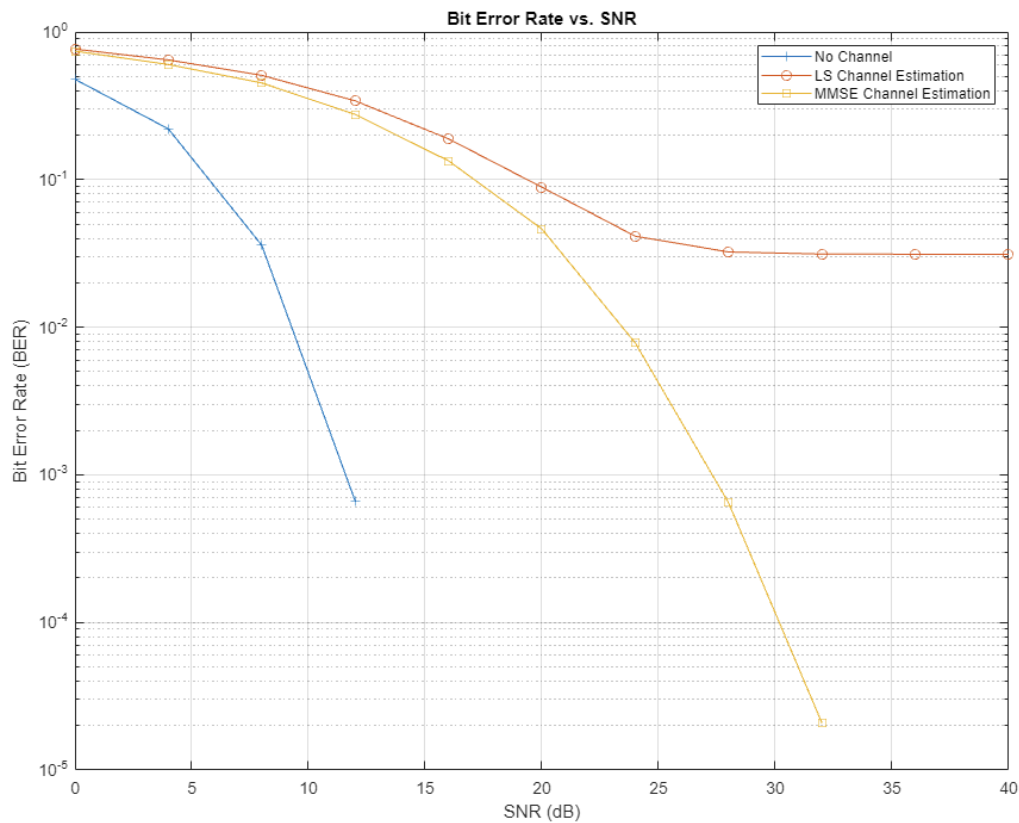
## Rayleigh (d=100)



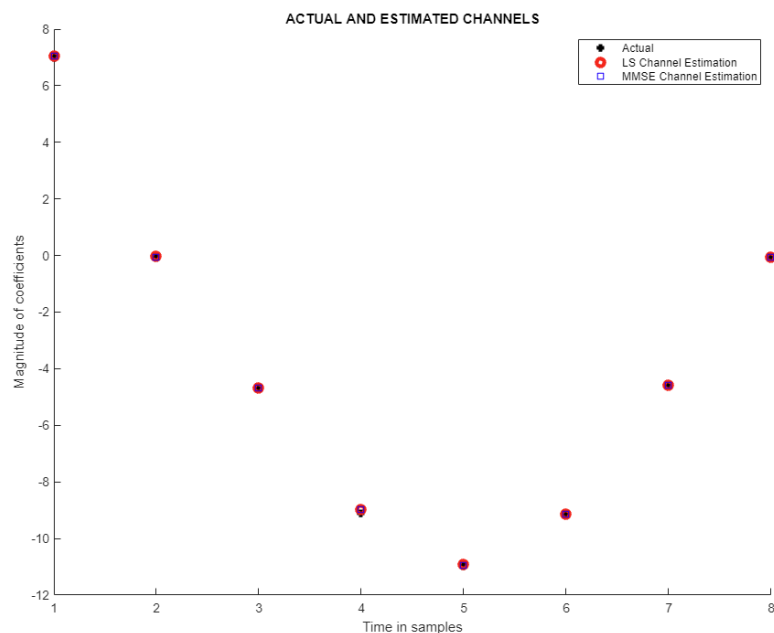
Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε την απόδοση του RIS σε μία περίπτωση μη οπτικής επαφής, η οποία εκφράζεται με το μοντέλο rayleigh. Στην συγκεκριμένη εκτέλεση η τιμή απόστασης μεταξύ πομπού – RIS καθώς και RIS – δέκτη είναι 100 μέτρα. Ακόμα βλέπουμε το πως μεταβάλλεται το bit error rate σε σχέση με το SNR για την συγκεκριμένη απόσταση. Σε γενικές γραμμές παρατηρούμε καλές τιμές bit error rate κυρίως για την εκτίμηση MMSE. Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε την σύγκριση των δεδομένων για τις 3 περιπτώσεις προσομοίωσης (No Channel, LS Estimation, MMSE Estimation).



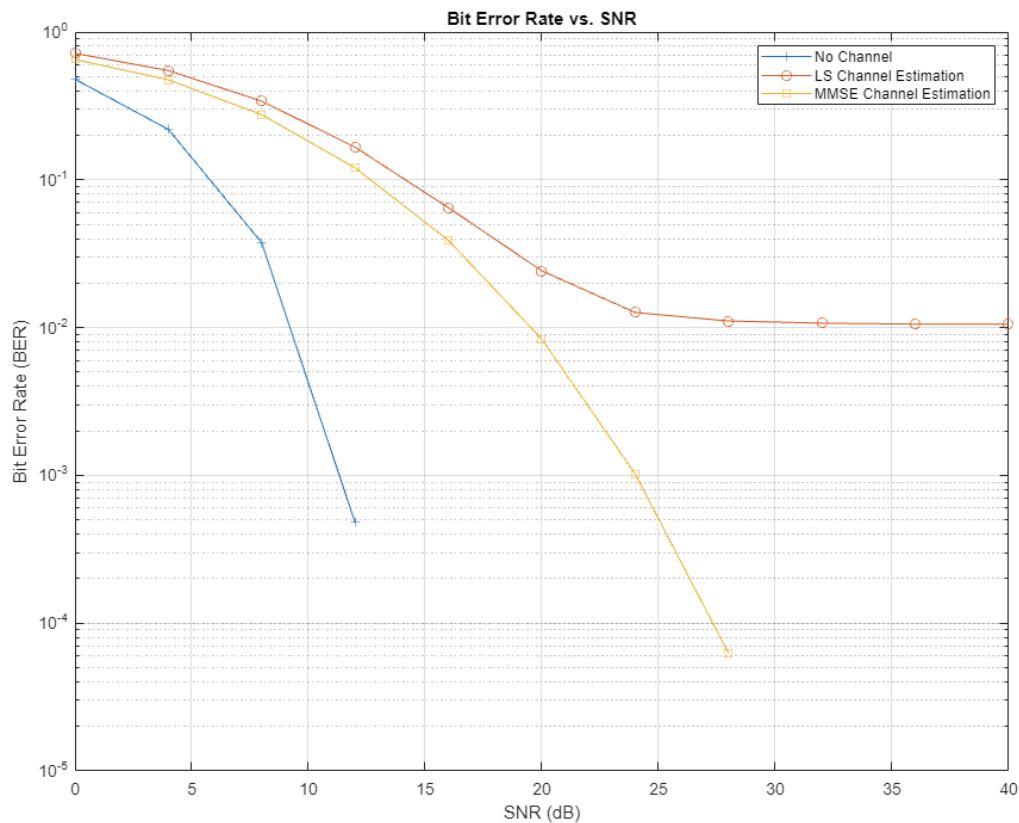
Rician (d=100)



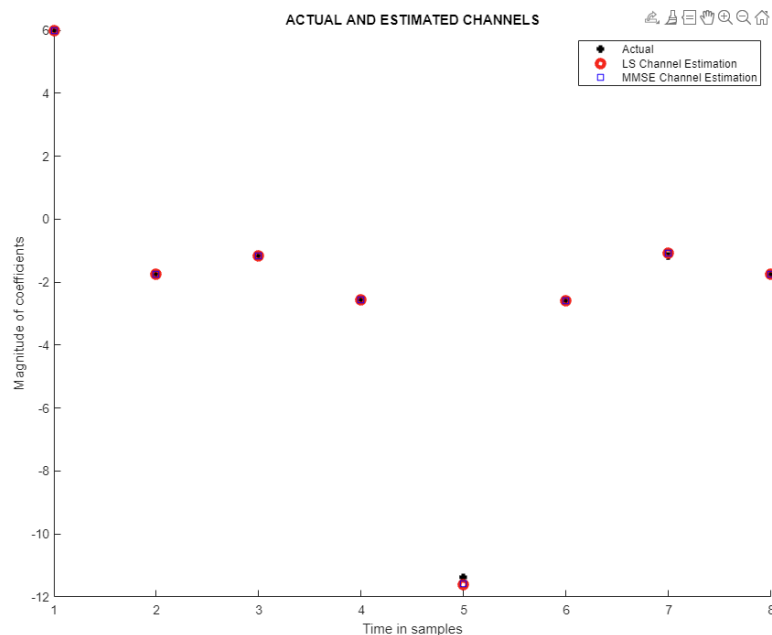
Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε την απόδοση του RIS σε μία περίπτωση οπτικής επαφής, η οποία εκφράζεται με το μοντέλο rician. Στην συγκεκριμένη εκτέλεση η τιμή απόστασης μεταξύ πομπού – RIS καθώς και RIS – δέκτη είναι 100 μέτρα. Ακόμα βλέπουμε το πως μεταβάλλεται το bit error rate σε σχέση με το SNR για την συγκεκριμένη απόσταση. Σε γενικές γραμμές παρατηρούμε αρκετά καλύτερες τιμές bit error rate σε σχέση με το μοντέλο του rayleigh. Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε την σύγκριση των δεδομένων για τις 3 περιπτώσεις προσομοίωσης (No Channel, LS Estimation, MMSE Estimation).



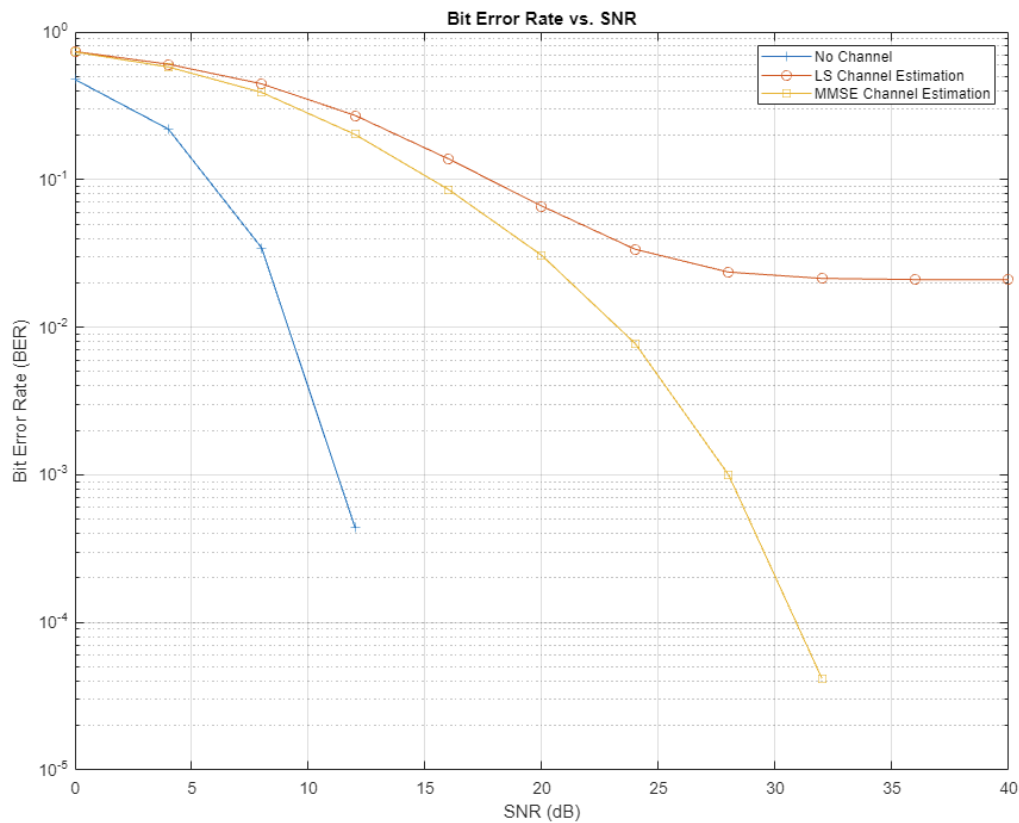
## Rayleigh (d=200)



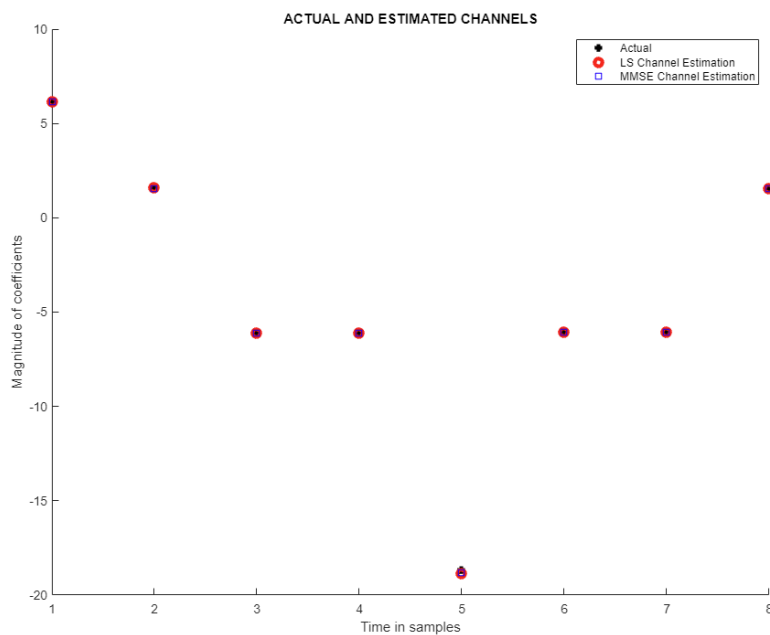
Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε την απόδοση του RIS σε μία περίπτωση μη οπτικής επαφής, η οποία εκφράζεται με το μοντέλο rayleigh. Στην συγκεκριμένη εκτέλεση η τιμή απόστασης μεταξύ πομπού – RIS καθώς και RIS – δέκτη είναι 200 μέτρα. Ακόμα βλέπουμε το πως μεταβάλλεται το bit error rate σε σχέση με το SNR για την συγκεκριμένη απόσταση. Σε γενικές γραμμές παρατηρούμε ελάχιστη μεταβολή σε σχέση με το  $d = 100$ . Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε την σύγκριση των δεδομένων για τις 3 περιπτώσεις προσομοίωσης (No Channel, LS Estimation, MMSE Estimation).



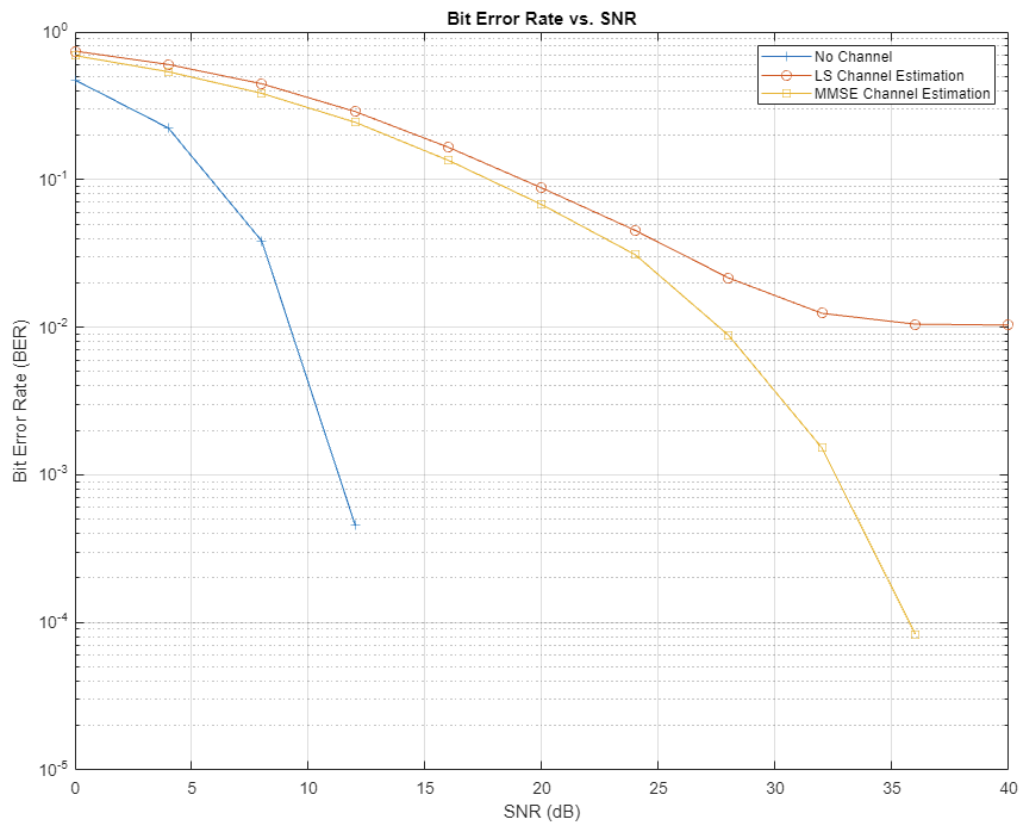
## Rician (d=200)



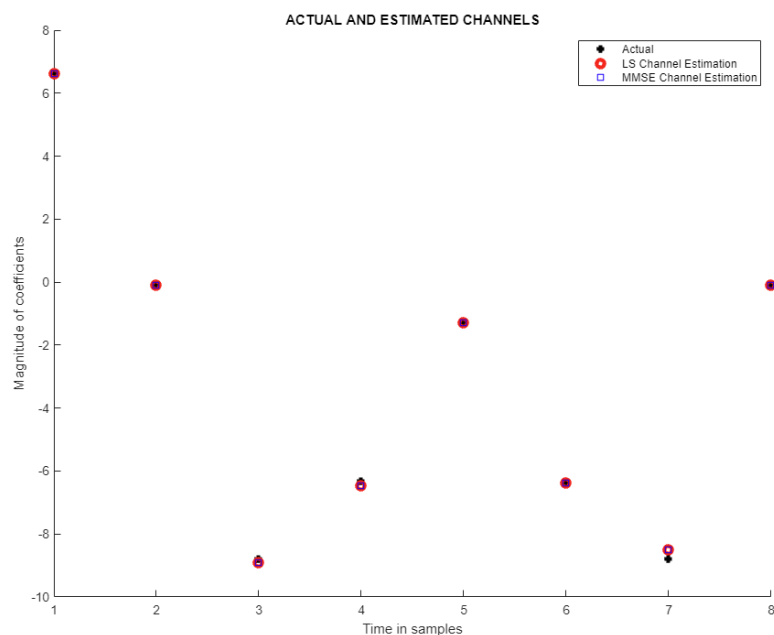
Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε την απόδοση του RIS σε μία περίπτωση οπτικής επαφής, η οποία εκφράζεται με το μοντέλο rician. Στην συγκεκριμένη εκτέλεση η τιμή απόστασης μεταξύ πομπού – RIS καθώς και RIS – δέκτη είναι 100 μέτρα. Ακόμα βλέπουμε το πως μεταβάλλεται το bit error rate σε σχέση με το SNR για την συγκεκριμένη απόσταση. Σε γενικές γραμμές παρατηρούμε πάλι καλύτερες τιμές bit error rate σε σχέση με το μοντέλο του rayleigh. Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε την σύγκριση των δεδομένων για τις 3 περιπτώσεις προσομοίωσης (No Channel, LS Estimation, MMSE Estimation).



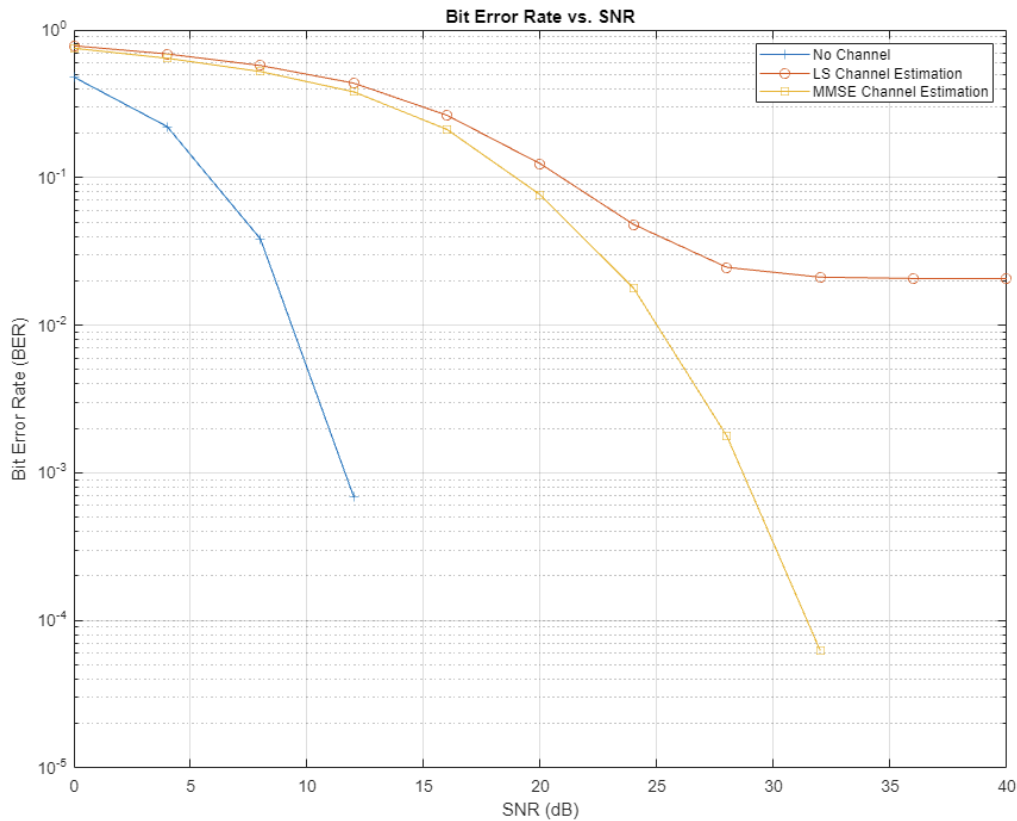
## Rayleigh (d=300)



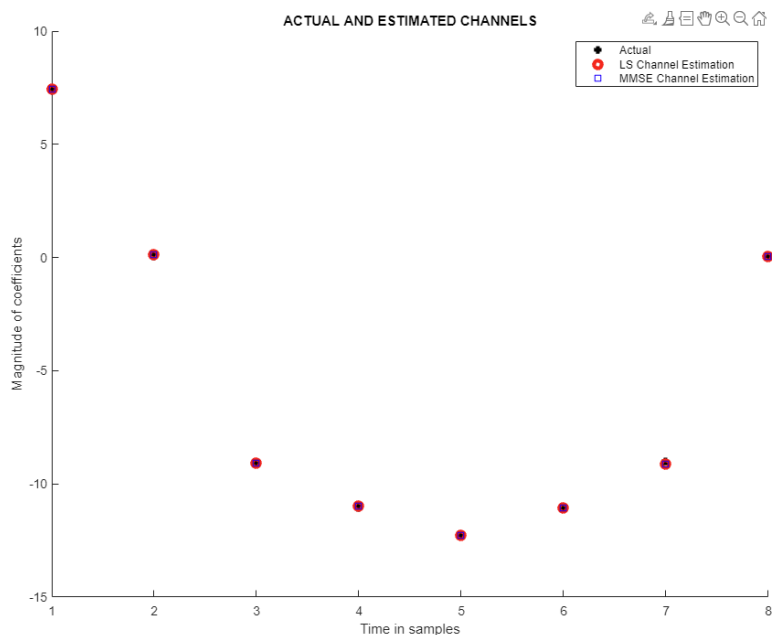
Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε την απόδοση του RIS σε μία περίπτωση μη οπτικής επαφής, η οποία εκφράζεται με το μοντέλο rayleigh. Στην συγκεκριμένη εκτέλεση η τιμή απόστασης μεταξύ πομπού – RIS καθώς και RIS – δέκτη είναι 100 μέτρα. Ακόμα βλέπουμε το πως μεταβάλλεται το bit error rate σε σχέση με το SNR για την συγκεκριμένη απόσταση. Σε γενικές γραμμές παρατηρούμε χειρότερες τιμές bit error rate σε σύγκριση με  $d = 200$ . Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε την σύγκριση των δεδομένων για τις 3 περιπτώσεις προσομοίωσης (No Channel, LS Estimation, MMSE Estimation).



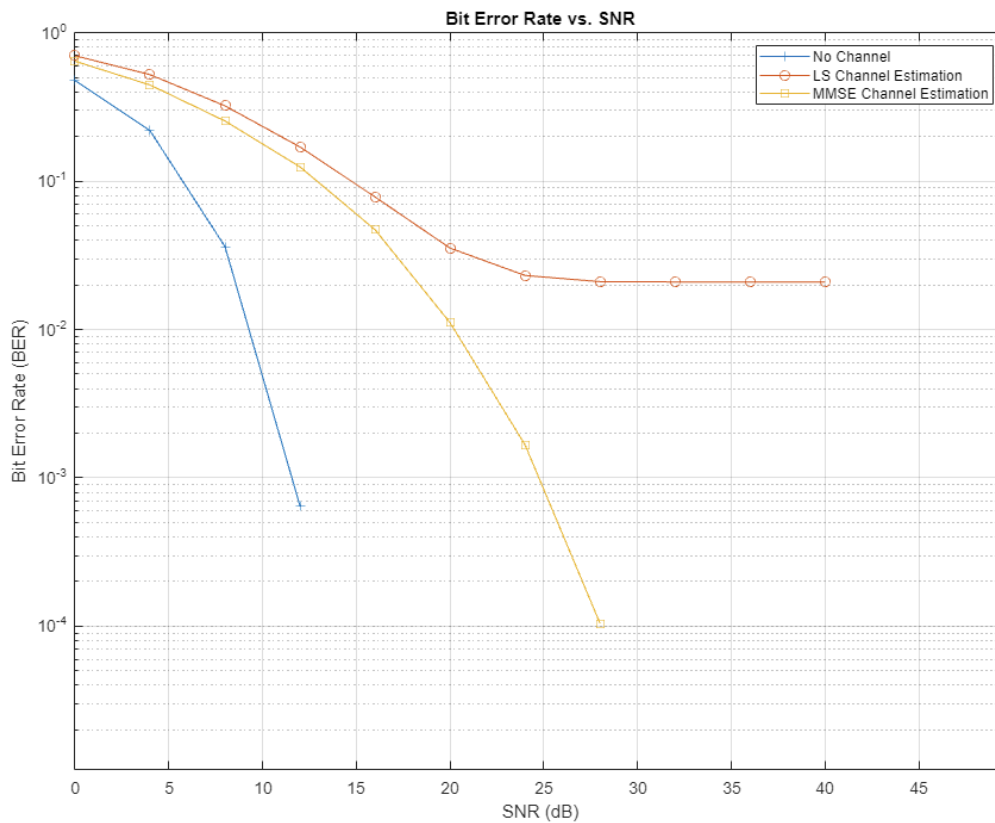
## Rician (d=300)



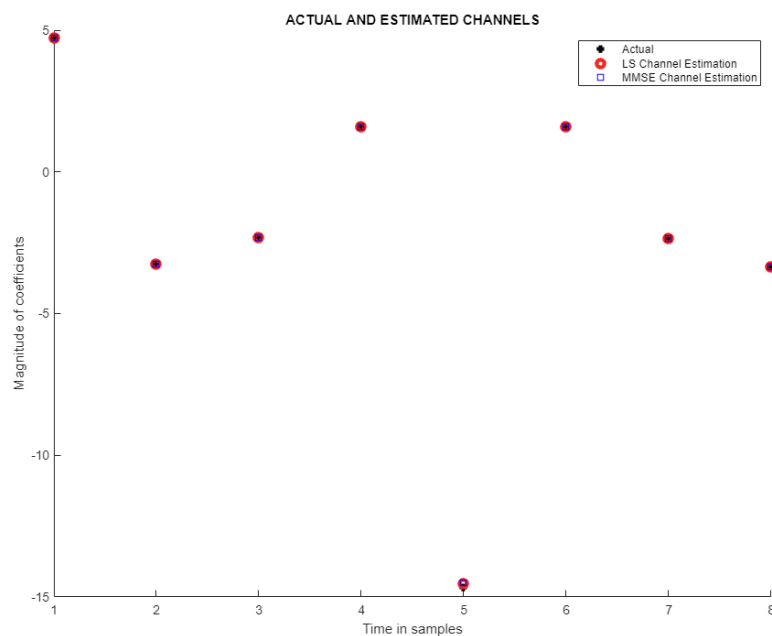
Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε την απόδοση του RIS σε μία περίπτωση οπτικής επαφής, η οποία εκφράζεται με το μοντέλο rician. Στην συγκεκριμένη εκτέλεση η τιμή απόστασης μεταξύ πομπού – RIS καθώς και RIS – δέκτη είναι 100 μέτρα. Ακόμα βλέπουμε το πως μεταβάλλεται το bit error rate σε σχέση με το SNR για την συγκεκριμένη απόσταση. Σε γενικές γραμμές παρατηρούμε πάλι χειρότερες τιμές σε σχέση με  $d = 200$  αλλά βλέπουμε και ότι αρχίζουν οι τιμές bit error rate και μοιάζουν με το οντέλο rayleigh. Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε την σύγκριση των δεδομένων για τις 3 περιπτώσεις προσομοίωσης (No Channel, LS Estimation, MMSE Estimation).



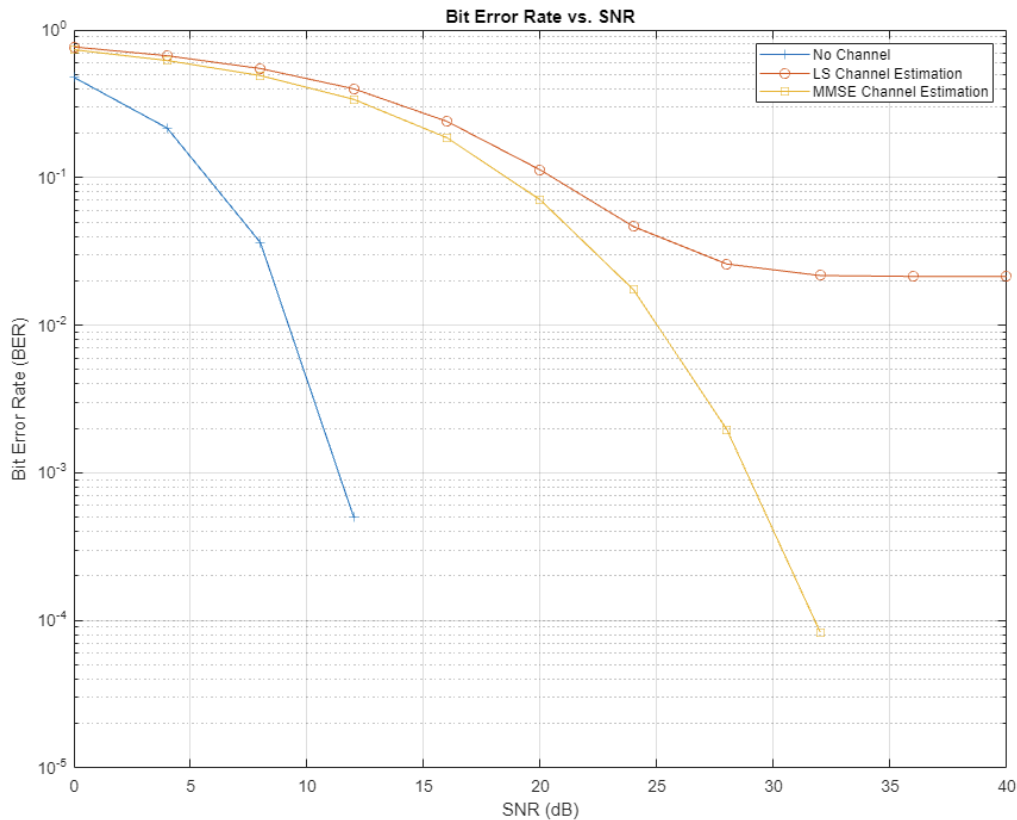
## Rayleigh (d=400)



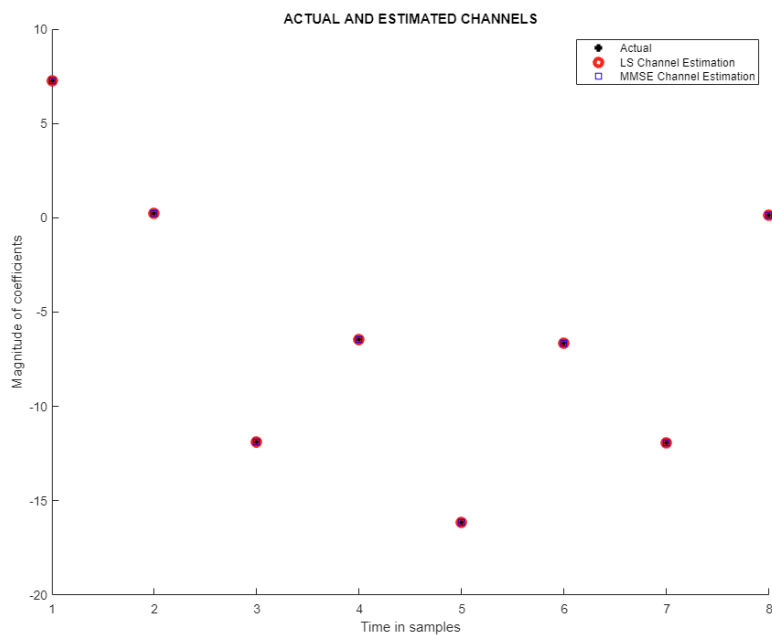
Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε την απόδοση του RIS σε μία περίπτωση μη οπτικής επαφής, η οποία εκφράζεται με το μοντέλο rayleigh. Στην συγκεκριμένη εκτέλεση η τιμή απόστασης μεταξύ πομπού – RIS καθώς και RIS – δέκτη είναι 100 μέτρα. Ακόμα βλέπουμε το πως μεταβάλλεται το bit error rate σε σχέση με το SNR για την συγκεκριμένη απόσταση. Σε γενικές γραμμές παρατηρούμε ότι οι τιμές bit error rate είναι πολύ παρόμοιες με το μοντέλο rician για  $d = 400$ . Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε την σύγκριση των δεδομένων για τις 3 περιπτώσεις προσομοίωσης (No Channel, LS Estimation, MMSE Estimation).



Rician (d=400)



Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε την απόδοση του RIS σε μία περίπτωση οπτικής επαφής, η οποία εκφράζεται με το μοντέλο rician. Στην συγκεκριμένη εκτέλεση η τιμή απόστασης μεταξύ πομπού – RIS καθώς και RIS – δέκτη είναι 100 μέτρα. Ακόμα βλέπουμε το πως μεταβάλλεται το bit error rate σε σχέση με το SNR για την συγκεκριμένη απόσταση. Σε γενικές γραμμές παρατηρούμε ότι οι τιμές bit error rate είναι πολύ παρόμοιες με το μοντέλο rayleigh για  $d = 400$ , αφού όσο αυξάνεται η απόσταση τόσο αποδυναμώνει το  $k$  factor. Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε την σύγκριση των δεδομένων για τις 3 περιπτώσεις προσομοίωσης (No Channel, LS Estimation, MMSE Estimation).







## Κεφάλαιο 5

### 5.1. Συμπέρασμα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε μια εκτενής βιβλιογραφική έρευνα σχετικά με την εκτίμηση καναλιού σε αναδιαρθρώσιμες ευφυείς επιφάνειες σε συστήματα ασύρματων επικοινωνιών. Η ανάλυση επικεντρώθηκε σε διάφορα κεφάλαια, εξετάζοντας τις εξελίξεις των ασύρματων δικτύων από την πρώτη μέχρι την πέμπτη γενιά, καθώς και τη σημαντικότητα της εκτίμησης του καναλιού. Ακολούθως, εξετάστηκαν οι λειτουργίες των αναδιαρθρώσιμων ευφών επιφανειών και προκλήσεις που αντιμετωπίζονται με την ενσωμάτωσή τους στα δίκτυα νέας γενιάς. Στη συνέχεια, αναλύθηκε λεπτομερώς η λειτουργία των RIS και παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματά τους σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα επικοινωνιών. Εξετάστηκε επίσης η κατασκευαστική δομή των RIS, αναδεικνύοντας την επιρροή των διαφορετικών υλικών στην απόδοσή τους. Η εκτίμηση καναλιού στα συστήματα RIS αποτέλεσε το επίκεντρο της βιβλιογραφικής έρευνας, όπου παρουσιάστηκαν διάφορες μέθοδοι εκτίμησης, συμπεριλαμβανομένων κλασσικών μεθόδων, συμπιεσμένης αίσθησης, παραγοντοποίησης μητρών και βαθιάς μάθησης. Το κεφάλαιο αυτό ανέδειξε την ποικιλία των τεχνικών και των προκλήσεων που παρουσιάζονται στον τομέα της εκτίμησης καναλιού σε συστήματα RIS. Για την παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε ένα πρόγραμμα το προσομοιώνει προσομοιώνει ένα σύστημα OFDM με RIS, περνώντας από διάφορες φάσεις όπως τη δημιουργία σήματος, τη μεταφορά από τον αποστολέα στο RIS και στη συνέχεια από το RIS στο δέκτη, την εκτίμηση του καναλιού με διάφορες μεθόδους, Least-Square και MMSE, και την αξιολόγηση της απόδοσης μέσω του ρυθμού σφάλματος bit για διαφορετικά επίπεδα SNR και διαφορετικές αποστάσεις.

### 5.2. Μέλλον

Τα RIS παρουσιάζουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στο πεδίο των ασύρματων επικοινωνιών, από την απλή ενίσχυση σήματος μέχρι την εξειδίκευση της εκτίμησης καναλιού. Ο σχεδιασμός αποτελεσματικών μεθόδων εκτίμησης για το RIS, αποτελεί ενδιαφέρον πρόκληση. Επιπλέον, η αποτελεσματική ενσωμάτωση των RIS στα μελλοντικά δίκτυα νέας γενιάς απαιτεί την ανάπτυξη νέων πρωτοκόλλων και αλγορίθμων, προσφέροντας μια ενθαρρυντική προοπτική για τη συνεχή εξέλιξη του τομέα. Η παρούσα διπλωματική εργασία αναδεικνύει τη σημαντική συμβολή των αναδιαρθρώσιμων ευφών επιφανειών στο πεδίο των ασύρματων επικοινωνιών. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη σε αυτόν τον τομέα αναμένεται να διαμορφώσει το μέλλον των επικοινωνιών, επιτρέποντας την υλοποίηση προηγμένων και αποδοτικών συστημάτων για τις αναπτυσσόμενες ανάγκες της τεχνολογικής κοινότητας.



## Παράρτημα

### 6.1. Κώδικας Rayleigh

```
clear; close all; clc;

% Define parameters
% Number of OFDM symbols to simulate
numSym = 1000;
% Length of each OFDM symbol
subCarriers = 64;
% Constellation order (QAM modulation)
M = 16;
% Index of the pilot subcarrier
pilotFrequency = 4;
% Pilot energy
pilotEnergy = 1;
% Cyclic Prefix length (10% of subCarriers)
cpLength = round(subCarriers * 0.1);
% Channel length (number of taps)
L = 6;

% Generate data
data = randi([0 M-1], numSym, subCarriers);

% Modulation
dataModulated = qammod(data, M, 'UnitAveragePower', true);

% Serial to parallel
dataModulatedParallel = dataModulated.';

% Find pilot and data positions
pilotLocations = 1:pilotFrequency:subCarriers;
dataLocations = setxor(1:subCarriers,pilotLocations);

% Pilot Insertion
dataModulatedParallel(pilotLocations,:) = pilotEnergy *
dataModulatedParallel(pilotLocations,:);

% Inverse discret fourier transform (IFFT)
dataIFFT = ifft(dataModulatedParallel);

% Parallel to serial
dataIFFTSerial=dataIFFT.';

% Adding cyclic prefix/guard intervals
guardIntervals = dataIFFTSerial(:,end-cpLength+1:end);
OFDMSymbols = [guardIntervals dataIFFTSerial];

% Channel generation
% distance between TX and RX (in meters)
d = 100;
% path loss exponent
a = 3;
% transmit SNR (in dB)
transmitsSNR = 10;
% noise power (assuming unit transmit power)
noisePower = 10^(-transmitsSNR/10);
```

```

rayleighChannel = (d^(-a/2)) * sqrt(noisePower) * randn(1,L) + 1j *
randn(1,L);
h = abs(rayleighChannel);

% Normalization
h = h./norm(h);

% Frequency-Domain Channel
H = fft(h, subCarriers);

% First pass through the channel
OFDMSymbolsBStoRIS = filter(h,1,OFDMSymbols.').';

% RIS generation
reflectionCoefficients = exp(1j * angle(H));
reflectionCoefficientsMatrix = ones(subCarriers+cpLength, numSym);
reflectionCoefficientsMatrix(cpLength+1:subCarriers+cpLength, :) =
reshape(repmat(reflectionCoefficients', numSym, 1), [subCarriers,
numSym]);

% RIS reflection
OFDMSymbolsRISReflection = OFDMSymbolsBStoRIS .*
reflectionCoefficientsMatrix. ';

% Second pass through the channel
OFDMSymbolsRISToMS = filter(h, 1, OFDMSymbols.').';

% True channel power in dB
H_power_dB = 10*log10(abs(H.*conj(H)));

% Variable SNR
count = 0;
snrVector = 0:4:40;
for snrTemp = snrVector
    SNR = snrTemp + 10*log10(log2(M));
    count = count + 1;
    disp(['Loop ', num2str(count), ' out of ',
num2str(length(snrVector)), '. SNR Value ', num2str(SNR)]);
    OFDMSymbolNoChannelAWGN = awgn(OFDMSymbols, SNR, 'measured' );
    OFDMSymbolsWithChannelAWGN = awgn(OFDMSymbolsRISToMS, SNR,
'measured' ) ;

    % Remove cyclic prefix/guard intervals
    OFDMNoChannelRemovedCP =
OFDMSymbolNoChannelAWGN(:,cpLength+1:subCarriers+cpLength);
    OFDMWithChannelRemovedCP =
OFDMSymbolsWithChannelAWGN(:,cpLength+1:subCarriers+cpLength);

    % Serial to parallel
    OFDMNoChannelParallel = OFDMNoChannelRemovedCP. ';
    OFDMWithChannelParallel = OFDMWithChannelRemovedCP. ';

    % Discret Fourier transform (FFT)
    receivedFFTNoChannel = fft(OFDMNoChannelParallel);
    receivedFFTWithChannel = fft(OFDMWithChannelParallel);

    % Channel estimation

```

```

% Extracting received pilots
% transmitted pilots
TxPilots = dataModulatedParallel(pilotLocations,:);
% received pilots

RxPilots = receivedFFTWithChannel(pilotLocations,:);

% Least-Square Estimation
H_Pilot_LS= RxPilots./TxPilots;

% MMSE Estimation
for r = 1:numSym
    H_MMSE(:,r) = MMSE(RxPilots(:,r), TxPilots(:,r), subCarriers,
pilotFrequency, h, SNR);
end
% Linear/Spline Interpolation
for q = 1:numSym
    H_Data_LS(:,q) = interpolate(H_Pilot_LS(:,q).', pilotLocations,
subCarriers, 'spline');
end

% Parallel to serial
H_Data_LS_Parallel = H_Data_LS.';
H_Data_MMSE_Parallel = H_MMSE.';

% Demodulation
% No Channel
received_NoChannel = qamdemod(receivedFFTNoChannel.', M,
'UnitAveragePower', true) ;
% LS channel estimation
received_Channel_LS =
qamdemod(((receivedFFTWithChannel.')./H_Data_LS_Parallel), M,
'UnitAveragePower', true) ;
% MMSE channel estimation
received_Channel_MMSE =
qamdemod(((receivedFFTWithChannel.')./(H_Data_MMSE_Parallel)), M,
'UnitAveragePower', true) ;

% Removing Pilots from received data and original data
% removing pilots from data
data_NoPilots = data(:,dataLocations);
% removing pilots from received_NoChannel
rec_NoChannel = received_NoChannel(:,dataLocations);
% removing pilots from received_Channel_LS
rec_Channel_LS = received_Channel_LS(:,dataLocations);
% removing pilots from received_Channel_MMSE
rec_Channel_MMSE = received_Channel_MMSE(:,dataLocations);

% Calculating BER
[~, r_NoCH(count)] = symerr(data_NoPilots, rec_NoChannel) ;
[~, r_LS(count)] = symerr(data_NoPilots, rec_Channel_LS) ;
[~, r_MMSE(count)] = symerr(data_NoPilots, rec_Channel_MMSE) ;
end

% Estimated channel power in dB
H_power_esti_dB_LS =
10*log10(abs(H_Data_LS_Parallel.*conj(H_Data_LS_Parallel)));

```

```

H_power_esti_dB_MMSE =
10*log10(abs(H_Data_MMSE_Parallel.*conj(H_Data_MMSE_Parallel)));

% Plot 1 - Bit Error Rate
figure;
semilogy(snrVector,r_NoCH,'-+');
hold on;
semilogy(snrVector,r_LS,'-o');
semilogy(snrVector,r_MMSE,'-s');
legend('No Channel','LS CE');
xlabel('SNR (dB)');
ylabel('Bit Error Rate (BER)');
title('Bit Error Rate vs. SNR');
legend('No Channel', 'LS Channel Estimation', 'MMSE Channel Estimation');
grid;
hold off;

% Plot 2 - Channel Comparison
figure;
hold on;
plot(H_power_dB(1:8:end),'+k','LineWidth',3);
plot(H_power_esti_dB_LS(1,(1:8:end)),'or','LineWidth',3);
plot(H_power_esti_dB_MMSE(1,(1:8:end)),'Sb','LineWidth',1);
title('ACTUAL AND ESTIMATED CHANNELS');
xlabel('Time in samples');
ylabel('Magnitude of coefficients');
legend('Actual', 'LS Channel Estimation', 'MMSE Channel Estimation');

```

## 6.2. Κώδικας Rician

```

clear; close all; clc;

% Define parameters
% Number of OFDM symbols to simulate
numSym = 1000;
% Length of each OFDM symbol
subCarriers = 64;
% Constellation order (QAM modulation)
M = 16;
% Index of the pilot subcarrier
pilotFrequency = 4;
% Pilot energy
pilotEnergy = 1;
% Cyclic Prefix length (10% of subCarriers)
cpLength = round(subCarriers * 0.1);
% Channel length (number of taps)
L = 6;

% Generate data
data = randi([0 M-1], numSym, subCarriers);

% Modulation
dataModulated = qammod(data, M, 'UnitAveragePower', true);

% Serial to parallel
dataModulatedParallel = dataModulated.';

```

```

% Find pilot and data positions
pilotLocations = 1:pilotFrequency:subCarriers;
dataLocations = setxor(1:subCarriers,pilotLocations);

% Pilot Insertion
dataModulatedParallel(pilotLocations,:) = pilotEnergy *
dataModulatedParallel(pilotLocations,:);

% Inverse discret fourier transform (IFFT)
dataIFFT = ifft(dataModulatedParallel);

% Parallel to serial
dataIFFTSerial=dataIFFT.';

% Adding cyclic prefix/guard intervals
guardIntervals = dataIFFTSerial(:,end-cpLength+1:end);
OFDMSymbols = [guardIntervals dataIFFTSerial];

% Channel generation
% distance between TX and RX (in meters)
d = 100;
% path loss exponent
a = 3;
% transmit SNR (in dB)
transmitsSNR = 10;
% noise power (assuming unit transmit power)
noisePower = 10^(-transmitsSNR/10);
% K-factor
K = 10;
ricianChannel = (d^(-a/2)) * sqrt(noisePower) * sqrt(K/(K+1)) +
sqrt(1/(2*(K+1))) * (randn(1,L) + 1j*randn(1,L));
h = abs(ricianChannel);

% Normalization
h = h./norm(h);

% Frequency-Domain Channel
H = fft(h, subCarriers);

% First pass through the channel
OFDMSymbolsBStoRIS = filter(h,1,OFDMSymbols.').';

% RIS generation
reflectionCoefficients = exp(1j * angle(H));
reflectionCoefficientsMatrix = ones(subCarriers+cpLength, numSym);
reflectionCoefficientsMatrix(cpLength+1:subCarriers+cpLength, :) =
reshape(repmat(reflectionCoefficients', numSym, 1), [subCarriers,
numSym]);

% RIS reflection
OFDMSymbolsRISReflection = OFDMSymbolsBStoRIS .*
reflectionCoefficientsMatrix.';

% Second pass through the channel
OFDMSymbolsRISToMS = filter(h, 1, OFDMSymbols.').';

% True channel power in dB
H_power_dB = 10*log10(abs(H.*conj(H)));

```



```

% Variable SNR
count = 0;
snrVector = 0:4:40;
for snrTemp = snrVector
    SNR = snrTemp + 10*log10(log2(M));
    count = count + 1;
    disp(['Loop ', num2str(count), ' out of ',
num2str(length(snrVector)), '. SNR Value ', num2str(SNR)]);
    OFDMSymbolNoChannelAWGN = awgn(OFDMSymbols, SNR, 'measured' );
    OFDMSymbolsWithChannelAWGN = awgn(OFDMSymbolsRIStoMS, SNR,
'measured' );

    % Remove cyclic prefix/guard intervals
    OFDMNoChannelRemovedCP =
OFDMSymbolNoChannelAWGN(:, cpLength+1:subCarriers+cpLength);
    OFDMWithChannelRemovedCP =
OFDMSymbolsWithChannelAWGN(:, cpLength+1:subCarriers+cpLength);

    % Serial to parallel
    OFDMNoChannelParallel = OFDMNoChannelRemovedCP.';
    OFDMWithChannelParallel = OFDMWithChannelRemovedCP.';

    % Discret Fourier transform (FFT)
    receivedFFTNoChannel = fft(OFDMNoChannelParallel);
    receivedFFTWithChannel = fft(OFDMWithChannelParallel);

    % Channel estimation
    % Extracting received pilots
    % transmitted pilots
    TxPilots = dataModulatedParallel(pilotLocations,:);
    % received pilots

    RxPilots = receivedFFTWithChannel(pilotLocations,:);

    % Least-Square Estimation
    H_Pilot_LS= RxPilots./TxPilots;

    % MMSE Estimation
    for r = 1:numSym
        H_MMSE(:,r) = MMSE(RxPilots(:,r), TxPilots(:,r), subCarriers,
pilotFrequency, h, SNR);
    end
    % Linear/Spline Interpolation
    for q = 1:numSym
        H_Data_LS(:,q) = interpolate(H_Pilot_LS(:,q).', pilotLocations,
subCarriers, 'spline');
    end

    % Parallel to serial
    H_Data_LS_Parallel = H_Data_LS.';
    H_Data_MMSE_Parallel = H_MMSE.';

    % Demodulation
    % No Channel
    received_NoChannel = qamdmod(receivedFFTNoChannel.', M,
'UnitAveragePower', true) ;
    % LS channel estimation

```

```

    received_Channel_LS =
    gamdemod(((receivedFFTWWithChannel.')./H_Data_LS_Parallel), M,
    'UnitAveragePower', true) ;
    % MMSE channel estimation
    received_Channel_MMSE =
    gamdemod(((receivedFFTWWithChannel.')./(H_Data_MMSE_Parallel)), M,
    'UnitAveragePower', true) ;

    % Removing Pilots from received data and original data
    % removing pilots from data
    data_NoPilots = data(:,dataLocations);
    % removing pilots from received_NoChannel
    rec_NoChannel = received_NoChannel(:,dataLocations);
    % removing pilots from received_Channel_LS
    rec_Channel_LS = received_Channel_LS(:,dataLocations);
    % removing pilots from received_Channel_MMSE
    rec_Channel_MMSE = received_Channel_MMSE(:,dataLocations);

    % Calculating BER
    [~, r_NoCH(count)] = symerr(data_NoPilots, rec_NoChannel) ;
    [~, r_LS(count)] = symerr(data_NoPilots, rec_Channel_LS) ;
    [~, r_MMSE(count)] = symerr(data_NoPilots, rec_Channel_MMSE) ;
end

% Estimated channel power in dB
H_power_esti_dB_LS =
10*log10(abs(H_Data_LS_Parallel.*conj(H_Data_LS_Parallel)));
H_power_esti_dB_MMSE =
10*log10(abs(H_Data_MMSE_Parallel.*conj(H_Data_MMSE_Parallel)));

% Plot 1 - Bit Error Rate
figure;
semilogy(snrVector,r_NoCH,'-+');
hold on;
semilogy(snrVector,r_LS,'-o');
semilogy(snrVector,r_MMSE,'-s');
legend('No Channel', 'LS CE');
xlabel('SNR (dB)');
ylabel('Bit Error Rate (BER)');
title('Bit Error Rate vs. SNR');
legend('No Channel', 'LS Channel Estimation', 'MMSE Channel
Estimation');
grid;
hold off;

% Plot 2 - Channel Comparison
figure;
hold on;
plot(H_power_dB(1:8:end), '+k', 'LineWidth', 3);
plot(H_power_esti_dB_LS(1, (1:8:end)), 'or', 'LineWidth', 3);
plot(H_power_esti_dB_MMSE(1, (1:8:end)), 'Sb', 'LineWidth', 1);
title('ACTUAL AND ESTIMATED CHANNELS');
xlabel('Time in samples');
ylabel('Magnitude of coefficients');
legend('Actual', 'LS Channel Estimation', 'MMSE Channel Estimation');

```

## 6.2. MMSE

```
function H_MMSE = MMSE(RxP,TxP,N,pilotFrequency,h_CIR,SNR)
% MIMO-OFDM Wireless
% Communications with MATLAB, Yong Soo Cho, Jaekwon Kim,
% Won Young Yang and Chung G. Kang
%2010 John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd
noiseVar = 10^(SNR*0.1);
Np=N/pilotFrequency; % Number of Pilots
H_LS = RxP./TxP; % LS estimate
k=0:length(h_CIR)-1;
hh = h_CIR*h_CIR';
% tmp = h_CIR.*conj(h_CIR).*k;
r = sum(h_CIR.*conj(h_CIR).*k)/hh;
r2 = (h_CIR.*conj(h_CIR).*k)*k./hh;
t_rms = sqrt(r2-r^2); % rms delay
D = 1j*2*pi*t_rms/N; % Denominator of Eq. (6.16) page 192
K1 = repmat([0:N-1].',1,Np);
K2 = repmat([0:Np-1],N,1);
rf = 1./(1+D*(K1-K2*pilotFrequency));
K3 = repmat([0:Np-1].',1,Np);
K4 = repmat([0:Np-1],Np,1);
rf2 = 1./(1+D*pilotFrequency*(K3-K4));
Rhp = rf;
Rpp = rf2 + eye(length(H_LS),length(H_LS))/noiseVar;
H_MMSE = transpose(Rhp*inv(Rpp)*H_LS); % MMSE channel estimate
```

## 6.2. Interpolation

```
function H_interpolated = interpolate(H_est,pilot_loc,Nfft,method)
% Input: H_est = Channel estimate using pilot sequence
% pilot_loc = location of pilot sequence
% Nfft = FFT size
% method = 'linear'/'spline'
% Output: H_interpolated = interpolated channel
%MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB, Yong Soo Cho, Jaekwon
Kim, Won Young Yang and Chung G. Kang
%2010 John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd
if pilot_loc(1)>1
slope = (H_est(2)-H_est(1))/(pilot_loc(2)-pilot_loc(1));
H_est = [H_est(1)-slope*(pilot_loc(1)-1) H_est];
pilot_loc = [1 pilot_loc];
end
if pilot_loc(end)<Nfft
slope = (H_est(end)-H_est(end-1))/(pilot_loc(end)-pilot_loc(end-1));
H_est = [H_est H_est(end)+slope*(Nfft-pilot_loc(end))];
pilot_loc = [pilot_loc Nfft];
end
if lower(method)=='linear'
H_interpolated = interp1(pilot_loc,H_est,1:Nfft);
else
H_interpolated = interp1(pilot_loc,H_est,1:Nfft,'spline');
end
```



## Αναφορές

- 1 Beixiong Zheng , Member, IEEE, Changsheng You , Member, IEEE, Weidong Mei , Member, IEEE, and Rui Zhang , Fellow, IEEE, “A Survey on Channel Estimation and Practical Passive Beamforming Design for Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Communications”, IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 24, NO. 2, SECOND QUARTER 2022
- 2 WEI JIANG (Senior Member, IEEE), BIN HAN (Member, IEEE), MOHAMMAD ASIF HABIBI , AND HANS DIETER SCHOTTEN (Member, IEEE), “The Road Towards 6G: A Comprehensive Survey” Digital Object Identifier 10.1109/OJCOMS.2021.3057679, Received 25 January 2021; accepted 31 January 2021. Date of publication 8 February 2021; date of current version 24 February 2021
- 3 BBC Wales, “Macroni’s Waves”, Archived from the original on 20 January 2007. Retrieved 20 January 2007.
- 4 MARCO DI RENZO (Fellow, IEEE), KONSTANTINOS NTONTIN (Member, IEEE), JIAN SONG, FADIL H. DANUFANE1, XUEWEN QIAN, FOTIS LAZARAKIS, JULIEN DE ROSNY, DINH-THUY PHAN-HUY (Member, IEEE), OSVALDO SIMEONE (Fellow, IEEE), RUI ZHANG (Fellow, IEEE), MEROAUNE DEBBAH (Fellow, IEEE), GEOFFROY LEROSEY, MATHIAS FINK (Member, IEEE), SERGEI TRETAKOV (Fellow, IEEE), AND SHLOMO SHAMAI (Life Fellow, IEEE), “Reconfigurable Intelligent Surfaces vs. Relaying: Differences, Similarities, and Performance Comparison”, Digital Object Identifier 10.1109/OJCOMS.2020.3002955, Received 3 May 2020; revised 26 May 2020; accepted 11 June 2020. Date of publication 16 June 2020; date of current version 1 July 2020
- 5 A. F. M. Shahen Shah, Department of Electronics and Communication Engineering, Yildiz Technical University, “A Survey From 1G to 5G Including the Advent of 6G: Architectures, Multiple Access Techniques, and Emerging Technologies”
- 6 Mohammad Meraj ud in Mir et al, “Evolution of Mobile Wireless Technology from 0G to 5G”, (IJCSIT) International Journal of Computer Science and Information Technologies, Vol. 6 (3) , 2015, 2545-2551
- 7 José A. del Peral-Rosado , Member, IEEE, Ronald Raulefs , Member, IEEE, José A. López-Salcedo , Senior Member, IEEE, and Gonzalo Seco-Granados , Senior Member, IEEE, “Survey of Cellular Mobile Radio Localization Methods: From 1G to 5G”, IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 20, NO. 2, SECOND QUARTER 2018
- 8 Qazi Kamal Ud Din Arshad, Dr. Ahsan Ullah Kashif, Dr. Ijaz Mansoor Quershi, “A Review on the Evolution of Cellular Technologies”, Proceedings of 2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology (IBCAST) Islamabad, Pakistan, 8th – 12th January, 2019
- 9 Pavel Tulupov, Boris Sorokin, Anatoliy Korolev, “Coverage impact of reconfigurable intelligent surfaces in 6G mobile networks”, Proc. of the International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET 2022) 20-22 July 2022, Prague- Czech Republic
- 10 Cunhua Pan, Hong Ren, Kezhi Wang, Jonas Florentin Kolb, Maged Elkaslan, Ming Chen, Marco Di Renzo, Yang Hao, Jiangzhou Wang, A. Lee Swindlehurst, Xiaohu You, and Lajos Hanzo, “Reconfigurable Intelligent Surfaces for 6G Systems: Principles, Applications, and Research Directions”, IEEE Communications Magazine June 2021
- 11 Yuanwei Liu , Senior Member, IEEE, Xiao Liu , Graduate Student Member, IEEE, Xidong Mu , Graduate Student Member, IEEE, Tianwei Hou , Jiaqi Xu , Student Member, IEEE, Marco Di Renzo , Fellow, IEEE, and Naofal Al-Dhahir, Fellow, IEEE, “Reconfigurable Intelligent Surfaces: Principles and Opportunities”, IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 23, NO. 3, THIRD QUARTER 2021
- 12 Zijian Zhang , Student Member, IEEE, Linglong Dai , Fellow, IEEE, Xibi Chen , Student Member, IEEE, Changhao Liu , Graduate Student Member, IEEE, Fan Yang , Fellow, IEEE, Robert Schober , Fellow, IEEE, and H. Vincent Poor , Life Fellow, IEEE, “Active RIS vs. Passive RIS: Which Will Prevail in 6G?”, IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, VOL. 71, NO. 3, MARCH 2023

- 13 Zhendong, Mao, Mugen, Peng, Xiqing, Liu, “Channel Estimation for Reconfigurable Intelligent Surface Assisted Wireless Communication Systems in Mobility Scenarios”, State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China
- 14 Fengyuan Yang, Prakash Pitchappa, Nan Wang, “Terahertz Reconfigurable Intelligent Surfaces (RISs) for 6G Communication Links”, *Micromachines* 2022, 13, 285
- 15 Randy Matos, Nezih Pala, “VO2-based ultra-reconfigurable intelligent reflective surface for 5G applications”, *Scientific Reports* | (2022) 12:4497
- 16 Stamatia F. Drampalou, Nikolaos I. Miridakis , Helen C. Leligou and Panagiotis A. Karkazis, “A Survey on Optimal Channel Estimation Methods for RIS-Aided Communication Systems”, *Signals* 2023, 4, 208–234
- 17 Ismail Shah, Hina Naz, Sajid Ali, Amani Almohaimeed, Showkat Ahmad Lone, “A New Quantile-Based Approach for LASSO Estimation”, *Mathematics* 2023, 11, 1452
- 18 R Gayathri<sup>1</sup> , T Perarasi<sup>2</sup> , S Saranya<sup>3</sup> , S Harikirubha<sup>4</sup> and K Roobin, “Analysis of LSE and MMSE Pilot Based Channel Estimation Techniques for MIMO-OFDM System”, R Gayathri et al 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1084 012042
- 19 Yu Liu, Fanggan Wang, “Blind Channel Estimation and Data Detection with Unknown Modulation and Coding Scheme”, arXiv:1909.11306