



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Επιλογή και διαμόρφωση έξυπνης επιφάνειας με
δυνατότητα αναδιαμόρφωσης για ολοκληρωμένα
δίκτυα ανίχνευσης και επικοινωνίας

Διπλωματική Εργασία
του
Συμεών Α. Βαϊδάνη

Επιβλέπων: Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα Μάιος 2023



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής

Επιλογή και διαμόρφωση έξυπνης επιφάνειας με δυνατότητα αναδιαμόρφωσης για ολοκληρωμένα δίκτυα ανίχνευσης και επικοινωνίας

Διπλωματική Εργασία
του
Συμεών Α. Βαϊδάνη

Επιβλέπων: Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 23η Μαΐου 2023.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γεώργιος Ματσόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ιωάννα Ρουσσάκη
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
Ε.Μ.Π.

Αθήνα Μάιος 2023



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής

(Υπογραφή)

.....

ΣΥΜΕΩΝ Α. ΒΑΪΔΑΝΗΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Συμεών Α. Βαϊδάνης, 2023.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Στον αναδυόμενο τομέα των ασυρμάτων επικοινωνιών 6^{ης} γενιάς, η ενσωμάτωση της ανίχνευσης και της επικοινωνίας γίνεται όλο και πιο σημαντική. Η τεχνολογία Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) είναι μια νέα τεχνολογία στον χώρο των ασυρμάτων επικοινωνιών που χρησιμοποιεί ένα μεγάλο αριθμό παθητικών ανακλαστικών στοιχείων για να ελέγξει τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ελέγχοντας τον πίνακα μετατόπισης φάσης του RIS, μπορούμε να βελτιώσουμε την ποιότητα του σήματος και να ενισχύσουμε την αξιοπιστία της ασύρματης επικοινωνίας, καθώς και να παρέχουμε υψηλότερη ακρίβεια στον εντοπισμό - ανίχνευση. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, διερευνούμε τη δυνατότητα της τεχνολογίας RIS στο πλαίσιο της ενσωμάτωσης της ανίχνευσης και της επικοινωνίας στο 6G. Συζητούμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της τεχνολογίας RIS ως ραδιοπύρο πολλαπλής προσπέλασης, καθώς και τις δυνατότητες βελτίωσης του RIS με βάση τα φαινόμενα απωλειών μεγάλης κλίμακας για την ανίχνευση και τη λειτουργία επικοινωνίας. Επίσης, εξετάζουμε τη βελτιστοποίηση του εύρους κάλυψης ενός RIS, τη βελτιστοποίηση της τοπολογίας του RIS σε δεδομένο κυψελωτό σύστημα και προτείνουμε έναν αλγόριθμο αυτόματης μάθησης για την συσχέτιση των χρηστών με τα RIS. Αυτή η μελέτη θα προσφέρει μια βαθιά κατανόηση της τεχνολογίας RIS και της σημασίας της στην επόμενη γενιά των ασύρματων επικοινωνιών.

Λέξεις Κλειδιά

Έξυπνη Επαναπρογραμματιζόμενη Επιφάνεια, Δίκτυα 6^{ης} γενιάς, Δίκτυα ανίχνευσης και επικοινωνίας, Βελτιστοποίηση τοπολογίας, Βελτιστοποίηση πινάκων μετατόπισης φάσης, Στοιχειοκεραίες

Abstract

In the emerging field of wireless communications of the 6th generation, the integration of sensing and communication is becoming increasingly important. Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) technology is a new technology in the field of wireless communications that utilizes a large number of passive reflective elements to control the propagation of electromagnetic waves. By controlling the phase-shifting matrix of the RIS, we can improve signal quality, enhance wireless communication reliability, and provide higher accuracy in sensing. In this dissertation, we explore the potential of RIS technology in integrating sensing and communication in the context of 6G. We discuss the advantages and disadvantages of RIS technology as a multiple access radio-source, as well as the possibilities of improving RIS based on large-scale fading phenomena for sensing and communication operation. Additionally, we examine the optimization of coverage range of an RIS, the topology optimization of an RIS in a given cellular system, and propose a automata learning algorithm for user association with RIS. This study will provide a deep understanding of RIS technology and its significance in the next generation of wireless communications.

Keywords

Reconfigurable Intelligent Surface, 6th Generation Networks, Integrated Sensing and Communication Networks, Topology Optimization, Phase Shift Array Optimization, Antenna arrays

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Συμεών Παπαβασιλείου και τους υποψήφιους διδάκτορες Μαρία Διαμαντή και Παναγιώτη Χαρατσάρη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν, αναθέτοντάς μου την παρούσα διπλωματική εργασία και για την πολύτιμη υποστήριξή του σε αυτό το βήμα της ακαδημαϊκής μου πορείας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου Παναγιώτη Κωττή, Γεώργιο Φικιώρη, Θεοδώρα Κακλαμάνη, Εμμανουήλ Βαρβαρίγο, τους υποψήφιους διδάκτορες Βασίλη Λιακώνη και Χρήστο Δήμα για όλα τα εφόδια και την στήριξη που μου προσέφεραν αυτά τα 5 χρόνια. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον καθηγητή κύριο Αθανάσιο Παναγόπουλο για μεταλαμπάδευση του τρόπου σκέψης ενός μηχανικού και για τις ακαδημαϊκές - και όχι μόνο - συζητήσεις που κάναμε. Στους φίλους μου, στους συνοδοιπόρους, στους συνταξιδιώτες και συναγωνιστές μου. Στην θρυλική ομάδα υποστήριξης αυτού του εγχειρήματος: στους γονείς και την αδερφή μου για την υποστήριξη τους σε όλες τις δυσκολίες που περάσαμε και για την υπομονή τους στις ιδιαιτερότητές μου.

Στον Βραχνό Προφήτη

Κάθε που βγαίνει ο Αποσπερίτης ξεκινάμε με μια τράτα για ένα καινούργιο ταξίδι. Ξεκινώντας για την κάτω Ιταλία, τραβάμε πρώτα για τον Τύρναβο και την άκαρπη Μελούνα. Εκεί η γή είναι απάτητη και τα δέντρα θα μας καλοσωρίσουν φτιάχνοντας μας προσκεφάλη με κάπαρη, με ρίγανη, με μέντα και θυμάρι. Αφότου ξαπωσάσουμε, θα συνεχίσουμε για την Βόλια Κάλντα. Εκεί το νερό με νερό δε μοιάζει, απ' το πουθενά πηγάζει κι απ' την άβυσσο. Στον δρόμο προς την Βολιβία για την συνάντησή μας με τον Ραμόν, να θυμηθούμε να ανοίξουμε λίγο πριν χαράξει τις πύλες της Βαστίλης για να βγούνε εκείνοι που τους πατάν στα αλήθεια τα πόδια τους τα ίδια. Έπειτα, αφού συμβουλευτούμε χάρτες μερκατορικούς, βάζουμε πλώρη με την μπρατσέρα για την Ανδρομέδα και μόλις νυχτώσει κατευθυνόμαστε προς τον Βέγγα, τον Ντενέμπ και τον Αλτάιρ για να συναντήσουμε τον Βραχνό Προφήτη. Μόλις ξεκινάει να ξεπροβάλει ξανά το άστρο του πρωινού επιστρέφουμε στον Όλυμπο, εκεί όπου αέρας Πεχλιβάνης και ένας ερμητικός Σιμούν θα μας βγάλουν από την ραστώνη της λήθης, θα δώσουν χρώμα και ζωή στις μοναξιάς τον κήπο και θα μας δώσουν για φυλαχτό το χαμένο όνειρο του ναύτη της Κροστάνδης.

Στον Μαέστρο, για εκείνη την πρώτη συνάντησή με τον φτωχό ΒΒ, την Ρόζα και τον Φεντερίκο στην γη της Μαυριτανίας. Για τα ποιήματα του Άλκη Αλκαίου που ήταν πνοή ζωής για όλα τα εμπόργκα που βιώσαμε. Για εκείνα τα τροπάρια για φονιάδες και τον Άμλετ της Σελήνης του Μάνου Ελευθερίου. Για το ρίγος που μας έδωσες όταν ακούσαμε εκείνη την κατάντα για το πέτρινο νησί του Γιάννη Ρίτσου. Για εκείνους τους στίχους του Μαγιακόφσκι που μελοποίησες: 'Ξελασπώστε το μέλλον', 'Η τέχνη δεν πρέπει ν' αντανάκλα σαν τον καθρέφτη, μα σαν φακός να μεγεθύνει'. Για την συνάντησή με τον γέρο της Αλεξάνδρειας και τον Φρανσουά Βιγιόν. Μα πάνω απ' όλα για εκείνον τον Μικρόκοσμο του Ναζίμ Χικμέτ και εκείνο τον απόπλου με το επιβαταγωγό Cyrenia παρέα με τους 7 νάνους, τον αρμενιστή ποιητή και με σύνθημα "Λυπήσου εκείνους που δεν ονειρεύονται".

Στον Οδυσσέα, 'Με μια πίστη μισή και στο χέρι μια ευχή, λίγη άμμο απ' τις ακρογιαλιές μου'. Στον Χρόνη, 'Το κλειδί που κρύβεται κάτω από το γεράνι δεν είναι σαν όλα τα κλειδιά. Ανοίγει την πόρτα σ' έναν άλλο κόσμο, κατοικημένον από ευτυχημένους δραπέτες, που μακριά από την παγίδα του «πολιτισμού», ζουν αρμονικά με τη φύση και τον εαυτό τους'.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	11
1.1	Πρόλογος	11
1.2	Σχετική έρευνα	12
1.3	Δομή της Διπλωματικής Εργασίας	13
2	Θεωρητικό υπόβαθρο	14
2.1	Προγραμματιζόμενες Έξυπνες Επιφάνειες (RISs)	14
2.1.1	Γενικές αρχές λειτουργίας	14
2.1.2	Τρόποι υλοποίησης	14
2.1.3	Σενάρια εφαρμογής RIS	15
2.2	Στοιχειοκεραίες	17
2.3	Μοντελοποίηση καναλιού με διαλείψεις	18
2.3.1	Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (Large Scale Fading)	18
2.3.2	Διαλείψεις μικρής κλίμακας (Small Scale Fading)	19
2.4	Πρωτόκολλα πολλαπλής προσπέλασης διαύλου	23
2.4.1	Ορθογωνικά Σχήματα Πολλαπλής Προσπέλασης (OMA)	23
2.4.2	Σχήματα Πολλαπλής Προσπέλασης Διαίρεσης Χώρου (SDMA)	24
2.4.3	Σχήμα Μη Ορθογωνικής Πολλαπλής Προσπέλασης (NOMA)	25
2.5	Εισαγωγή στο Automata Learning	25
2.5.1	Βασικές εξισώσεις Automata Learning	26
2.5.2	Παρουσίαση εκδοχών Automata Learning	26
2.5.3	Σύγκλιση αλγορίθμου Automata Learning	27
2.5.4	Αλγόριθμος Automata Learning για πολλαπλούς χρήστες με κοινό σύνολο ενεργειών	28
3	Μοντελοποίηση συστήματος	29
3.1	Γενικά χαρακτηριστικά τοπολογίας	29
3.1.1	Συχνότητα και εύρος ζώνης λειτουργίας	29
3.1.2	Γενικά χαρακτηριστικά της τοπολογίας προς προσομοίωση	30
3.2	Μοντελοποίηση καναλιού κατά 3GPP	31
3.3	Περιγραφή του συστήματος μέσω εξισώσεων	32
3.3.1	Παρουσίαση της κεντρικής εξίσωσης του συστήματος	32
3.3.2	Ανάλυση της απευθείας διαδρομή	32
3.3.3	Ανάλυση της διαδρομή μέσω ανάκλασης	33
3.4	Μοντελοποίηση καταστάσεων λειτουργίας	35
3.4.1	Μοντέλο αντίχνησης (sensing model)	35
3.4.2	Μοντέλο επικοινωνίας (communication model)	35

4	Προσομοίωση συστήματος	37
4.1	Μελέτη RIS υπό συνθήκες διαλείψεων μεγάλης κλίμακας και 1:1 συσχέτιση με χρήστη	37
4.1.1	Γραφική παρουσίαση του μοντέλου απωλειών μεγάλης κλίμακας της 3GPP	37
4.1.2	Μελέτη του εύρους τιμών της επιτεύξιμης βελτίωσης στο performance των χρηστών	41
4.1.3	Μελέτη βελτίωσης συναρτήσει του πλήθους των στοιχείων του RIS	45
4.2	Μελέτη RIS ως στοιχειοκεραία	47
4.2.1	Επίδραση παράγοντα διάταξης στο improvement λόγω χρήσης RIS	47
4.2.2	Διακύμανση λόγω γωνιακής απόκλισης της βελτίωσης με χρήση RIS	50
4.2.3	Μελέτη της γωνίας εισόδου/εξόδου στο RIS	56
4.3	Βελτιστοποίηση γωνιακών μετατοπίσεων RIS και τομεοποίηση	58
4.3.1	Διατύπωση προβλήματος βελτιστοποίησης	58
4.3.2	Μελέτη τομεοποίησης στην περιοχή κάλυψης του RIS	60
4.4	Προσομοίωση συστήματος με λόγο συσχέτισης χρηστών με RIS 1:N	70
4.5	Βελτιστοποίηση τοπολογίας των RIS βάσει προδιαγραφών	78
4.6	Μελέτη αλγορίθμου Automata Learning για σύστημα συσχέτιση χρηστών με RIS R:N	81
5	Σύνοψη	90

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Γενικό σενάριο εφαρμογής RIS με χρήση ενισχυτικής συμβολής στον δέκτη	15
2.2	Υλοποίηση RIS με χρήση Μετα-Επιφανειών	16
2.3	Σενάριο εφαρμογής RIS για δημιουργία νέου μονοπατιού προς αποφυγή εμποδίου . .	16
4.1	Μοντέλο μεγάλων απωλειών σύμφωνα με την οδηγία της 3GPP για το κανάλι μεταξύ <i>UE</i> και <i>RIS</i>	38
4.2	Μοντέλο μεγάλων απωλειών σύμφωνα με την οδηγία της 3GPP για το κανάλι μεταξύ <i>UE</i> και <i>Target</i>	38
4.3	Μοντέλο μεγάλων απωλειών σύμφωνα με την οδηγία της 3GPP για το κανάλι μεταξύ <i>UE</i> και <i>Base Station</i>	39
4.4	Μοντέλο μεγάλων απωλειών σύμφωνα με την οδηγία της 3GPP για το κανάλι μεταξύ <i>RIS</i> και <i>Target</i>	39
4.5	Μοντέλο μεγάλων απωλειών σύμφωνα με την οδηγία της 3GPP για το κανάλι μεταξύ <i>RIS</i> και <i>Base Station</i>	40
4.6	Απώλειες διάδοσης (μπλε), μέγιστη τιμή εξασθένισης (πορτοκαλί), ελάχιστη τιμή εξασθένισης (χίτρινο) για καθένα από τους διαύλους <i>UE</i> → <i>RIS</i> , <i>UE</i> → <i>Base Station</i> , <i>UE</i> → <i>Target</i> , <i>RIS</i> → <i>Base Station</i> και <i>RIS</i> → <i>Target</i>	44
4.7	Βελτίωση υπό συνθήκες 1:1 και Path Loss	44
4.8	Βελτίωση υπό συνθήκες 1:1, Path Loss και Shadowing (μέγιστη τιμή λόγω shadowing)	45
4.9	Βελτίωση υπό συνθήκες 1:1, Path Loss και Shadowing (ελάχιστη τιμή λόγω shadowing)	45
4.10	Απώλειες διάδοσης για καθένα από τους διαύλους <i>UE</i> → <i>RIS</i> , <i>UE</i> → <i>Base Station</i> , <i>UE</i> → <i>Target</i> , <i>RIS</i> → <i>Base Station</i> , <i>RIS</i> → <i>Target</i>	46
4.11	: Βελτίωση υπό συνθήκες 1:1 και Path Loss για $M = 169$	46
4.12	Βελτίωση υπό συνθήκες 1:1, Path Loss, χειρότερου απευθείας μονοπατιού συναρτήσεων του πλήθους των στοιχείων του RIS	47
4.13	Βελτίωση sensing mode συναρτήσεων της διαφορά των συνημίτονων των γωνιών εξόδου και εισόδου για αξονικό RIS	48
4.14	Βελτίωση communication mode συναρτήσεων της διαφορά των συνημίτονων των γωνιών εξόδου και εισόδου για αξονικό RIS	48
4.15	Διαφορά (%) βελτίωσης μεταξύ των δύο καταστάσεων λειτουργίας για αξονικό RIS	49
4.16	CDF της βελτίωσης λόγω χρήσης του RIS για ομοιόμορφη κατανομή της διαφοράς επιθυμητής και υπάρχουσας γωνιακής μετατόπισης των στοιχείων του RIS	52
4.17	Εστίαση στο Σχήμα 4.16	52
4.18	Εστίαση στο Σχήμα 4.17	53
4.19	CDF της βελτίωσης λόγω χρήσης του RIS για κανονική κατανομή μηδενικής μέσης τιμής της διαφοράς επιθυμητής και υπάρχουσας γωνιακής μετατόπισης των στοιχείων του RIS	53
4.20	Εστίαση στο Σχήμα 4.19	54
4.21	Εστίαση στο Σχήμα 4.20	54

4.22	CDF της βελτίωσης λόγω χρήσης του RIS για κανονική κατανομή μη μηδενικής μέσης τιμής της διαφοράς επιθυμητής και υπάρχουσας γωνιακής μετατόπισης των στοιχείων του RIS	55
4.23	Εστίαση στο Σχήμα 4.22	55
4.24	Εστίαση στο Σχήμα 4.23	56
4.25	Συνημίτονο γωνίας εισόδου στο RIS (χρήση συνάρτησης contour – δυναμικών γραμμών). Με διακεκομμένη μαύρη γραμμή παρουσιάζεται το μέγιστο δυνατό εύρος κάλυψης του RIS και με συνεχ μαύρη γραμμή η ευθεία $y = x$ προς εμφάνιση της απόκλισης δισδιάστατης και τρισδιάστατης γωνίας.	57
4.26	Εστίαση του Σχήματος 4.25 στην περιοχή απόστασης από το RIS μικρότερης των $10m$	57
4.27	Συνημίτονο γωνίας εισόδου στο RIS (χρήση συνάρτησης surf) για απόσταση μεγαλύτερη των $10m$ από το RIS	58
4.28	Προτεινόμενη τοπολογία. Εντός του μπλε πλαισίου σημειώνεται η περιοχή κάλυψης του RIS, εντός κόκκινου πλαισίου η περιοχή στην οποία μπορεί να βρίσκονται τα Targets, με πράσινο χρώμα σημειώνεται η θέση του RIS και με κίτρινο χρώμα η θέση του Base Station.	61
4.29	Συνημίτονο γωνίας εισόδου στο RIS (χρήση δυναμικών γραμμών)	62
4.30	Μεταβολή ακτίνας για γωνία αναφορά $\pi/6 rad$ και γωνιακό εύρος κάλυψης $\pi/18 rad$	63
4.31	Μεταβολή ακτίνας για γωνία αναφορά $2\pi/9 rad$ και γωνιακό εύρος κάλυψης $\pi/18 rad$	63
4.32	Μεταβολή ακτίνας για γωνία αναφορά $5\pi/18 rad$ και γωνιακό εύρος κάλυψης $\pi/18 rad$	63
4.33	Μεταβολή ακτίνας για γωνία αναφορά $\pi/3 rad$ και γωνιακό εύρος κάλυψης $\pi/18 rad$	64
4.34	Μεταβολή της γωνίας αναφοράς για σταθερή ακτίνα $10m$ και γωνιακό εύρος κάλυψης $\pi/18 rad$	64
4.35	εταβολή της γωνίας αναφοράς για σταθερή ακτίνα $20m$ και γωνιακό εύρος κάλυψης $\pi/18 rad$	65
4.36	εταβολή της γωνίας αναφοράς για σταθερή ακτίνα $30m$ και γωνιακό εύρος κάλυψης $\pi/18 rad$	65
4.37	εταβολή της γωνίας αναφοράς για σταθερή ακτίνα $40m$ και γωνιακό εύρος κάλυψης $\pi/18 rad$	66
4.38	Μεταβολή του γωνιακού εύρους κάλυψης για σταθερή ακτίνα $10m$ και γωνία αναφοράς $\pi/6 rad$	66
4.39	Μεταβολή του γωνιακού εύρους κάλυψης για σταθερή ακτίνα $10m$ και γωνία αναφοράς $2\pi/9 rad$	67
4.40	Μεταβολή του γωνιακού εύρους κάλυψης για σταθερή ακτίνα $30m$ και γωνία αναφοράς $\pi/6 rad$	67
4.41	Μεταβολή του γωνιακού εύρους κάλυψης για σταθερή ακτίνα $30m$ και γωνία αναφοράς $2\pi/9 rad$	68
4.42	Σταθερό μήκος τόξου $10\pi/9m$ για γωνία αναφοράς $\pi/6 rad$	68
4.43	Σταθερό μήκος τόξου $10\pi/9m$ για γωνία αναφοράς $2\pi/9 rad$	69
4.44	Σταθερό μήκος τόξου $10\pi/9m$ για γωνία αναφοράς $5\pi/18 rad$	69
4.45	Σταθερό μήκος τόξου $10\pi/9m$ για γωνία αναφοράς $\pi/3 rad$	70
4.47	Διάγραμμα βελτίωσης για μετρική Mutual Information συναρτήσει της διαφορά γωνιών εισόδου/εξόδου από το RIS (προσομοίωση ίδιου <i>individual improvement A/A 1</i>)	72
4.46	Σύγκριση <i>individual</i> και <i>total</i> βελτίωσης καθώς και διαφορά γωνιών εισόδου/εξόδου από το RIS για κάθε χρήστη (προσομοίωση ίδιου <i>individual improvement A/A 1</i>)	72
4.48	Διάγραμμα βελτίωσης για μετρική Bit Rate συναρτήσει της διαφορά γωνιών εισόδου/εξόδου από το RIS (προσομοίωση ίδιου <i>individual improvement A/A 1</i>) .	73
4.49	Διάγραμμα διαφοράς βελτιώσεων (%) για χρήση των δύο διαφορετικών μετρικών συναρτήσει της διαφοράς γωνιών εισόδου/εξόδου από το RIS (προσομοίωση ίδιου <i>individual improvement A/A 1</i>)	73

4.50 Σύγκριση <i>individual</i> και <i>total</i> βελτίωσης καθώς και διαφορά γωνιών εισόδου/εξόδου από το RIS για κάθε χρήστη (προσομοίωση ίδιου <i>individual improvement</i> A/A 2)	74
4.51 Διάγραμμα βελτίωσης για μετρική Mutual Information συναρτήσει της διαφοράς γωνιών εισόδου/εξόδου από το RIS (προσομοίωση ίδιου <i>individual improvement</i> A/A 2)	74
4.52 Διάγραμμα βελτίωσης για μετρική Bit Rate συναρτήσει της διαφοράς γωνιών εισόδου/εξόδου από το RIS (προσομοίωση ίδιου <i>individual improvement</i> A/A 2)	75
4.53 Διάγραμμα διαφοράς βελτιώσεων (%) για χρήση των δύο διαφορετικών μετρικών συναρτήσει της διαφοράς γωνιών εισόδου/εξόδου από το RIS (προσομοίωση ίδιου <i>individual improvement</i> A/A 2)	75
4.54 Σύγκριση <i>individual</i> και <i>total</i> βελτίωσης καθώς και διαφοράς γωνιών εισόδου/εξόδου από το RIS για κάθε χρήστη (προσομοίωση διαφορετικού <i>individual improvement</i> A/A 1)	76
4.55 Σύγκριση <i>individual</i> και <i>total</i> βελτίωσης και παρουσίαση της τιμής του constraint για κάθε χρήστη (προσομοίωση διαφορετικού <i>individual improvement</i> A/A 1)	76
4.56 Σύγκριση <i>individual</i> και <i>total</i> βελτίωσης καθώς και διαφοράς γωνιών εισόδου/εξόδου από το RIS για κάθε χρήστη (προσομοίωση διαφορετικού <i>individual improvement</i> A/A 2)	77
4.57 Σύγκριση <i>individual</i> και <i>total</i> βελτίωσης και παρουσίαση της τιμής του constraint για κάθε χρήστη (προσομοίωση διαφορετικού <i>individual improvement</i> A/A 2)	77
4.58 Περιοχή προς βέλτιστη τοποθέτηση RIS. Τομέας κυψέλης προς μελέτη (μπλε), περιοχή κάλυψης (κόκκινο), πιθανές θέσεις RIS (μαύρο)	79
4.59 Διαδικασία επίλυσης προβλήματος ακέραιας γραμμικής βελτιστοποίησης για βέλτιστη τοποθέτηση RIS	80
4.60 Βέλτιστη επιλογή θέσεων RIS για κάλυψη της περιοχής μελέτης	80
4.61 Περιοχή προς μελέτη στο Κεφάλαιο 4.6. Με βέλη παρουσιάζονται οι θέσεις των RIS, οι κατευθύνσεις των αξόνων τους και με ίδιο χρωματικό κώδικα (πράσινο, γαλάζιο, ροζ) οι περιοχές κάλυψης. Με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι χρήστες.	81
4.62 Παρουσίαση <i>individual</i> και <i>total improvement</i> για κάθε χρήστη ανάλογα με το RIS που έχει συσχετιστεί με συσχετισμό χρήστη-RIS βάσει καλύτερου SNR	83
4.63 Παρουσίαση διαφοράς γωνιών εισόδου/εξόδου από RIS για κάθε χρήστη με συσχετισμό χρήστη-RIS βάσει καλύτερου SNR	83
4.64 Παρουσίαση συσχετισμών UE – RIS (για RIS A/A 1), UE-Object βάση κατάστασης λειτουργίας με συσχετισμό χρήστη-RIS βάσει καλύτερου SNR	84
4.65 Παρουσίαση συσχετισμών UE – RIS (για RIS A/A 2), UE-Object βάση κατάστασης λειτουργίας με συσχετισμό χρήστη-RIS βάσει καλύτερου SNR	84
4.66 Παρουσίαση συσχετισμών UE – RIS (για RIS A/A 3), UE-Object βάση κατάστασης λειτουργίας με συσχετισμό χρήστη-RIS βάσει καλύτερου SNR	85
4.67 Παρουσίαση <i>individual</i> και <i>total improvement</i> για κάθε χρήστη ανάλογα με το RIS που έχει συσχετιστεί ύστερα από εφαρμογή αλγορίθμου Automata Learning με συλλογικό κέρδος	85
4.68 Συγκριτική παρουσίαση <i>individual</i> και <i>total improvement</i> για όλους τους χρήστες με συσχετισμό χρήστη-RIS βάσει αλγορίθμου Automata Learning με συλλογικό κέρδος	86
4.69 Παρουσίαση <i>individual</i> και <i>total improvement</i> για κάθε χρήστη ανάλογα με το RIS που έχει συσχετιστεί ύστερα από εφαρμογή αλγορίθμου Automata Learning με συνδυασμό ατομικού και ομαδικού κέρδους	86
4.70 Συγκριτική παρουσίαση <i>individual</i> και <i>total improvement</i> για όλους τους χρήστες με συσχετισμό χρήστη-RIS βάσει αλγορίθμου Automata Learning με συνδυασμό ατομικού και ομαδικού κέρδους	87

4.71	Παρουσίαση διαφοράς γωνιών εισόδου/εξόδου από RIS για κάθε χρήστη με συσχετισμό χρήστη-RIS βάσει αλγορίθμου Automata Learning με συνδυασμό ατομικού και ομαδικού κέρδους	87
4.72	Παρουσίαση συσχετισμών UE – RIS (για RIS A/A 1), UE-Object βάση κατάστασης λειτουργίας με συσχετισμό χρήστη-RIS βάσει αλγορίθμου Automata Learning με συνδυασμό ατομικού και ομαδικού κέρδους	88
4.73	Παρουσίαση συσχετισμών UE – RIS (για RIS A/A 2), UE-Object βάση κατάστασης λειτουργίας με συσχετισμό χρήστη-RIS βάσει αλγορίθμου Automata Learning με συνδυασμό ατομικού και ομαδικού κέρδους	88
4.74	Παρουσίαση συσχετισμών UE – RIS (για RIS A/A 3), UE-Object βάση κατάστασης λειτουργίας με συσχετισμό χρήστη-RIS βάσει αλγορίθμου Automata Learning με συνδυασμό ατομικού και ομαδικού κέρδους	89

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Πρόλογος

Τα τελευταία χρόνια, οι επαναδιαμορφώσιμες έξυπνες επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces - RISs) έχουν κερδίσει σημαντική προσοχή ως μια ελπιδοφόρα τεχνολογία για τη βελτίωση των ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας [1]. Τα RISs αποτελούνται από μια επίπεδη διάταξη παθητικών στοιχείων που μπορούν να αντανακλούν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και να προσαρμόζουν τις φάσεις και τις αποκρίσεις πλάτους τους για τη δημιουργία επιθυμητού μοτίβου σήματος. Με τον έξυπνο έλεγχο των αντανακλάσεων από τα RISs, είναι δυνατό να βελτιωθεί η ασύρματη κάλυψη, να αυξηθεί η ισχύς του ληφθέντος σήματος στον δέκτη και να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που προκαλεί η πολυδιαδρομική διάδοση (multipath propagation). Τα RISs έχουν μια ευρεία γκάμα δυνητικών εφαρμογών σε διάφορους τομείς, όπως έξυπνες πόλεις, αυτόνομη οδήγηση και συστήματα πολλαπλών κυψελών.

Τα ολοκληρωμένα δίκτυα αντίληψης και επικοινωνίας (Integrated Sensing and Communication - ISAC) [2] είναι μια άλλη καινοτόμα τεχνολογία που συνδυάζει τις λειτουργίες ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας και αισθητήρων. Τα ISACs μπορούν να συλλέγουν δεδομένα από διάφορους αισθητήρες που ενσωματώνονται στο δίκτυο επικοινωνίας και να χρησιμοποιούν τις πληροφορίες για να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση του συστήματος. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, ή για την ανίχνευση ορισμένων στόχων και να έχουν την δυνατότητα με την ίδια κεραία και με το ίδιο σύστημα να μεταφέρουν στον σταθμό βάσης συλλογής τις κατάλληλες πληροφορίες. Με την ένταξη των λειτουργιών αισθητήρων και επικοινωνίας, τα ISACs μπορούν να παρέχουν μια πιο αποτελεσματική, ασφαλή και αξιόπιστη υποδομή επικοινωνίας. Τα ISACs έχουν πολλές δυνητικές εφαρμογές σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων του διαδικτύου των αντικειμένων (Internet of Things - IoT), συστημάτων κινητής υγείας και αυτομάτου - απομακρυσμένου ελέγχου γραμμών παραγωγής σε βιομηχανίες.

Ένας πρώτος στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι να μελετηθεί η βελτίωση που μπορεί να παρέχει η χρήση των RISs σε ένα σύστημα ISAC. Σε αυτό το πλαίσιο, μελετάται σε πρώτο χρόνο την συμπεριφορά των δύο καταστάσεων λειτουργίας ανεξάρτητα την μια από την άλλη ώστε να αξιολογηθεί το θεωρητικά μεγαλύτερο ποσοστό βελτίωσης που παρέχεται από το RIS στον χρήστη ανάλογα με βάση την κατάσταση λειτουργίας του. Σε δεύτερο χρόνο, πρόκειται να μελετηθεί την αλληλεπίδραση χρηστών διαφορετικών ή ίδιων καταστάσεων λειτουργίας όταν επιθυμούν να συσχετιστούν με το ίδιο RIS αναλύοντας παράλληλα τους παράγοντες που επηρεάζουν στην απόδοση του συστήματος και παρουσιάζοντας τις δυσκολίες που προκύπτουν.

Επιπλέον, προτείνουμε ένα αλγόριθμο μάθησης αυτομάτου (Learning Automata - LA) για τη σύνδεση χρηστών με RISs σε ένα ασύρματο σύστημα επικοινωνίας. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος

στοχεύει να καταστήσει βέλτιστη τη συσχέτιση μεταξύ χρηστών, ο οποίος θα βρίσκονται σε κατάσταση λειτουργίας είτε communication είτε sensing και RISs λαμβάνοντας υπόψη τις αντίστοιχες απαιτήσεις Quality of Service - QoS για κάθε μια περίπτωση από τις παραπάνω. Ο αλγόριθμος βασίζεται στις αρχές της ενισχυτικής μάθησης, όπου τα RISs προσαρμόζουν τους συντελεστές ανάκλαστήρα τους βάσει των ανατροφοδοτήσεων που λαμβάνουν από τους χρήστες. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορα ασύρματα σενάρια επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων των κυψελωτών δικτύων, των WLAN και των δικτύων IoT. Παράλληλα, η βέλτιστη συσχέτιση χρηστών με RISs θα συνοδεύεται από μια βελτιστοποίηση των συντελεστών ανάκλασης των RISs για την επίτευξη της βέλτιστης δυνατής επίδοσης των χρηστών που έχουν συσχετιστεί με το συγκεκριμένο RIS. Συνολικά, λοιπόν, κύριοι στόχοι αυτής της εργασίας είναι η μελέτη της λειτουργίας των RISs σε περιβάλλον πολλών χρηστών και η αξιολόγηση της απόδοσης του προτεινόμενου αλγορίθμου LA και η σύγκρισή του με την σύνδεση βάσει καλύτερου σηματοθορυβικού λόγου.

1.2 Σχετική έρευνα

Τα τελευταία χρόνια μεγάλο μέρος της ακαδημαϊκής κοινότητας έχει εστιάσει το ερευνητικό του ενδιαφέρον στην τεχνολογία των RISs, των συστημάτων ISAC καθώς και στον συνδυασμό αυτών των δύο τεχνολογιών. Όσον αφορά την τεχνολογία των RISs, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση μεταξύ της χρήσης RISs και Relays προς βελτίωση του κέρδους του καναλιού και της ενεργειακής αποδοτικότητας όπως παρουσιάζεται στις εργασίες [3],[4]. Σε αυτές επισημαίνεται ότι η χρήση RIS είναι αποδοτική όταν το μέγεθός του είναι σημαντικά μεγαλύτερο του μήκους κύματος δίνοντας βελτίωση τόσο στην φασματική όσο και στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Επιπλέον, στην εργασία [5] παρουσιάζεται η δυνατότητα μετατροπής του RIS από πλήρως παθητικό σε ενεργητικό χαμηλού κέρδους ώστε να εξισορροποιηθεί η επίδραση της προσπέλασης του από πολλαπλούς χρήστες. Από την μεριά της τεχνολογίας των συστημάτων ISAC αξίζει να επισημανθεί η μελέτη χρήσης μη ορθογωνικών σχημάτων πολλαπλής προσπέλασης [6], [7] στα οποία ορίζονται οι βασικές αρχές και πραγματοποιείται μια προσπάθεια βελτίωσης της διαμορφωμένης δέσμης εκπομπής μέσω μιας κυρτής βελτιστοποίησης του ζυγισμένου αθροίσματος της ρυθμαπόδοσης και της ενέργειας ανίχνευσης.

Παράλληλα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η έως τώρα βιβλιογραφία στην εφαρμογή των RISs σε συστήματα ISAC. Αρχικά, στην εργασία [8] παρουσιάζεται η χρήση RISs σε περιβάλλον αυτόνομης οδήγησης για την λήψη πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση του καναλιού (Channel State Information - CSI) και ταυτόχρονα προτείνεται η χρήση ενός συνελικτικού νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη των στροφών φάσης κάθε στοιχείου του RIS. Στο πλαίσιο κινητών χρηστών, στο άρθρο [9] μελετάτε ένα σύστημα πλήρους διπλής κατεύθυνσης (Full Duplex - FDX) στο οποίο κάθε χρήστης φέρει ένα RIS για αποκλειστικά ατομική χρήση και βελτιστοποιείται η μορφή του διαγράμματος ακτινοβολίας του δέκτη μέσω διαμόρφωσης δέσμης λήψης (input beamforming). Επεκτείνοντας την παραπάνω εργασία, στις μελέτες [10], [11] αναλύεται τόσο η βελτιστοποίηση της δέσμης λήψης της συσκευής του χρήστη (User Equipment - UE), της δέσμης εκπομπής του σταθμού βάσης όσο και των συντελεστών στροφής φάσης των στοιχείων του RIS. Στην προσπάθεια εύρεσης της κατάλληλης διαμόρφωσης δέσμης σε συσκευές που βρίσκονται σε διττή κατάσταση λειτουργίας sensing και communication προτείνεται η διαίρεση του γωνιακού εύρους λειτουργίας σε υποχώρους μικρότερου γωνιακού εύρους [12] και η κατάλληλη κατανομή της ισχύος σε αυτούς ώστε σε συνδυασμό με την βελτιστοποίηση της παθητικής δέσμης του RIS να αυξηθεί η περιοχή κάλυψης και να γίνει επαχρησιμοποίηση των ραδιοπόρων. Επιπλέον, όσον αφορά Σταθμούς Βάσης ο οποίοι ανιχνεύουν στόχους και ταυτόχρονα επικοινωνούν με χρήστες προτείνεται στο άρθρο [13] αλγόριθμος βελτιστοποίησης του ληφθέντος σηματοθορυβικού λόγου για την sensing λειτουργία υπό την ύπαρξη ελαχίστου ορίου σηματοθορυβικού λόγου για την κατάσταση λειτουργίας communication. Επίσης, στη μελέτη [14] ως μετρική για την αξιολόγηση της κατάστασης λειτουργίας sensing προτείνεται η αμοιβαία πληροφορία (Mutual Information - MI) και επισημαίνεται η άμεση συσχέτιση

μεταξύ κυματομορφής εκπομπής καθοδικής ζεύξης και της παθητικής δέσμης του RIS. Τέλος, στο άρθρο [15] μελετάτε αλγόριθμος συσχέτισης χρηστών με RIS βάση του εκτιμώμενου σηματοθρομβικού λόγου όπως αυτός θα υπολογίζεται και θα αποστέλλεται από ορισμένα ενεργά στοιχεία ενός κατ' αλλά πλήρους παθητικού RIS.

1.3 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται μια συνοπτική εισαγωγή στους κύριους άξονες της εργασίας και μια παρουσίαση της σχετικής έρευνας που υπάρχει στην ευρύτερη ερευνητική περιοχή με βάση την διεθνή βιβλιογραφία. Έπειτα, στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας πραγματοποιείτε μια πιο εκτενή εισαγωγή στις Reconfigurable Intelligent Surfaces, στις στοιχειοκεραίες, στο Automata Learning και μελετάται η μοντελοποίηση καναλιού με διαλείψεις και τα πρωτόκολλα πολλαπλής προσπέλασης. Στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση τόσο του ISAC όσο και της εξίσωσης του παράγοντα καναλιού με χρήση RIS. Ακόμα, εξετάζεται η συχνότητα και το εύρος ζώνης λειτουργίας για κάθε κατάσταση λειτουργίας. Στο τέταρτο κεφάλαιο, ερευνάται την συνεισφορά του RIS στο σύστημα ISAC μέσω προσομοιώσεων. Ξεκινάμε με την περίπτωση απωλειών μεγάλης κλίμακας (και απωλειών διάδοσης προφανώς), ύστερα αναλύεται το RIS ως στοιχειοκεραία, παρουσιάζεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης των φάσεων των στοιχείων του RIS και εισάγεται την έννοια της τομεοποίησης του RIS. Επιπλέον, παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης για την βέλτιστη τοποθέτηση των RIS επί δοσμένης περιοχής κάλυψης και τέλος την συσχέτιση χρηστών με RIS βάσει αλγορίθμου Learning Automata. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο συνοψίζεται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν.

Κεφάλαιο 2

Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Προγραμματιζόμενες Έξυπνες Επιφάνειες (RISs)

2.1.1 Γενικές αρχές λειτουργίας

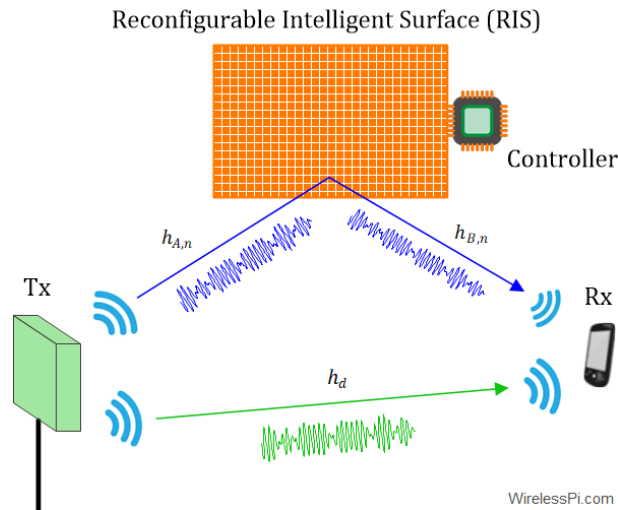
Οι Προγραμματιζόμενες (ή Αναδιαμορφώσιμες) Έξυπνες Επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces - RISs) [16],[17] αποτελούν μια νέα τεχνολογία στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών έχοντας προσελκύσει το έντονο ενδιαφέρον της ακαδημαϊκής κοινότητας τα τελευταία χρόνια. Κύριο χαρακτηριστικό των RISs και αυτό που συντέλεσε καθοριστικά στην εδραίωσή τους είναι το γεγονός ότι η λειτουργία τους δεν απαιτεί την ύπαρξη ενισχυτικής διάταξης και συνεπώς αρκούν παθητικά στοιχεία. Η λειτουργία των RISs βασίζεται στον έλεγχο της φάσης των ανακλώμενων κυμάτων από την επιφάνεια, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της ισχύος του σήματος στον δέκτη. Κάθε RIS αποτελείται από επιμέρους στοιχεία (elements), μέσω των οποίων ρυθμίζεται η φάση των ανακλώμενων κυμάτων. Κάθε στοιχείο του RIS έχει διαστάσεις κάτω του μισού μήκους κύματος, ενώ προτιμάται διαχωριστική απόσταση τουλάχιστον μισού μήκους κύματος μεταξύ των στοιχείων (συνήθως $\lambda/2$), προκειμένου να αποφευχθούν σύζευξη και συσχέτιση των καναλιών. Επιπλέον, κάθε στοιχείο των RISs μπορεί να ελεγχθεί ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα, μέσω ενός ειδικού μικρο-ελεγκτή [18], [19], ο οποίος μπορεί ανά πάσα στιγμή να μεταβάλλει τον συντελεστή ανάκλασής τους, για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Ο μικροελεγκτής είναι υπεύθυνος για την επικοινωνία μεταξύ των στοιχείων του RIS, καθώς και με τις εξωτερικές πηγές, και ρυθμίζει τις φάσεις και τα πλάτη της διάταξης. Πιο συγκεκριμένα, η χρονική καθυστέρηση που προσδίδει ο μικρο-ελεγκτής στα επιμέρους στοιχεία των RISs διαμορφώνει τις φάσεις των ανακλώμενων κυμάτων, και η ενισχυτική συμβολή των κυμάτων με την ίδια φάση στον δέκτη οδηγεί σε μεγαλύτερη ισχύ του σήματος. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα πραγματικού χρόνου απόδοσης συντελεστών ανάκλασης με εκτίμηση του καναλιού σε κάθε χρόνο καναλιού (coherence time), επιτρέποντας στο RIS να έχει πάντα το επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας ανάλογα με τις αλλαγές στις συνθήκες του διαύλου. Με αυτόν τον τρόπο, τα RISs παρέχουν μεγάλη ελευθερία στο σχεδιαστή του δικτύου, καθώς μπορούν να εκτελούν πολλές ηλεκτρομαγνητικές λειτουργίες, όπως ανάκλαση, διάθλαση, διάχυση, αλλαγή πόλωσης και απορρόφηση δέσμης ακτινοβολίας [20],[3]. Έτσι, πρόκειται για μία αλλαγή στο φυσικό επίπεδο (physical layer) της επικοινωνίας που εξασφαλίζει βελτιωμένες επιδόσεις έναντι άλλων συμβατικών συστημάτων.

2.1.2 Τρόποι υλοποίησης

Υλοποίηση με Ανακλαστήρες (Reflect Arrays)

Οι παθητικοί ανακλαστήρες αποτελούν τον πιο απλό τρόπο για την κατασκευή μιας έξυπνης επιφάνειας [21]. Η υλοποίησή τους βασίζεται στο γεγονός ότι οι επιμέρους μικρές κεραίες τους, που αποτελούν τα στοιχεία του RIS, μπορούν να ελεγχθούν ηλεκτρονικά, επιτρέποντας την οπισθο-



Σχήμα 2.1: Γενικό σενάριο εφαρμογής RIS με χρήση ενισχυτικής συμβολής στον δέκτη

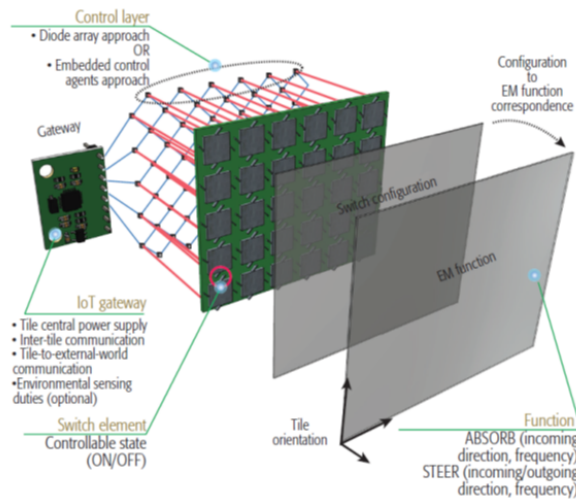
σκέδαση και τη μετατόπιση φάσης του λαμβανόμενου σήματος. Τα στοιχεία αυτά έχουν διάσταση συγκρίσιμη με το μήκος κύματος και λειτουργούν ως σκεδαστές διάχυσης, με κάθε στοιχείο ξεχωριστά να έχει περιορισμένη επίδραση στα κύματα. Ωστόσο, ο μεγάλος αριθμός των στοιχείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί με έναν ελεγχόμενο τρόπο, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση. Σε αντίθεση με τους αναμεταδότες σε ένα σύστημα επικοινωνίας, κάθε στοιχείο των παθητικών ανακλαστήρων συνεισφέρει απλώς στη συνεχή μετάδοση των λαμβανόμενων σημάτων, χωρίς να μεταφέρει δικές του πληροφορίες. Επιπλέον, οι ανακλαστήρες λειτουργούν συλλογικά, με στόχο την ευκολότερη μετάδοση των σημάτων έχοντας καλύτερη αντίληψη του περιβάλλοντος διάδοσης.

Υλοποίηση με Μετα-Επιφάνειες (Meta-Surfaces)

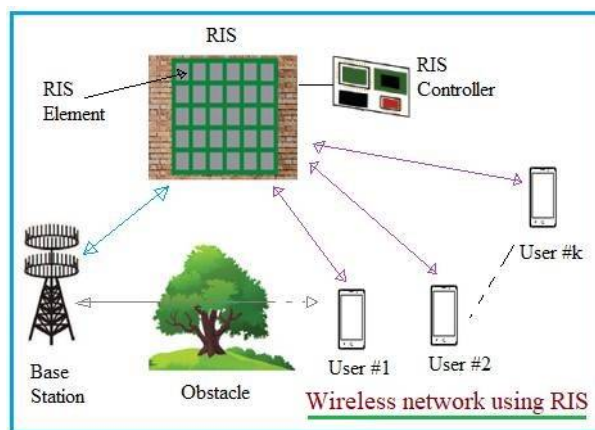
Η υλοποίηση που παρουσιάζεται εδώ αποτελεί μια πιο προηγμένη μορφή των RIS. Οι μετα-επιφάνειες αποτελούν ένα περίπλοκο σύστημα υλικών που έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπουν τον έλεγχο και τη διαμόρφωση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Αυτές οι επιφάνειες συνήθως αποτελούνται από ένα σύνολο στενών δομών συντονισμού, γνωστών ως pixels ή μετα-άτομα, που έχουν συντεθεί σε ένα επαναλαμβανόμενο αγωγιμο μοτίβο πάνω από ένα διηλεκτρικό υπόστρωμα [3]. Τα μεμονωμένα μετα-άτομα, καθώς και το κενό μεταξύ τους, είναι πολύ μικρότερα από το μήκος κύματος και σε συνδυασμό με το μεγάλο πλήθος τους προσφέρουν ένα τεράστιο βαθμό ελευθερίας χειρισμού των λαμβανόμενων σημάτων. Η αρχή λειτουργίας των meta-surfaces είναι η εξής [22] : Όταν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα προσκρούουν σε αυτές μέσω της επαγωγής δημιουργείται ρεύμα. Στην περίπτωση στατικών μετα-ατόμων η δομή του συνολικού ρεύματος μέσα στην επιφάνεια είναι πλήρως καθορισμένη από την γεωμετρία και την σύνθεση αυτών. Διαφορετικά εξαρτάται από τις καταστάσεις των στοιχείων μεταγωγής. Το επαγωγικό ρεύμα επίσης δημιουργεί ένα πεδίο απόκρισης, σύμφωνα με τους νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού ενώ τα μετα-άτομα σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούν ένα τεχνητό πεδίο απόκρισης.

2.1.3 Σενάρια εφαρμογής RIS

Η ιδιότητα των RISs να δημιουργούν διαφορετικά διαγράμματα ακτινοβολίας σε συνδυασμό με τη δυνατότητα του για διαμόρφωση δέσμης (beam shaping) δίνει τη δυνατότητα για την υποστήριξη πολλαπλών σεναρίων επικοινωνίας στα δίκτυα 6^{ης} γενιάς [23]. Καταρχάς, η εγκατάσταση RIS μπορεί να εισάγει επιπλέον μονοπάτια διαδοσης σε περιοχές υψηλής κυκλοφορίας, βελτιώνοντας την ποιότητα του καναλιού της ζεύξης και βοηθώντας ταυτόχρονα στην ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος [24]. Να επισημάνουμε ότι το RIS αποτελεί μια ευέλικτη τηλεπικοινωνιακή υποδομή, η οποία μπορεί να εγκαθίσταται με ευκολία σε μια περιοχή υψηλών απαιτήσεων, όπως μαζικές εκδη-



Σχήμα 2.2: Υλοποίηση RIS με χρήση Μετα-Επιφανειών



Σχήμα 2.3: Σενάριο εφαρμογής RIS για δημιουργία νέου μονοπατιού προς αποφυγή εμποδίου

λώσεις καλλιτεχνικού ή αθλητικού χαρακτήρα χωρίς μεγάλο κόστος, και να απεγκλιθίσταται με το πέρασ των εκδηλώσεων. Η τεχνολογία RIS μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές με κενά κάλυψης και παρουσία πολλαπλών εμποδίων, όπως αστικές περιοχές, για τη βελτίωση της μετάδοσης σήματος [25],[26]. Η RIS σε συνδυασμό με τα Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (Unmanned Aerial Vehicle - UAV) [27] μπορεί να δημιουργήσει νέα μονοπάτια μετάδοσης πληροφοριών και να επεκτείνει την περιοχή κάλυψης. Επιπλέον, η τεχνολογία RIS έχει χρησιμοποιηθεί επίσης σε συστήματα ολοκληρωμένης ανίχνευσης και επικοινωνίας (Integrated Sensing and Communication - ISAC) [12], [28] για την παροχή μονοπατιών οπτικής επαφής Line of Sight (LoS), συμβάλλοντας στην λήψη ακριβών πληροφοριών σχετικά με την τρισδιάστατη θέση των επιθυμητών στόχων. Στα δίκτυα IoT, τα RISs μπορούν να αυξήσουν το κέρδος του καναλιού μέσω του οποίου πραγματοποιείται εκφόρτωση εργασιών από τους κόμβους (nodes) IoT προς των κεντρικό εξυπηρετητή (server) (offload link) [29],[30]. Η αύξηση του κέρδους επιτυγχάνεται με ενισχυτική συμβολή των σημάτων που εκπέμπονται από τα IoT nodes και κατευθύνονται προς τους σταθμούς βάσης συλλογής, στους οποίους υπάρχουν οι servers. Ακόμα, η τεχνολογία RIS μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της ποιότητας του καναλιού offload link και τη μείωση της καθυστέρησης offload link για τις συσκευές VR ιδιαίτερα σε περιοχές αυξημένης χρήσης της τεχνολογίας αυτής, όπως σε μουσεία ή εκθεσιακούς χώρους. Τελος, σε συστήματα πλήρους διπλής κατεύθυνσης λειτουργίας (Full Duplex - FDX) [31], η χρήση RISs δύναται να μειώσει την παρεμβολή μεταξύ των δύο κατευθύνσεων επικοινωνίας.

2.2 Στοιχειοκεραίες

Οι στοιχειοκεραίες είναι διατάξεις που αποτελούνται από πολλούς ομοιόμορφους ακτινοβολητές του ίδιου προσανατολισμού που ακτινοβολούν ή λαμβάνουν ταυτόχρονα. Με κατάλληλη επιλογή της ρευματικής διέγερσης επιτυγχάνονται βελτιωμένες ιδιότητες για τη στοιχειοκεραία σε σχέση με τις αντίστοιχες ενός απλού στοιχείου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, στην μακρινή περιοχή, τα επιμέρους πεδία των στοιχείων συμβάλλουν σε επιθυμητές διευθύνσεις ενώ αλληλοαναιρούνται σε άλλες. Το συνολικό μακρινό πεδίο μιας στοιχειοκεραίας προσδιορίζεται με υπέρθεση των επιμέρους πεδίων των στοιχείων της. Η διαδικασία αυτή προϋποθέτει ότι δεν υπάρχει σύζευξη μεταξύ των στοιχείων ακτινοβολίας, δηλαδή η ρευματική διέγερση κάθε στοιχείου δεν επηρεάζεται από την παρουσία των υπόλοιπων στοιχείων. Η ισχύς της παραδοχής αυτής εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των στοιχείων. Οι στοιχειοκεραίες βρίσκουν ευρεία εφαρμογή γιατί παρέχουν τις εξής δυνατότητες : αύξηση της κατευθυντικότητας, σύνθεση επιθυμητών διαγραμμάτων ακτινοβολίας και στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας με ηλεκτρονικό τρόπο.

Οι στοιχειοκεραίες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες τις χωρικά ομοιόμορφες και τις χωρικά ανομοιόμορφες στοιχειοκεραίες. Οι χωρικά ομοιόμορφες στοιχειοκεραίες χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι τα στοιχεία ισapéχουν μεταξύ τους. Στις περισσότερες εφαρμογές, όπως και στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιούνται χωρικά ομοιόμορφες στοιχειοκεραίες. Αν I_0 είναι ο φασιδέτης του ρεύματος διέγερσης του στοιχείου της στοιχειοκεραίας που θεωρείται ως στοιχείο αναφοράς, το ρεύμα διέγερσης κάποιου στοιχείου μπορεί να εκφρασθεί υπό τη μορφή $I_m = c_m \cdot I_0$, $m = 1, \dots, M$ όπου M το πλήθος των στοιχείων της στοιχειοκεραίας. Ο μιγαδικός αριθμός c_m που αποτελεί τον κατάλληλο συντελεστή αναλογίας ονομάζεται ρευματικός συντελεστής του στοιχείου m . Με διανυσματική υπέρθεση των επιμέρους πεδίων των στοιχείων ακτινοβολίας λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές για την μακρινή περιοχή κεραίων που αναφέρθηκε προηγουμένως, η ένταση ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας προκύπτει από τη σχέση

$$U(\theta, \phi) = U_0(\theta, \phi) \cdot |S(\theta, \phi)|^2 \quad (2.1)$$

όπου $U_0(\theta, \phi)$ η κοινή ένταση ακτινοβολίας των ομοίων στοιχείων ακτινοβολίας και $S(\theta, \phi)$ ο παράγοντας διάταξης της στοιχειοκεραίας που προσδιορίζεται από τη σχέση

$$S(\theta, \phi) = \sum_{m=0}^{M-1} c_m \cdot \exp(jkr_m \cos(\psi_m)) \quad (2.2)$$

Με k συμβολίζεται ο κυματικός αριθμός του μέσου διάδοσης και ισούται με $\frac{2\pi}{\lambda}$ όπου λ είναι το μήκος κύματος ($\lambda = \frac{c}{f_c}$ όπου f_c η φέρουσα συχνότητα), με r_m συμβολίζεται η απόσταση του m -οστού στοιχείου της στοιχειοκεραίας από το στοιχείο αναφοράς και με ψ_m η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του διανύσματος m -οστού στοιχείου και στοιχείου αναφοράς με το διάνυσμα σημείο παρατήρησης και στοιχείου αναφοράς. Όπως παρατηρείται ο παράγοντας διάταξης $S(\theta, \phi)$ εξαρτάται από τη γεωμετρική διάταξη των στοιχείων, τη σχετική τους διέγερση, τη συχνότητα λειτουργίας και το πλήθος των στοιχείων της στοιχειοκεραίας.

Μια κατηγορία ομοιόμορφων χωρικά στοιχειοκεραίων είναι οι γραμμικές στοιχειοκεραίες. Τα σημεία αναφοράς των στοιχείων σε μια γραμμική στοιχειοκεραία βρίσκονται επί ευθείας που ονομάζεται άξονας της στοιχειοκεραίας. Η σταθερή απόσταση μεταξύ τους ονομάζεται βήμα της στοιχειοκεραίας. Για να υπολογιστεί ο παράγοντας διάταξης της στοιχειοκεραίας αυτής θεωρείται ως σημείο αναφοράς το κέντρο του στοιχείου που βρίσκεται στην αρχή των αξόνων O . Αν γ είναι η γωνία κλίσης της διεύθυνσης παρατήρησης OP του πεδίου ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας ως προς τον άξονα της γραμμικής στοιχειοκεραίας, για τον υπολογισμό του παράγοντα διάταξης ισχύουν οι σχέσεις : $r_m = m \cdot d_m$ όπου d_m το βήμα της στοιχειοκεραίας, $\psi_m = \gamma$ και για $m = 0, 1, \dots, M$ εξάγεται

$$S(\theta, \phi) = \sum_{m=0}^{M-1} c_m \cdot \exp(jmkd_s \cos(\gamma)), \quad c_m = A_m \cdot \exp(j\phi_m) \quad (2.3)$$

όπου A_m το πλάτος των ρευματικών συντελεστών και ϕ_m το πλάτος τους.

Όσον αφορά τις Έξυπνες Αναδιαμορφώσιμες Ανακλαστικές Επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces - RIS) μπορεί να περιγράψει την λειτουργία τους ως παθητική γραμμική και ομοιόμορφη χωρικά στοιχειοκεραία. Πιο συγκεκριμένα, ο χαρακτηρισμός παθητική περιγράφει το γεγονός ότι δεν χρησιμοποιεί κάποιο σύστημα εκπομπής ή λήψης αλλά το εκπεμπόμενο σήμα είναι το ανακλώμενο ληφθέν σήμα της στοιχειοκεραίας. Στην μοντελοποίηση για το RIS που ακολουθείτε στην παρούσα εργασία θεωρείται ότι τα πλάτη των ρευματικών συντελεστών A_m ισούνται με την μονάδα και τόσο τα πλάτη όσο και οι φάσεις των c_m είναι οι ίδιοι τόσο για την διαδικασία λήψης όσο και για την διαδικασία εκπομπής. Λόγω αυτού του παθητικού χαρακτήρα είναι κρίσιμο να οριστεί ο παράγοντας διάταξης αυτής της στοιχειοκεραίας. Για αρχή, θα εκφράσουμε τον «κλασσικό» παράγοντα διάταξης με μια διαφορετική γραφή

$$S(\gamma) = \mathbf{c} \cdot \mathbf{D}, \quad \mathbf{c} \in \mathbb{R}^{1 \times M}, \quad \mathbf{D} \in \mathbb{R}^{M \times 1} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{c}(1, m) = A_m \cdot \exp(j\phi_m), \quad \mathbf{D}(m, 1) = \exp(jm k d_s \cos(\gamma)) \quad \forall m \in \{0, 1, \dots, M\}$$

Αν τώρα με γνώμονα την παραπάνω σχέση θεωρήσουμε ως $\mathbf{I} = \mathbf{D}^H(\gamma_{in})$, $\mathbf{O} = \mathbf{D}^H(\gamma_{out})$ και τον διαγώνιο πίνακα **Omega**, ο οποίος περιλαμβάνει και μοντελοποιεί τόσο τους ρευματικούς συντελεστές όσο και ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στοιχείων,

$$\mathbf{c} = \text{diag}(\mathbf{Omega}), \quad \mathbf{Omega} \in \mathbb{R}^{M \times M} \quad (2.5)$$

μπορούμε να ορίσουμε τον παράγοντα διάταξης του RIS ως εξής :

$$S_{RIS} = \mathbf{I} \cdot \mathbf{Omega} \cdot \mathbf{O} \Rightarrow$$

$$S_{RIS} = \sum_{m=0}^{M-1} \exp \left(j \left(\frac{2\pi}{\lambda} d_s (m-1) (\cos(\gamma_{out}) - \cos(\gamma_{in})) + \delta_m \right) \right) \quad (2.6)$$

2.3 Μοντελοποίηση καναλιού με διαλείψεις

Η συνολική εξασθένιση (attenuation) του σήματος όταν αυτό διαδίδεται στον ασύρματο διάυλο μπορεί να διαιρεθεί σε τρία επιμέρους μέρη : τις απώλειες διάδοσης, τις απώλειες μεγάλης κλίμακας λόγω διαλείψεων και τις απώλειες μικρής κλίμακας λόγω διαλείψεων. Οι απώλειες διάδοσης (path loss) έχουν ένα αιτιοκρατικό χαρακτήρα καθώς μοντελοποιούνται συναρτήσει της απόστασης και της συχνότητας βάσει εμπειρικών ή πειραματικών μοντέλων και εξαρτώνται από το περιβάλλον διάδοσης.

2.3.1 Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (Large Scale Fading)

Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας έρχονται να μοντελοποιήσουν τον στοχαστικό χαρακτήρα της συνολικής εξασθένισης (attenuation) του σήματος, ο οποίος εξαρτάται από την παρουσία αντικειμένων μεγάλων διαστάσεων όπως κτίσματα, βλάστηση, κινητά ή στατικά εμπόδια κ.α., μεταβάλλεται αργά με τον χρόνο και παρουσιάζει μεγάλες αλλά όχι απότομες αυξομειώσεις. Ισοδύναμος όρος που χρησιμοποιείται για τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας είναι σκίαση (shadowing). Αν θεωρηθεί το πλήθος των προαναφερθέντων εμποδίων μεγάλων στο αριθμό και η απώλεια που προκαλεί το καθένα ανεξάρτητη με τις υπόλοιπες τότε λόγω του Κεντρικού Οριακού Θεωρήματος

$$L_{total} = \prod_{i=1}^n a_i \Leftrightarrow L_{total}(dB) = \sum_{i=1}^n a_i(dB) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \quad (2.7)$$

$$L_{total}(dB) \sim Normal \Leftrightarrow L_{total} \sim \log - Normal \quad (2.8)$$

όπου L_{total} οι συνολικές απώλειες μεγάλης κλίμακας, a_i η απώλεια που επιφέρει το i -οστό εμπόδιο. Οπότε σύμφωνα με τον λογαριθμοκανονικό μοντέλο, η τυχαία μεταβλητή της σκίασης ορίζεται ως

ο λόγος της ισχύος εκπομπής προς την ισχύ λήψης $\psi = \frac{P_t}{P_r}$ και ακολουθεί την λογαριθμοκανονική κατανομή με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Function - PDF) :

$$f(\psi_{dB}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{dB}} \exp\left(-\frac{(\psi_{dB} - \mu_{dB})^2}{2\sigma_{dB}^2}\right) \quad (2.9)$$

όπου μ_{dB} αντιπροσωπεύει την μέση τιμή της λογαριθμοκανονικής κατανομής και εξαρτάται από το path loss και σ_{dB} αντιπροσωπεύει την τυπική απόκλιση της λογαριθμοκανονικής κατανομής και λαμβάνει τιμές από 4 – 13dB.

2.3.2 Διαλείψεις μικρής κλίμακας (Small Scale Fading)

Με τον όρο διαλείψεις μικρής κλίμακας περιγράφοντας οι μεταβολές που προκαλούνται στο πλάτος, στη φάση και στη συχνότητα του σήματος για μικρά χρονικά διαστήματα και παρουσιάζουν έντονες και απότομες αυξομειώσεις σε αυτά. Οι διαλείψεις αυτού του τύπου παρουσιάζονται σε NLoS κυρίως ζεύξεις αλλά δεν εκλείπουν και σε LoS εφόσον το περιβάλλον μελέτης είναι πυκνοκατοικημένο αστικό.

Οι κυριότεροι φυσικοί μηχανισμοί που προκαλούν διαλείψεις μικρής κλίμακας είναι οι ακόλουθοι :

- Πολυδιαδρομική διάδοση : δημιουργία πολλαπλών εκδοχών του σήματος φτάνουν στον δέκτη λόγω παρουσίας πολλών σχεδαστών (ανακλαστικές επιφάνειες διαφόρων υλικών, τραχύτητας κ.α.) σε διαφορετικούς χρόνους. Λόγω της υπέρθεσης αυτών των πολυδιαδρομικών συνιστωσών στον δέκτη, οι οποίες έχουν τυχαία πλάτη και φάσεις, προκαλούνται διαλείψεις.
- Κινητικότητα τερματικών : οι χρήστε σε ασύρματα δίκτυα διακρίνονται με κριτήριο την κινητικότητά τους σε σταθερούς, νομαδικούς (μέτριας κινητικότητας) και κινητικούς (υψηλής ταχύτητας). Η σχετική κίνηση μεταξύ δύο τερματικών (χρήστης, σταθμός βάσης ή στόχος προς ανίχνευση) προκαλεί χρονική μεταβολή της φέρουσας συχνότητας λόγω του φαινομένου Doppler. Η μετατόπιση Doppler μπορεί να είναι είτε θετική είτε αρνητική αναλόγως με το αν τα τερματικά πλησιάζουν ή απομακρύνονται.
- Κινητικότητα σχεδαστών στο περιβάλλον διάδοσης : η κίνηση των σχεδαστών που υπάρχουν στο περιβάλλον προκαλεί διαλείψεις. όταν υπάρχουν κινούμενες οντότητες στο περιβάλλον διάδοσης οι πολυδιαδρομικές συνιστώσες υφίστανται μετατοπίσεις Doppler που μεταβάλλονται χρονικά με τυχαίο τρόπο. Μάλιστα, εφόσον η ταχύτητα των σχεδαστών υπερβαίνει την ταχύτητα του τερματικού, η επίδραση του δυναμικού περιβάλλοντος διάδοσης είναι κυρίαρχη.
- Φασματική θεώρηση : όταν το μεταδιδόμενο σήμα έχει εύρος ζώνης μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης συνοχής του διαύλου, δηλαδή τη μέγιστη διαφορά συχνοτήτων για την οποία δύο φασματικές συνιστώσες είναι ισχυρά συσχετισμένες κατά πλάτος, το σήμα υφίσταται σημαντικές διαλείψεις.

Μετατόπιση Doppler και χρόνος συνοχής

Το φαινόμενο Doppler παρουσιάζεται όταν το τερματικό κινείται σε σχέση με τον ακίνητο σταθμό βάσης ή στόχος προς ανίχνευση. Ως συνέπεια, παρουσιάζεται ολίσθηση συχνότητας (δηλαδή ολίσθηση φάσης) στο μεταδιδόμενο σήμα. Έστω λοιπόν ότι το κινούμενο τερματικό κινείται από το Q στο Y (απόσταση ίση με d) με ταχύτητα u και το στατικό τερματικό βρίσκεται στο σημείο S . Η μεταβολή της φάσης του σήματος λήψης λόγω της διαφοράς των δύο διαδοχικών SX και SY είναι

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta l}{\lambda} = \frac{2\pi u\Delta t}{\lambda} \cos(\theta) \quad (2.10)$$

άρα η αντίστοιχη μεταβολή της φέρουσας συχνότητας – μετατόπιση Doppler είναι

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{u}{\lambda} \cos(\theta) \quad (2.11)$$

όπου Δl η διαφορά των διαδρομών SX και SY , λ το μήκος κύματος και θ η γωνία υπό την οποία το κινητό δέχεται το σήμα (και θεωρείται σταθερή τόσο για το σημείο X όσο και για το σημείο Y καθώς αυτά απέχουν πολύ από το S). Άρα, γίνεται αντιληπτό ότι το σήμα στο δέκτη υφίσταται φασματική διασπορά και διεύρυνση.

Η διασπορά Doppler B_D με βάση τα χαρακτηριστικά του τερματικού που περιγράψαμε άνωθεν ισούται με το διπλάσιο της μέγιστης μετατόπισης Doppler

$$B_D = 2f_D|_{max} = \frac{2u}{\lambda} \quad (2.12)$$

και αποτελεί μέτρο της φασματικής διαπλάτυνσης ενός σήματος λόγω χρονικής μεταβολής του διαύλου. Αν τώρα το εύρος ζώνης του σήματος βασικής ζώνης υπερβαίνει κατά πολύ την διασπορά Doppler B_D , η επίδραση του φαινομένου Doppler κατά τη μετάδοση του μέσω ενός χρονικά μεταβαλλόμενου διαύλου θεωρείται αμελητέα. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι ο δίαυλος χαρακτηρίζεται ως δίαυλος αργών διαλείψεων. Σε αντίθετη περίπτωση λέμε ότι ο δίαυλος είναι γρήγορων διαλείψεων. Η παραπάνω ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο πεδίο της συχνότητας. Στο πεδίο του χρόνου το δυικό μέγεθος της διασποράς Doppler είναι ο χρόνος συνοχής του διαύλου $T_c \approx \frac{1}{B_D}$ και αποτελεί στατιστικό μέτρο της χρονικής διάρκειας για την οποία η χρονική απόκριση του διαύλου είναι σταθερή ή της χρονικής διάρκειας για την οποία δύο σήματα είναι ισχυρά συσχετισμένα.

Διασπορά καθυστέρησης και εύρος ζώνης συνοχής

Κάθε δίαυλος χαρακτηρίζεται από ορισμένες παραμέτρους που ποσοτικοποιούν την ιδιότητά του να διασπείρει χρονικά τις διάφορες πολυδιαδρομικές συνιστώσες. Μια τέτοια παράμετρος είναι η μέση επιπλέον καθυστέρηση (mean excess delay), η οποία ορίζεται από τη σχέση :

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_n a_n^2 \tau_n}{\sum_n a_n^2} = \frac{\sum_n P_R(\tau_n) \tau_n}{\sum_n P_R(\tau_n)} \quad (2.13)$$

όπου a_n , τ_n , $P_R(\tau_n)$ είναι το πλάτος, η καθυστέρηση και η ισχύς της n -οστής πολυδιαδρομικής συνιστώσας. Αν ακόμα οριστεί

$$\bar{\tau}^2 = \frac{\sum_n a_n^2 \tau_n^2}{\sum_n a_n^2} = \frac{\sum_n P_R(\tau_n) \tau_n^2}{\sum_n P_R(\tau_n)} \quad (2.14)$$

Τότε η διασπορά καθυστέρησης (delay spread) του διαύλου υπολογίζεται ως εξής :

$$\sigma_\tau = \sqrt{\bar{\tau}^2 - (\bar{\tau})^2} \quad (2.15)$$

,η οποία αποτελεί μέτρο την διασποράς της ισχύος λήψης στο πεδίο του χρόνου. Πιο συγκεκριμένα, ορίζουμε ως B_C το εύρος ζώνης συνοχής του διαύλου το οποίο είναι μέτρο της διασποράς ενός διαύλου στο πεδίο της συχνότητας και είναι αντιστρόφως ανάλογο προς τη διασπορά καθυστέρησης, $B_C \propto 1/\sigma_\tau$. Δηλαδή αν σήμα εύρους ζώνης B διαδοθεί σε δίαυλο εύρους ζώνης συνοχής B_C και ισχύει ότι το $B \ll B_C$ τότε ο δίαυλος θεωρείται φασματικά επίπεδος. Σε αντίθετη περίπτωση ο δίαυλος χαρακτηρίζεται από επιλεκτικότητα ως προς τη συχνότητα. Με άλλα λόγια, το εύρος ζώνης συνοχής ορίζεται ως το εύρος ζώνης εντός του οποίου δύο φασματικές συνιστώσες είναι ισχυρά συσχετισμένες ή ισοδύναμα δύο σήματα με φέρουσες συχνότητες που απέχουν περισσότερο από B_C αντιμετωπίζονται με διαφορετικό τρόπο από το δίαυλο.

Κατηγορίες και είδη διαλείψεων μικρής κλίμακας

1. Διαλείψεις μικρής κλίμακας λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης

- Επίπεδες διαλείψεις : Όταν η απόκριση του ασυρμάτου διαύλου διαθέτει σταθερό κέρδος και γραμμική φάση σε εύρος ζώνης που υπερβαίνει το εύρος ζώνης του σήματος, το σήμα υπόκειται σε μη επιλεκτική ως προς τη συχνότητα (επίπεδη) διαλείψεις. Στην περίπτωση αυτή ισχύει ότι $B \ll B_C$ ή ισοδύναμα $T_s \gg \sigma_\tau$.
- Διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα : Όταν η απόκριση του ασυρμάτου διαύλου δεν διαθέτει σταθερό κέρδος και γραμμική φάση σε εύρος ζώνης που υπερβαίνει το εύρος ζώνης του σήματος, τότε ο δίαυλος προκαλεί διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα και χαρακτηρίζεται ως επιλεκτικός. Χαρακτηριστικό πρόβλημα που προκαλείται στην περίπτωση αυτή είναι η διασυμβολική παρεμβολή (Interψυμβολ Interferenze - ISI) λόγω χρονικής αλληλοεπικάλυψης των σημάτων. Στην περίπτωση αυτή ισχύει ότι $B > B_C$ ή ισοδύναμα $T_s < \sigma_\tau$.

2. Διαλείψεις λόγω διασποράς Δοππλερ

- Ταχείες διαλείψεις : όταν η κρουστική απόκριση ενός διαύλου μεταβάλλεται ταχύτερα από τη διάρκεια συμβόλου, δηλαδή ο χρόνος συνοχής του διαύλου είναι μικρότερος από τη διάρκεια συμβόλου του προς μετάδοση σήματος, ο δίαυλος προκαλεί ταχείες διαλείψεις. Στην περίπτωση αυτή ισχύει ότι $B < B_D$ ή ισοδύναμα $T_s > T_C$.
- Αργές διαλείψεις : στην περίπτωση αυτή ο δίαυλος θεωρείται σταθερός ως προς τη διάρκεια του συμβόλου και συνεπώς το πλάτος και η φάση του συμβόλου μπορούν να θεωρηθούν σταθερά. Στην περίπτωση αυτή ισχύει ότι $B > B_D$ ή ισοδύναμα $T_s < T_C$.

Διαλείψεις τύπου Rayleigh

Έστω ότι βρίσκομαστε σε ένα δίαυλο στενής ζώνης δηλαδή η καθυστέρηση κάθε σημαντικής πολυδιαδρομικής συνιστώσας είναι μικρότερη από σ_τ . Τότε το ληφθέν σήμα (με διαμόρφωση ΠΣΚ για απλούστευση της ανάλυσης) της γενικής μορφής

$$r(t) = \Re \left[u(t - \tau_n) \cdot \exp(j2\pi f_c t + \phi_0 + \psi) \cdot \left[\sum_{n=0}^{N(t)} a_n(t) \cdot \exp(-j\phi_n(t)) \right] \right] \quad (2.16)$$

όπου η τυχαία διαδικασία $\phi_n(t) = 2\pi f_c t - \phi_{D_n}(t)$ λαμβάνει υπόψιν την επίδραση της καθυστέρησης διάδοσης και του φαινομένου Doppler και $u(t)$ ο παλμός μορφοποίησης, το ληφθέν σήμα μπορεί να γραφτεί ως εξής

$$r(t) = \Re \left[u(t) \cdot \exp(j2\pi f_c t + \phi_0 + \psi) \cdot \left[\sum_{n=0}^{N(t)} a_n(t) \cdot \exp(-j\phi_n(t)) \right] \right] \quad (2.17)$$

καθότι $\tau_n \ll \sigma_\tau$. Αν θεωρήσουμε τετραγωνικό παλμό μορφοποίησης μοναδιαίου πλάτους και γράψουμε κάθε πολυδιαδρομική συνιστώσα σε καρτεσιανή μορφή θα έχουμε ότι

$$r(t) = \Re [\exp(j2\pi f_c t + \phi_0 + \psi) \cdot (r_I(t) + jr_Q(t))] \quad (2.18)$$

$$r_I(t) = \sum_{n=0}^{N(t)} a_n(t) \cdot \cos \phi_n(t), \quad r_Q(t) = \sum_{n=0}^{N(t)} a_n(t) \cdot \sin \phi_n(t)$$

Εάν το πλήθος $N(t)$ των πολυδιαδρομικών συνιστωσών είναι μεγάλο τότε με εφαρμογή του Κεντρικού Οριακού Θεωρήματος για τις ανεξάρτητες τυχαίες διαδικασίες $a_n(t)$ και $\phi_n(t)$ προκύπτει ότι

η συμφασική και η ορθογώνια συνιστώσα $r_I(t)$ και $r_Q(t)$ αντίστοιχα είναι από κοινού κανονικές στοχαστικές διαδικασίες. Θεωρώντας, ακόμα, ότι οι φάσεις $\phi_n(t)$ είναι ομοιόμορφα κατανομημένες στο $(0, 2\pi)$ και ο διάυλος είναι αποκλειστικά NLoS, προκύπτει ότι οι $r_I(t)$ και $r_Q(t)$ είναι κανονικές τυχαίες μεταβλητές μηδενικής μέσης τιμής και διασποράς σ^2 η καθεμιά από αυτές. Τότε η περιβάλλουσα του σήματος λήψης θα ισούται με

$$z(t) = |r(t)| = \sqrt{r_I^2(t) + r_Q^2(t)} \quad (2.19)$$

ακολουθεί την κατανομή Rayleigh με PDF

$$f_Z(z) = \frac{2z}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right) \quad z \geq 0 \quad (2.20)$$

όπου $2\sigma^2$ είναι η μέση ισχύς του σήματος λήψης, δηλαδή η ισχύς λήψης λαμβάνοντας υπόψιν μόνο τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (path loss και shadowing). Αν θέλουμε να προσομοιώσουμε έναν τέτοιο διάυλο Rayleigh και λαμβάνοντας υπόψιν ότι και $Z \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2) \rightarrow Z = \sigma \cdot X + \mu$ όπου $X \sim \mathcal{N}(0, 1)$, μπορούμε να εκφράσουμε τον παράγοντα διαλείψης ως εξής :

$$r_I + jr_Q = \sigma \cdot X + j\sigma \cdot Y = \frac{X}{\sqrt{2 \cdot LF}} + j \frac{Y}{\sqrt{2 \cdot LF}} = \frac{1}{\sqrt{LF}} \cdot \left(\frac{X}{\sqrt{2}} + j \frac{Y}{\sqrt{2}} \right) \quad (2.21)$$

όπου LF , $2\sigma^2 = LF$ οι απώλειες μεγάλης κλίμακας και $X, Y \sim \mathcal{N}(0, 1)$, $X \perp Y$. Αν θέλουμε να υπολογίσουμε τώρα την κατανομή που ακολουθεί η ισχύς λήψης, που είναι ανάλογη του τετραγώνου του μέτρου της περιβάλλουσας του σήματος, τότε αυτή θα ακολουθεί την εκθετική κατανομή με παράμετρο $2\sigma^2$, $Z^2 \sim \text{Exp}(2\sigma^2)$.

Διαλείψεις τύπου Rice

Στην περίπτωση τώρα που εκτός από τις NLoS πολυδιαδρομικές συνιστώσες υπάρχει και μια κύρια LoS συνιστώσα, λέμε ότι ο διάυλος υποφέρει από διαλείψεις τύπου Rice. Πιο συγκεκριμένα, λόγω της LoS συνιστώσας, οι μεταβλητές $r_I(t)$ και $r_Q(t)$ έχουν μη μηδενική μέση τιμή. Αν ορίσουμε ως $2\sigma^2$ τη μέση ισχύς των πολυδιαδρομικών συνιστωσών LoS και ως s^2 τη ισχύ της συνιστώσας LoS, τότε η περιβάλλουσα του σήματος $z(t) = |r(t)| = \sqrt{r_I^2(t) + r_Q^2(t)}$ ακολουθεί την κατανομή Rice με PDF :

$$f_Z(z) = \frac{z}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{z^2 + s^2}{2\sigma^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{zs}{\sigma^2}\right) \quad z \geq 0 \quad (2.22)$$

όπου I_0 είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης. Η μέση ισχύς λήψης του σήματος που έχει υποστεί διαλείψεις Rice δίνεται από τη σχέση

$$\bar{P}_R = \int_0^\infty z^2 \cdot f_Z(z) dz = s^2 + 2\sigma^2 \quad (2.23)$$

δηλαδή είναι το άθροισμα της ισχύος της συνιστώσας LoS και της μέσης ισχύος των πολυδιαδρομικών συνιστωσών LoS. Ταυτόχρονα, οι μεταβλητές $r_I(t)$ και $r_Q(t)$ ακολουθούν κανονική κατανομή μέσης τιμής $s/\sqrt{2}$ και διασπορά σ^2 καθώς πρέπει :

$$\sqrt{\mathbb{E}(r_I(t))^2 + \mathbb{E}(r_Q(t))^2} = s$$

$$\text{var}(r_I(t)) + \text{var}(r_Q(t)) = 2\sigma^2$$

Αν τώρα ορίσουμε τον παράγοντα Rice $K = s^2/2\sigma^2$ και εφαρμόσουμε τον μετασχηματισμό $s^2 = K\bar{P}_R/(K+1)$, $2\sigma^2 = \bar{P}_R/(K+1)$ και $Z \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2) \rightarrow Z = \sigma \cdot X + \mu$ όπου $X \sim \mathcal{N}(0, 1)$ έχουμε ότι

$$r_I + jr_Q = \left(\sqrt{\frac{\bar{P}_R}{2(K+1)}} \cdot X + \sqrt{\frac{K\bar{P}_R}{2(K+1)}} \right) + j \left(\sqrt{\frac{\bar{P}_R}{2(K+1)}} \cdot Y + \sqrt{\frac{K\bar{P}_R}{2(K+1)}} \right) \Leftrightarrow$$

$$r_I + jr_Q = \frac{(W + jZ)}{\sqrt{LF}} \quad (2.24)$$

και

$$f_Z(z) = \frac{2z(K+1)}{\bar{P}_R} \exp \left[-K - \frac{(K+1)z^2}{\bar{P}_R} \right] I_0 \left(2z \sqrt{\frac{K(K+1)}{\bar{P}_R}} \right) \quad z \geq 0 \quad (2.25)$$

όπου $\bar{P}_R = 1/LF$, LF οι απώλειες λόγω διαλείψεων μεγάλης κλίμακας και $W, Z \sim \mathcal{N} \left(\sqrt{K/2(K+1)}, 1/2(K+1) \right)$.

2.4 Πρωτόκολλα πολλαπλής προσπέλασης διαύλου

Το ζητούμενο των ασυρμάτων δικτύων επικοινωνιών είναι η εξυπηρέτηση πολλών χρηστών μιας γεωγραφικής περιοχής προς ικανοποίηση των προδιαγραφών λειτουργίας ποιότητας υπηρεσιών (QoS). Ως πολλαπλή πρόσβαση ορίζεται η ταυτόχρονη πρόσβαση από πολλούς χρήστες, που έχουν τόσο γεωγραφική εγγύτητα αλλά και βρίσκονται στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, στους ίδιους ραδιοπόρους. Βασικός στόχος της πολλαπλής προσπέλασης είναι να μην αντιλαμβάνεται αυξομειώσεις στον ρυθμό μετάδοσης και μεταβολές στο επιθυμητό επίπεδο QoS. Σημαντική μετρική αξιολόγησης ενός σχήματος πολλαπλής προσπέλασης είναι η χωρητικότητα του συστήματος, δηλαδή το πλήθος των χρηστών που μπορεί να εξυπηρετήσει το σύστημα με δεδομένη τη διατήρηση του επιθυμητού επιπέδου QoS. Δεδομένου ότι στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα το πλήθος των συσκευών που συνδέονται σε αυτά αυξάνεται συνεχώς υπάρχει ανάγκη για καλύτερη και αποδοτικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων.

2.4.1 Ορθογωνικά Σχήματα Πολλαπλής Προσπέλασης (OMA)

Ο κύριος άξονας της Ορθογωνικής Πολλαπλής Πρόσβασης είναι η ανάθεση ορθογώνιων μεταξύ τους ραδιοπόρων στους χρήστες ώστε να αποφεύγεται η παρεμβολή μεταξύ τους με χρήση κατάλληλων φίλτρων. Οι κύριοι ραδιοπόροι περί των οποίων έχουν αναπτυχθεί τα σχήματα OMA είναι ο χρόνος, η συχνότητα και με την ευρύτερη έννοια οι ορθογωνικοί κώδικες.

Καταρχάς, το σχήμα OMA, που αναπτύχθηκε ως προς τον ραδιοπόρο του χρόνου, είναι το σχήμα Πολλαπλής Πρόσβασης Διάρεσης Χρόνου (Time Division Multiple Access, TDMA). Σύμφωνα με αυτό το σχήμα, ο χρόνος χωρίζεται σε χρονικές σχισμές (time slots), οι οποίες δρομολογούνται στους χρήστες και εντός κάθε μιας ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιεί όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Λόγω της τελευταίας δυνατότητας που παρέχεται πρέπει να λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα αποφυγής διασυμβολικής παρεμβολής (ISI). Όπως είναι κατανοητό, το TDMA προϋποθέτει την ύπαρξη μνήμης στο χρήστη, καθώς θα πρέπει να αποθηκεύει την προς μετάδοση πληροφορία και στο time slot που του αντιστοιχεί να την εκπέμψει συγκεντρωμένη. Επίσης, για τη διασφάλιση της μη αλληλοεπικάλυψης των γειτονικών time slots, εισάγεται ένα χρονικό διάστημα φύλαξης που ονομάζεται guard time interval και για λόγους συγχρονισμού μεταξύ πομπού και δέκτη εισάγεται στην αρχή του κάθε time slot ένα σήμα προθέματος (preamble).

Στη συνέχεια, τα σχήματα (OMA), που αναπτύχθηκαν ως προς το ραδιοπόρο της συχνότητας, είναι το σχήμα Πολλαπλής Προσπέλασης Διάρεσης Συχνότητας (Frequency Division Multiple Access, FDMA) και το σχήμα Πολλαπλής Προσπέλασης Ορθογωνικής Διάρεσης Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiple Access - OFDMA). Επειδή το δεύτερο σχήμα θα το μελετήσουμε αναλυτικά παρακάτω, θα επικεντρωθεί η μελέτη στο πρώτο σχήμα στο σημείο αυτό. Επομένως, στο FDMA οι χρήστες χρησιμοποιούν διαφορετικές φέρουσες συχνότητες μέσω καναλιών σταθερού εύρους ζώνης. Κύριο πρόβλημα του παρόντος σχήματος είναι η ομοδιαυλική παρεμβολή και η παρεμβολή γειτονικού διαύλου (crosstalk) λόγω της κοντινής απόστασης στην οποία βρίσκονται

τα κανάλια. Τέλος, είναι εμφανές ότι το παρόν σχήμα έχει μεγάλες ανάγκες σε εύρος ζώνης.

Το σχήμα (OMA), που βασίστηκε στους ορθογώνιους κώδικες, είναι το σχήμα Πολλαπλής Πρόσβασης Διάρθρωσης Κώδικα (Code Division Multiple Access, CDMA). Σύμφωνα με αυτό το σχήμα, στους χρήστες αναθέτονται ορθογώνιοι κώδικες μεταξύ τους που διευρύνουν τα προς μετάδοση στενής ζώνης σύμβολα στο πεδίο της συχνότητας έτσι ώστε κάθε χρήστης να καταλαμβάνει όλο το διαθέσιμο φασματικό εύρος για όλο το χρόνο. Εάν ο πομπός διαθέτει τους αντίστροφους κώδικες έχει τη δυνατότητα να ανακτήσει τα αρχικά σύμβολα στενής ζώνης. Κύριο πλεονέκτημα του CDMA είναι η δυνατότητα που προσφέρεται σε κάθε χρήστη να επιλέγει ποιον χρήστη θέλει να αποκωδικοποιήσει και η ανθεκτικότητα του ως προς φαινόμενα επιλεκτικών διαλείψεων λόγω της διεύρυνσης του φάσματος και ως προς παρεμβολές τύπου jamming. Από την άλλη, το CDMA υποφέρει από το γνωστό near-far πρόβλημα (ισχυροί χρήστες κοντά στο σταθμό βάσης καθιστούν τους ασθενέστερους απομακρυσμένους χρήστες μη ανιχνεύσιμους) και από την ανάγκη γρηγορότερων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, διότι η κωδικοποιημένη πληροφορία έχει ρυθμό μετάδοσης πολύ μεγαλύτερο του σήματος πληροφορίας.

Από όλα τα ορθογώνια σχήματα πολλαπλής προσπέλασης, αυτό που έχει επικρατήσει ως το πιο αποδοτικό είναι το OFDMA. Ειδικότερα, το διαθέσιμο φασματικό εύρος διαιρείται σε υποφέροντα μικρού εύρους ζώνης. Τα γειτονικά υποφέροντα αλληλοκαλύπτονται ανά δύο και εκμεταλλευόμενα την μεταξύ του ορθογωνιότητα μειώνουν τους κινδύνους διακαναλικής παρεμβολής μεταξύ τους. Έτσι σε αντίθεση με το FDMA δεν απαιτούνται ζώνες προστασίας και στενό φίλτράρισμα. Επιπλέον, στο OFDMA υπάρχει διεμπλοκή στο πεδίο του χρόνου και σε αυτό της συχνότητας ώστε να αντιμετωπιστούν φαινόμενα διαλείψεων μεγάλης κλίμακας (αύξησης των απωλειών) και διαλείψεων λόγου συχνοεπιλεκτικού καναλιού. Χαρακτηριστικό της ευελιξίας του OFDMA είναι το γεγονός ότι ο αριθμός των υποφερόντων, που αναθέτονται ανά χρήστη, μπορεί να καθορισθεί ανάλογα με τις συνθήκες του διαύλου που αντιμετωπίζει και τις ανάγκες του σε QoS. Ακόμα το OFDMA μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνδυαστικά με το TDMA, καθώς η ανάθεση των υποφερόντων μπορεί να γίνει ανά time slot και συνεπώς να έχουμε ευελιξία τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας.

Όπως είναι εμφανές κύριο μειονέκτημα των ορθογωνικών σχημάτων πολλαπλής προσπέλασης, είναι ότι κάθε τεμάχιο ραδιοπόρου (Resource Block) μπορεί να καταλαμβάνεται από έναν και μόνο χρήστη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ένα πρακτικό όριο στον αριθμό των χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτοχρόνως, ο οποίος είναι ανάλογος των διαθέσιμων ραδιοπόρων. Επίσης, είναι αναγκαία η ύπαρξη σύνθετων αλγορίθμων δρομολόγησης ώστε χρήστες με χαμηλές απαιτήσεις να μην δεσμεύουν RB που δεν χρειάζονται. Έτσι οι ορθογωνικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης έχουν χαμηλή φασματική απόδοση σε σύγχρονα συστήματα υψηλής κινητικότητας και χρηστών με μεταβαλλόμενες απαιτήσεις.

2.4.2 Σχήματα Πολλαπλής Προσπέλασης Διάρθρωσης Χώρου (SDMA)

Η ανάπτυξη της τεχνολογία των στοιχειοκεραιών έδωσε την δυνατότητα αξιοποίησης του πεδίου του χώρου προς αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, μέσω των στοιχειοκεραιών είναι επιτεύξιμη η δημιουργία (μέσω ηλεκτρονικού χειρισμού) πολλαπλών κατευθυντικών δεσμίδων προς επιθυμητές κατευθύνσεις δημιουργώντας έτσι τομείς (sectors). Έτσι, πολλοί χρήστες μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα στο ίδιο κανάλι με υπέρθεση των αντίστοιχων κατευθυντικών ραδιοκυμάτων επιτρέποντας αύξηση στο δείκτη επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων σε κυψελωτά δίκτυα [32]. Πρέπει να επισημάνουμε όμως ότι πρέπει να γίνει κατάλληλη ρύθμιση του επιπέδου ισχύος εκπομπής από κάθε χρήστη ώστε να αποφευχθεί το near-far πρόβλημα [33] και ταυτόχρονα χρήστες που χρησιμοποιούν το ίδιο εύρος συχνοτήτων πρέπει να απέχουν μια συγκεκριμένη γωνιακή απόσταση μεταξύ τους ώστε να γίνονται αντιληπτές ως διαφορετικές οντότητες από το Σταθμό Βάσης [34]. Για το λόγο αυτό, λοιπόν, έχει προταθεί η ομαδοποίηση των κινη-

τών χρηστών σε κλάσεις ισχύος, όπου οι χρήστες κάθε κλάσης δύνανται να χρησιμοποιούν το ίδιο σύνολο καναλιών [35]. Σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη τέτοιων σχημάτων πολλαπλής προσπέλασης διαδραμάτισε η τεχνολογία Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων (Multiple Inputs Multiple Outputs - MIMO) [36] τόσο στη πλευρά των χρηστών όσο και στην πλευρά του Σταθμού Βάσης. Ειδικότερα, ο πομπός αντιγράφει τις ακολουθίες συμβόλων πληροφορίας σε ανεξάρτητες ροές δεδομένων και μεταδίδει την καθενιά από μία διαφορετική κεραία. Ο κάθε δέκτης στη συνέχεια λαμβάνει έναν ξεχωριστό γραμμικό συνδυασμό των προς μετάδοση διαμορφωμένων ροών (streams). Έχει αποδειχθεί ότι στο σχήμα αυτό η χωρητικότητα αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση του πλήθους των κεραιών σε πομπό και δέκτη [37]. Το κύριο πλεονέκτημα του MIMO είναι ότι επιτυγχάνει μεγάλα κέρδη διαδρομών ακόμα και σε περιβάλλοντα πολλών εμποδίων όπου τα φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης είναι έντονα. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι το (SDMA) απαιτεί για την αποτελεσματική λειτουργία του πολύ καλή γνώση της κατάστασης του καναλιού (Channel State Information - CSI) και συγχρονισμό μεταξύ Σταθμού Βάσης και χρηστών [38].

2.4.3 Σχήμα Μη Ορθογωνικής Πολλαπλής Προσπέλασης (NOMA)

Το σχήμα NOMA σε αντίθεση με τα προαναφερθέντα σχήματα πολλαπλής προσπέλασης (ορθογώνια) έχει την ικανότητά να εξυπηρετεί πολλούς χρήστες χρησιμοποιώντας τους ίδιους πόρους χρόνου και συχνότητας. Ο μηχανισμός εφαρμογής της (NOMA) έχει ως εξής [39] : στον πομπό όλα τα επιμέρους σήματα πληροφοριών υπερτίθενται σε μια ενιαία κυματομορφή. Στην μεριά του δέκτη, μέσω της διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολών (Successive Interference Cancellation - SIC) αποκωδικοποιούνται όλα τα σήματα ένα προς ένα μέχρι να ανακτηθεί το επιθυμητό σήμα. Πιο αναλυτικά, πρώτα αποκωδικοποιείται το ισχυρότερο, ενώ τα άλλα θεωρούνται ως παρεμβολή. Έπειτα, το πρώτο αποκωδικοποιημένο σήμα αφαιρείται από το λαμβανόμενο σήμα και εάν η αποκωδικοποίηση είναι τέλεια, λαμβάνεται με ακρίβεια η κυματομορφή με τα υπόλοιπα σήματα. Η άνωθεν διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ανακτηθεί το επιθυμητό σήμα.

Όσον αφορά τα πλεονεκτήματα της (NOMA) αυτά είναι πολλαπλά. Αρχικά, επιτυγχάνει ανώτερη φασματική απόδοση εξυπηρετώντας πολλούς χρήστες ταυτόχρονα και με τον ίδιο πόρο συχνότητας και μετριάζοντας τις παρεμβολές μέσω SIC. Παράλληλα, αυξάνει τον αριθμό των χρηστών που εξυπηρετούνται ταυτόχρονα και έτσι μπορεί να υποστηρίξει μαζική συνδεσιμότητα. Ακόμα, λόγω της φύσης της ταυτόχρονης μετάδοσης, ένας χρήστης δεν χρειάζεται να περιμένει για την ανατεθειμένο time slot για να μεταδώσει τις πληροφορίες του και, ως εκ τούτου, αντιμετωπίζει χαμηλότερη καθυστέρηση. Τέλος, η NOMA μπορεί να εξασφαλίσει δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών και ευελιξία σε QoS μέσω του ευέλικτου ελέγχου ισχύος μεταξύ ισχυρών και αδύναμων χρηστών.

2.5 Εισαγωγή στο Automata Learning

Με τον όρο Automata Learning (LA) ορίζουμε την προσαρμοστική μέθοδο λήψης απόφασης όταν το περιβάλλον λειτουργίας και αλληλεπίδρασης είναι κατά κύριο λόγο άγνωστο στον χρήστη. Το LA συνδυάζει γρήγορη και ακριβή σύγκλιση με χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα και έχει εφαρμοστεί σε μια σειρά προβλημάτων μοντελοποίησης και ελέγχου. Η μέθοδος αυτή σχετίζεται στενά με την δημοφιλή προσέγγιση της Ενισχυτικής Μάθησης (Reinforcement Learning - RL), η οποία τα τελευταία χρόνια έχει συγκεντρώσει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον.

Αν και η RL είναι μια καθιερωμένη και με σημαντικό θεωρητικό υπόβαθρο μέθοδος για μάθηση σε αυτόνομα ή μονόπρακτα (Single Agent) συστήματα, δεν έχει την ίδια θεμελίωση για συστήματα πολλαπλών χρηστών (Multiple Agent System - MAS). Πιο συγκεκριμένα, όσο το περιβάλλον του χρήστη διέπεται από τη ιδιότητα Markov (δηλαδή η επόμενη ενέργεια εξαρτάται μόνο από την παρούσα κατάσταση και όχι το παρελθόν) και ο χρήστης έχει την δυνατότητα να αλληλοεπιδράσει

πολλαπλώς με το περιβάλλον, τότε το RL εγγυάται τη σύγκλιση στην βέλτιστη στρατηγική προς όφελος του χρήστη. Ωστόσο, σε ένα περιβάλλον MAS, η ανταμοιβή (reward) που λαμβάνει ένας πράκτορας κατά τη διάρκεια ενός RL μπορεί να εξαρτάται από τις ενέργειες που πραγματοποιούν άλλοι πράκτορες που ενεργούν στο ίδιο περιβάλλον. Ως εκ τούτου, η μαρκοβιανή ιδιότητα παύει να ισχύει πλέον και δεν υπάρχει σίγουρη σύγκλιση του αλγορίθμου. Από την άλλη, το LA ενημερώνεται αποκλειστικά με βάση την ανάδραση από το περιβάλλον και όχι με βάση οποιαδήποτε γνώσης σχετικά με τα άλλα αυτόματα ενώ ταυτόχρονα υπάρχει και η απαιτούμενη θεωρητική θεμελίωση.

2.5.1 Βασικές εξισώσεις Automata Learning

Το πιο απλό μοντέλο LA [40] αφορά την περίπτωση ενός χρήστη και ενός ενιαίου συνόλου πιθανών καταστάσεων (Single Stage – Single Agent). Σε κάθε χρονική στιγμή το LA έχει μια κατανομή πιθανότητας, για κάθε μια από τις πιθανές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί, συμβολίζεται με $p(t) = [p_1(t), \dots, p_l(t)]$ όπου το $p_i(t)$ αντιπροσωπεύει την πιθανότητα για επιλεχθεί η ενέργεια i τη χρονική στιγμή t και l είναι το πλήθος των πιθανών καταστάσεων που μπορεί να βρεθεί. Οι παραπάνω πιθανότητες αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου με βάση την ανάδραση από το περιβάλλον, που αντικατοπτρίζεται μέσω μιας συνάρτησης ανταμοιβής, μετά από την εκτέλεση μιας ενέργειας από το αυτόματο. Αν υποθέσουμε ότι η ανταμοιβή είναι δυαδική, δηλαδή κάθε ενέργεια είναι επιτυχία ή αποτυχία, τότε το μοντέλο ανανέωσης των τιμών των πιθανοτήτων είναι

- Σε περίπτωση επιτυχίας τη χρονική στιγμή t

$$\begin{cases} p_i(t+1) = p_i(t) + a \cdot (1 - p_i(t)), & \text{παρούσα κατάσταση } i & (2.26\alpha') \\ p_j(t+1) = p_j(t) \cdot (1 - a), & \forall \text{ κατάσταση } \theta \neq i & (2.26\beta') \end{cases}$$

- Σε περίπτωση αποτυχίας τη χρονική στιγμή t

$$\begin{cases} p_i(t+1) = p_i(t) - b \cdot p_i(t), & \text{παρούσα κατάσταση } i & (2.27\alpha') \\ p_j(t+1) = p_j(t) + b \cdot [(l-1)^{-1} - p_j(t)], & \forall \text{ κατάσταση } \theta \neq i & (2.27\beta') \end{cases}$$

όπου $a, b \in [0, 1]$ και είναι αντίστοιχα οι παράμετροι κέρδους και ποινής αντίστοιχα.

Το παραπάνω μοντέλο δυαδικής ανταμοιβής ονομάζεται P -model. Αν η ανταμοιβή μπορεί να λάβει τιμές από ένα σύνολο διακριτών τιμών τότε το μοντέλο ονομάζεται Q -model ενώ αν μπορεί να λάβει τιμές από ένα συνεχές εύρος τιμών ονομάζεται S -model. Για την τελευταία περίπτωση, τότε το μοντέλο ανανέωσης των τιμών των πιθανοτήτων είναι

$$\begin{cases} p_i(t+1) = p_i(t) + a \cdot r(t) \cdot (1 - p_i(t)) - b \cdot (1 - r(t)) \cdot p_i(t), & (2.28\alpha') \\ \text{παρούσα κατάσταση } i \\ p_j(t+1) = p_j(t) - a \cdot r(t) \cdot p_j(t) + b \cdot (1 - r(t)) \cdot [(l-1)^{-1} - p_j(t)], & (2.28\beta') \\ \forall \text{ κατάσταση } \theta \neq i \end{cases}$$

Να υπογραμμίσουμε ότι στην έως τώρα παρουσίαση έχουμε θεωρήσει ότι το πλήθος των πιθανών καταστάσεων είναι πεπερασμένο και συνεπώς βρισκόμαστε στην ευρύτερη κατηγορία των Finite Action Learning Automata - FALA.

2.5.2 Παρουσίαση εκδοχών Automata Learning

Υπάρχουν τρεις μεγάλες κατηγορίες LA βάσει των τιμών που λαμβάνουν οι παράμετροι a, b .

- Αν θέσουμε $b = 0$ και επομένως λαμβάνοντας υπόψιν μόνο το κέρδος, ο αλγόριθμος ονομάζεται linear reward-inaction (L_{R-I}). Στην περίπτωση αυτή ο αλγόριθμος συγκλίνει, δηλαδή κάποια πιθανότητα $p_i(t)$ θα λάβει τιμή 1 σε πεπερασμένο αριθμό βημάτων. Η παραπάνω έκβαση αποκαλείται και pure policy καθώς μας υποδεικνύει την πλέον συμφέρουσα κατάσταση. Σε περίπτωση που $b \neq 0$ η παραπάνω ιδιότητα δεν ισχύει.
- Αν θέσουμε $b \ll a$, ο αλγόριθμος ονομάζεται linear reward-ε-penalty ($L_{R-\epsilon P}$). Εδώ το αυτόματο φτάνει προσεγγιστικά σε pure policy, καθώς κάποια πιθανότητα $p_i(t)$ θα τείνει στην μονάδα χωρίς όμως να λαμβάνει την τιμή αυτή σε πεπερασμένο αριθμό βημάτων.
- Αν θέσουμε $a = b$, ο αλγόριθμος ονομάζεται linear reward-penalty (L_{R-P}). Εδώ παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν οι διακυμάνσεις μέχρι να φτάσουμε σε σύγκλιση των τιμών όπως είχαμε στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις αλλά η διαδικασία μάθησης είναι εξαιρετικά αργή.

Στην πορεία της διπλωματικής διαδικασίας θα ασχοληθούμε με αυτόματα τα οποία επιτυγχάνουν pure policy, δηλαδή θα ασχοληθούμε με μια εκδοχή L_{R-I} . Στην περίπτωση αυτή, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του κέρδους a , τόσο πιο γρήγορα συγκλίνει ο αλγόριθμος, διότι η παράμετρος a μπορεί να θεωρηθεί και ως ρυθμός μάθησης (learning rate) του αυτόματου. Από την άλλη όμως όσο μεγαλύτερη η τιμή της παραμέτρου a τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα το αυτόματο να συγκλίνει σε κάποια υπό-βέλτιστη (suboptimal) λύση λόγω του γεγονότος ότι το η εκδοχή L_{R-I} εγγυάται την εύρεση μιας υπό-βέλτιστης λύσης.

2.5.3 Σύγκλιση αλγορίθμου Automata Learning

Στο παρόν μέρος πρόκειται να μελετηθούν ορισμένα θέματα σύγκλισης του αλγορίθμου Automata Learning για δραστηριοποίηση του σε στατικό περιβάλλον, δηλαδή σε περιβάλλον που για μια συγκεκριμένη ενέργεια το κέρδος ή η ποινή δεν μεταβάλλονται. Καταρχάς, όπως έχουμε αναφέρει στόχος του LA είναι να βρει τη βέλτιστη ενέργεια, χωρίς να γνωρίζει τις πιθανότητες κέρδους ή ποινής για κάθε διαθέσιμη ενέργεια εντός του περιβάλλοντος δράσης. Αν ορίσουμε την παράμετρο ποινής για την ενέργεια A/A_i ως $c_i = 1 - a \cdot r_i$ όπου a ο ρυθμός μάθησης και r_i η ανταμοιβή για την ενέργεια με A/A_i , τότε για τη βέλτιστη ενέργεια θα ισχύει ότι $c_{optimal} = \min\{c_i\}$. Για να ποσοτικοποιήσουμε πόσο καλά προσεγγίζει ο αλγόριθμος LA ορίζουμε τη μετρική $M(t)$ που είναι η μέση ποινή για ένα δεδομένη κατανομή πιθανοτήτων για κάθε δυνατή ενέργεια, ως εξής :

$$M(t) = \mathbb{E}[c(t)|p(t)] = \sum_{i=1}^l c_i \cdot p_i(t) \quad (2.29)$$

όπου l το πλήθος των δυνατών ενεργειών. Στην περίπτωση που $p_i(t) = 1/l \quad \forall i \in \{1, \dots, l\}$, δηλαδή βρισκόμαστε σε μια ουδέτερη - ισοπίθανη πολιτική του LA τότε

$$M(t) = M_0 = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l c_i \quad (2.30)$$

Ορισμός 1 Ένας αλγόριθμος LA καλείται βέλτιστος αν $\lim_{t \rightarrow +\infty} \mathbb{E}[M(t)] = c_{optimal}$

Ορισμός 2 Ένας αλγόριθμος LA καλείται υπό-βέλτιστος (ϵ -οπτιμαλ) αν για κάθε $\epsilon > 0$ και κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων του LA έχουμε ότι $\lim_{t \rightarrow +\infty} \mathbb{E}[M(t)] = c_{optimal} + \epsilon$

Παρόλα αυτά σε τυχαία περιβάλλοντα και με αυθαίρετη αρχικοποίηση της κατανομής πιθανοτήτων για κάθε δυνατή ενέργεια είναι δύσκολο να επιτύχουμε μια βέλτιστη ή ακόμη και υπο-βέλτιστη λύση. Ως εκ τούτου, χρειάζεται να προσδιορίσουμε την επιτυχία της δράσης του LA μέσω της ιδιότητας της σκοπιμότητας και της υπο-σκοπιμότητας.

Ορισμός 3 Ένας αλγόριθμος LA καλείται σκόπιμος (*expedient*) αν αποδίδει καλύτερα από μια ουδέτερη πολιτική δηλαδή $\lim_{t \rightarrow +\infty} M(t) < M_0$

Ορισμός 4 Ένας αλγόριθμος LA καλείται πλήρως σκόπιμος (*absolute expedient*) αν $\mathbb{E}[M(t+1) | p(t)] < M_0$

Έχει αποδειχθεί ότι για στατικά περιβάλλοντα δράσης, η απόλυτη σκοπιμότητα συνεπάγεται εύρεση της υπό-βέλτιστης λύσης για ένα αλγόριθμο LA. Όσον αφορά τώρα τους αλγορίθμους που παρουσιάστηκαν στο Μέρος 4.2 ισχύουν τα ακόλουθα : ο αλγόριθμος L_{R-I} έχει αποδειχθεί ότι είναι απόλυτα σκόπιμος και συνεπώς υπό-βέλτιστος για στατικά περιβάλλοντα, ο αλγόριθμος L_{R-P} είναι σκόπιμος και ο αλγόριθμος $L_{R-\epsilon P}$ είναι και αυτός υπό-βέλτιστος.

2.5.4 Αλγόριθμος Automata Learning για πολλαπλούς χρήστες με κοινό σύνολο ενεργειών

Μέχρι στιγμής έχουμε υποθέσει ότι μόνο ένα μεμονωμένο αυτόματο δρούσε στο περιβάλλον. Σε αυτό το μέρος πρόκειται να εξετάσουμε τη συμπεριφορά του αλγορίθμου LA όταν πολλοί χρήστες τοποθετούνται στο ίδιο περιβάλλον και επιλέγουν τις ενέργειές τους ανεξάρτητα. Σε μια τέτοια περίπτωση λέμε ότι έχουμε έναν αλγόριθμο ενιαίου περιβάλλοντος πολλαπλών χρηστών (Single State – Multiple Agents). Είναι εμφανές πλέον ότι το reward που λαμβάνει κάθε χρήστης πλέον δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τις δικές του ενέργειες αλλά και από τις ενέργειες άλλων χρηστών. Σχετικά με τη σύγκλιση ενός αλγορίθμου LA σε ένα τέτοιο πλαίσιο δράσης διατυπώθηκε από τους Narendra και Wheeler θεώρημα [41], το οποίο εξασφαλίζει την σύγκλιση του αλγορίθμου σε ένα σημείο ισορροπίας υπό τις παραπάνω συνθήκες για αυθαίρετα μικρό ρυθμό μάθησης. Αυτό το σημείο ισορροπίας θα ταυτίζεται με το σημείο ισορροπίας Nash του συστήματος στην περίπτωση που το σύστημα διαθέτει σημείο ισορροπίας Nash. Τέλος, είναι σημαντικό να υπογραμμίσουμε ότι κάθε χρήστης του συστήματος μπορεί να εφαρμόσει έναν αλγόριθμο L_{R-I} ενημερώνοντας το διάνυσμα κατάστασης πιθανοτήτων του βάσει μόνο των προσωπικών του πληροφοριών, δηλαδή βάσει της δικής του ενέργειας που έπραξε και της δικής του ανταμοιβής που έλαβε από το περιβάλλον.

Κεφάλαιο 3

Μοντελοποίηση συστήματος

3.1 Γενικά χαρακτηριστικά τοπολογίας

3.1.1 Συχνότητα και εύρος ζώνης λειτουργίας

Ξεκινώντας την μελέτη του προτεινόμενου συστήματος επικοινωνιών κρίνεται ορθό να καθορίσουμε την ζώνη συχνοτήτων στην οποία πρόκειται να λειτουργήσει το σύστημα καθώς και το επίπεδο ισχύος εκπομπής του κάθε χρήστη. Καταρχάς, θεωρούμε ότι τόσο το communication mode όσο και το sensing mode πραγματοποιούνται στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Ακόμα, το σύστημα πολλαπλής προσπέλασης που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι το Σύστημα Πολλαπλής Προσπέλασης με Ορθογώνια Διαίρεση Συχνότητας (OFDMA). Με δεδομένο ότι το σύστημα πρόκειται να έχει εφαρμογή σε δίκτυα 5G/NR και B5G [42] και σε outdoor περιβάλλοντα επικοινωνίας ξεκινάμε να μελετήσουμε την μεσαία ζώνη συχνοτήτων του 5G από τα $2-7GHz$. Πιο συγκεκριμένα, στα $3.6GHz$ διατίθενται συνολικά εύρος ζώνης $200 MHz$ ($B_{total} = 198MHz$ προς αξιοποίηση και $2MHz$ προς κενό ασφαλείας για άλλες ζώνες συχνοτήτων), το οποίο χωρίζεται σε Resource Block (RB) έκαστο το οποίο φέρει 12 υποφέροντα (subcarriers) εύρους ζώνης $B_{subcarrier} = 60KHz$. Επομένως, κάθε RB έχει εύρος ζώνης $B_{resource\ block} = 720KHz$ και συνολικά αυτή η ζώνη μπορεί να παρέχει $B_{total}/B_{resource\ block} = 275 RBs$ προς αξιοποίηση. Ας γίνει η θεώρηση για προσφορά 1 RB ανά χρήστη ώστε να μελετηθεί το σενάριο χειρότερης περίπτωσης.

Η παραπάνω ανάθεση όμως μπορεί να ικανοποιήσει μόνο το communication mode και όχι το sensing mode για τους ακόλουθους λόγους. Πιο συγκεκριμένα, το ελάχιστο σφάλμα απόστασης (radial resolution), δηλαδή η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο αντικειμένων ώστε αυτά να ανιχνευθούν ως ξεχωριστές οντότητες, δίνεται από την σχέση

$$\Delta r \geq \frac{c}{2 \cdot B} \quad (3.1)$$

Όπου σφάλμα απόστασης Δr , η ταχύτητα του φωτός c και το εύρος ζώνης για sensing B . Αν θεωρήσουμε $B = B_{resource\ block}$ και $c = 3 \cdot 10^8 m/s$ τότε το Δr λαμβάνει ελάχιστη τιμή $2.5km$ το οποίο είναι απαγορευτικό. Εφόσον βρισκόμαστε σε κυψελωτό σύστημα επικοινωνιών μια εύλογη τιμή του Δr θα ήταν στα $1.5m$ και ως εκ τούτου απαιτείται το B να λάβει την τιμή $100MHz$.

Επιπλέον, αξίζει να παραθέσουμε ορισμένες σχέσεις σχετικά με το sensing mode από την θεωρία της τηλεπισκόπησης (Radar Theory). Η μέγιστη ταχύτητα με την οποία μπορείτε να κινείται ένας στόχος ώστε να ανιχνευθεί ισούται με

$$u_{max} = \lambda / (4 \cdot T_s) \quad (3.2)$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος και ισούται με $\lambda = c/f$ και T_s η χρονική απόσταση μεταξύ διαδοχικών παλμών. Για $u_{max} = 50km/h$ (μέγιστη ταχύτητα οχημάτων εντός αστικού ιστού) τότε $T_s = 216\mu s$.

Ακόμα, το εύρος ζώνης για sensing mode ισούται με

$$B_{sensing} = T_c \cdot S \quad (3.3)$$

όπου T_c είναι η διάρκεια του παλμού και S το slope rate του παλμού. Αν θεωρήσουμε κοινό $T_c = 10\mu s$ τόσο για communication όσο και για sensing mode τότε το $S = 72KHz/\mu s$. Ο ρυθμός δειγματοληψίας δίνεται από τη σχέση

$$f_r = 2 \cdot S \cdot D/c \quad (3.4)$$

όπου D είναι η μέγιστη εμβέλεια του radar (m) και βάσει των άνωθεν τιμών έχουμε ότι $f_r = 480 \cdot D$. Τέλος, το γωνιακό σφάλμα (angular resolution) $\Delta\phi$ δίνεται από τη σχέση

$$\Delta\phi \geq 2 \cdot D \cdot \sin(\Delta_{3dB}/2) \quad (3.5)$$

όπου $\Delta_{3dB}/2$ είναι το άνοιγμα ημίσειας ισχύος της κεραίας. Λόγω και πάλι του κυψελωτού περιβάλλοντος λειτουργίας μια εύλογη τιμή του $\Delta\phi$ είναι το $1.5m$. Έτσι αν θεωρηθεί $D = 20m$ τότε $\Delta_{3dB}/2 \approx 4.3^\circ$ και για $D = 20m$ τότε $\Delta_{3dB}/2 \approx 2.1^\circ$.

Άρα, προκύπτει άμεσα η ανάγκη διαχωρισμού στην ανάθεση του εύρους ζώνης για communication και sensing mode αποδίδοντας πλέον εύρος ζώνης για communication $B_{comm} = 720KHz$, $B_{comm} = N_c \cdot B_{subcarrier}$ όπου N_c το πλήθος των υποφερόντων που έχουν ανατεθεί στον εκάστοτε χρήστη και $B_{sensing} = 100MHz$. Κατευθείαν μπορούμε να διαπιστώσουμε πως στην ζώνη των $3.6GHz$ δεν μπορούμε να δώσουμε εύρος ζώνης $100MHz$ και επομένως κρίνεται αναγκαίο να μεταπηδήσουμε σε υψηλότερη ζώνη συχνοτήτων και πιο συγκεκριμένα στα $25GHz$ – στην αρχή των τεχνολογιών mmWave –. Αν μέναμε στην ζώνη των $3.6GHz$ τότε θα ήταν αναγκαστικό να υπάρχει κοινή χρήση εύρους ζώνης για communication και sensing και ο λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή χωρίς την επίδραση του καναλιού για communication mode θα δινόταν από τη σχέση (θεωρώντας ομοιόμορφη κατανομή ισχύος στο ισοδύναμο εύρος ζώνης)

$$\left\{ \begin{array}{l} SNIR = P/(N_0 \cdot B_{comm} + P \cdot B_{comm}/B_{sensing}) \\ SNR = P/(N_0 \cdot B_{comm}) \end{array} \right. \quad (3.6\alpha')$$

$$(3.6\beta')$$

όπου P η ισχύς εκπομπής του User Equipment (UE) και N_0 η φασματική πυκνότητα θορύβου. Θεωρώντας τυπικές τιμές για κυψελωτό σύστημα επικοινωνιών $P = 23dBm (= 250mW)$ και $N_0 = -174dBm/Hz$ (που αντιστοιχεί σε $N_0 = k \cdot T_0, T_0 = 290^\circ K$ φυσική θερμοκρασία συστήματος, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ η σταθερά του Boltzmann) έχουμε ότι $SNIR = 11dB$ ενώ $SNR = 138dBm$. Είναι εμφανές ότι δεν μπορούμε να δεχθούμε τέτοια επίπεδα παρεμβολής στο σύστημά μας.

3.1.2 Γενικά χαρακτηριστικά της τοπολογίας προς προσομοίωση

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το Integrated Sensing and Communication (ISAC) πρόκειται να προσεγγιστεί ως σύστημα θέτοντας το τερματικό του εκάστοτε χρήστη (User Equipment - UE) ως κύριο πρωταγωνιστή καθώς θα μελετηθεί τόσο sensing το οποίο θα πραγματοποιεί όσο και η ανοδική ζεύξη (uplink) κατά την επικοινωνία του με τον Σταθμό Βάσης (Base Station - BS). Ακόμα το είδος της κυψέλης που έχει επιλεγεί είναι αυτό της Micro Cell, το οποίο έχει εύρος κάλυψης μερικές εκατοντάδες μέτρα. Εφόσον το προτεινόμενο σύστημα πρόκειται να εφαρμοστεί σε συνθήκες αστικού και πυκνοκατοικημένου περιβάλλοντος η άνωθεν επιλογή θεωρείται λογική αν συνυπολογίσουμε και το γεγονός ότι θέλουμε να παρέχουμε βελτίωση σε δύσκολες συνθήκες Line of Sight (LoS) που είναι πανταχού παρούσες σε τέτοιες περιοχές. Επιπλέον, επιλέγουμε να διασπάσουμε την εξαγωνική κυψέλη σε 6 επιμέρους τομείς (sectors) και να μελετήσουμε το προτεινόμενο σύστημα σε ένα εξ αυτών θεωρώντας επαναληψιμότητα στην τοπολογία. Η παραπάνω επιλογή ενισχύθηκε από τις υπολογιστικές δυνατότητες του Η/Υ που πρόκειται να εκτελέσει την προσομοίωση.

Εντός της κυψέλης κάθε συσκευή (device) πρόκειται να είναι UE ή ανακλαστική επιφάνεια ή στόχος προς ανίχνευση (Target) ή Base Station. Το πλήθος των UE ισούται με N , το πλήθος των Targets ισούται με K , το πλήθος των RIS ισούται με R και το πλήθος των Base Stations με BS (στην παρούσα προσομοίωση έχουμε $BS = 1$). Επίσης, εφόσον μελετάμε την βελτίωση που μπορεί να παρέχει η ανακλαστική επιφάνεια σε καταστάσεις κακού απευθείας μονοπατιού (direct path) από το UE προς το αντικείμενο ενδιαφέροντος (Object), που μπορεί να είναι είτε Target για sensing mode είτε Base Station για communication mode, χαρακτηρίζουμε την ποιότητα των καναλιών ως εξής :

- Το κανάλι μεταξύ του UE και του RIS είναι Line of Sight (LoS)
- Το κανάλι μεταξύ του UE και του Object είναι Non Line of Sight (NLoS)
- Το κανάλι μεταξύ του RIS και του Object είναι LoS και NLoS, ένας συνδυασμός που πρόκειται να διευκρινιστεί όταν παρουσιαστεί η μοντελοποίηση του καναλιού.

3.2 Μοντελοποίηση καναλιού κατά 3GPP

Ακολουθώντας την οδηγία 3GPP TR 38.901 version 16.1.0 Release 16 [43] για περιβάλλον διάδοσης Urban Micro Cell Street Canyon (UMi SC) έχουμε ότι για την LoS συνιστώσα :

$$PL_{UMi-LoS} = \begin{cases} PL_1(dB), & 10m \leq d_{2D} \leq d'_{BP} \\ PL_2(dB), & d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5km \end{cases} \quad (3.7)$$

$$PL_1 = 32.4 + 21\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c) \quad (3.8)$$

$$PL_2 = 32.4 + 40\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c) - 9.5 \log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UE})^2) \quad (3.9)$$

$$d'_{BP} = 4 \cdot h'_{BS} \cdot h'_{UE} \cdot f_c / c, \quad h'_{BS} = h_{BS} - h_E, \quad h'_{UE} = h_{UE} - h_E \quad (3.10)$$

όπου PL οι απώλειες λόγω διάδοσης σε κλίμακα dB , d_{2D} η απόσταση μεταξύ δύο χρηστών στο δισδιάστατο επίπεδο (xy) σε m , d_{3D} η απόσταση μεταξύ δύο χρηστών στο τρισδιάστατο χώρο (xyz) σε m , f_c η κεντρική συχνότητα σε GHz , h_{BS} το ύψος του Base Station που ισούται με $10m$, h_{UE} το ύψος του τερματικού που βρίσκεται στο εύρος τιμών $1.5m \leq h_{UE} \leq 22.5m$. Ως d'_{BP} ορίζεται η απόσταση αλλαγής (breakpoint distance) και h'_{BS} , h'_{UE} ορίζονται τα ενεργά ύψη των δύο τερματικών, δηλαδή αν από τα φυσικά τους ύψη αφαιρεθεί το ενεργό ύψος του περιβάλλοντος (effective environment height h_E). Αν τώρα θέλουμε να λάβουμε υπόψιν και το φαινόμενο της σκίασης (shadowing) τότε έχουμε λογαριθμοκανονική κατανομή

$$PL_{UMi-LoS}^{with\ shadowing} \sim \log\mathcal{N}(PL_{UMi-LoS}, \sigma_{SF}^2), \sigma_{SF} = 4dB \quad (3.11)$$

. Όσον αφορά την NLoS συνιστώσα οι απώλειες λόγω διάδοσης είναι :

$$PL_{UMi-NLoS} = 32.4 + 31.9\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c) \quad (3.12)$$

και αν λάβουμε υπόψιν και το φαινόμενο της σκίασης (shadowing) τότε έχουμε λογαριθμοκανονική κατανομή

$$PL_{UMi-NLoS}^{with\ shadowing} \sim \log\mathcal{N}(PL_{UMi-NLoS}, \sigma_{SF}^2), \sigma_{SF} = 8.2dB \quad (3.13)$$

Η πιθανότητα ένα κανάλι να είναι LoS δίνεται από τη σχέση

$$\mathbb{P}_{LoS} = \min(20/d_{2D}, 1) \cdot (1 - \exp(-d_{2D}/39)) + \exp(-d_{2D}/39) \quad (3.14)$$

. Επίσης, η οδηγία αναφέρει ότι σε ένα μη αμιγώς κανάλι LoS ή NLoS, οι συνολικές απώλειες μπορούν να υπολογιστούν ως

$$PL = \mathbb{P}_{LoS} \cdot PL_{UMi-LoS} + (1 - \mathbb{P}_{LoS}) \cdot PL_{UMi-NLoS} \quad (3.15)$$

αν λάβουμε υπόψιν μόνο τις απώλειες διάδοσης ή ως

$$PL^{with\ shadowing} = \mathbb{P}_{LoS} \cdot PL_{UMi-LoS}^{with\ shadowing} + (1 - \mathbb{P}_{LoS}) \cdot PL_{UMi-NLoS}^{with\ shadowing} \quad (3.16)$$

αν λάβουμε υπόψιν και φαινόμενα (shadowing), όπου τα επιμέρους PL είναι όλα σε κλίμακα dB . Τέλος, ο παράγοντας Rice K δίνεται ότι ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή με μέση τιμή $9dB$ και τυπική απόκλιση $5dB$.

Με βάση τα παραπάνω και την θεώρηση που πραγματοποιήσαμε για τα γενικά χαρακτηριστικά κάθε καναλιού έχουμε ότι :

- Για το κανάλι μεταξύ UE και RIS έχουμε $PL = PL_{UMi-LoS}$ και $PL^{with\ shadowing} = PL_{UMi-LoS}^{with\ shadowing}$.
- Για το κανάλι μεταξύ UE και Object έχουμε $PL = PL_{UMi-NLoS}$ και $PL^{with\ shadowing} = PL_{UMi-NLoS}^{with\ shadowing}$.
- Για το κανάλι μεταξύ RIS και Object έχουμε $PL = \mathbb{P}_{LoS} \cdot PL_{UMi-LoS} + (1 - \mathbb{P}_{LoS}) \cdot PL_{UMi-NLoS}$ και $PL^{with\ shadowing} = \mathbb{P}_{LoS} \cdot PL_{UMi-LoS}^{with\ shadowing} + (1 - \mathbb{P}_{LoS}) \cdot PL_{UMi-NLoS}^{with\ shadowing}$.

3.3 Περιγραφή του συστήματος μέσω εξισώσεων

3.3.1 Παρουσίαση της κεντρικής εξίσωσης του συστήματος

Η κεντρική εξίσωση που περιγράφει τον παράγοντα καναλιού (channel coefficient) [1] για το σήμα από ανάκλαση μέσω της επιφάνειας RIS είναι :

$$h_{with\ RIS} = \frac{(X + jY)}{\sqrt{LF_1}} + \frac{1}{\sqrt{LF_2 \cdot LF_3}} \cdot h_{output}^H \cdot \Omega \cdot h_{input} \quad (3.17\alpha')$$

$$h_{output} \in \mathbb{C}^{M \times 1}, h_{input} \in \mathbb{C}^{M \times 1} \quad (3.17\beta')$$

$$h_{output}(i, 1) = (W_i + jZ_i) \cdot \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d_s \cdot (i - 1) \cdot \cos(\gamma_{out})\right) \quad (3.17\gamma')$$

$$h_{input}(i, 1) = \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d_s \cdot (i - 1) \cdot \cos(\gamma_{in})\right) \quad (3.17\delta')$$

$$\Omega \in \mathbb{C}^{M \times M}, \Omega(i, j) = \begin{cases} \exp(j\delta_i) & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (3.17\epsilon')$$

Εφόσον στο Object θα υπάρχει συμβολή δύο κυμάτων ένα από το απευθείας μονοπάτι και ένα από το μονοπάτι από ανάκλαση με χρήση RIS και στόχος μας είναι αυτή η συμβολή να είναι ενισχυτική.

3.3.2 Ανάλυση της απευθείας διαδρομής

Επομένως, ξεκινώντας της ανάλυση και ερμηνεία των παραπάνω εξισώσεων έχουμε ότι ο όρος του απευθείας μονοπατιού είναι

$$h_{direct} = (X + jY) / \sqrt{LF_1} \quad (3.18)$$

όπου LF_1 είναι ο παράγοντας απωλειών μεγάλης κλίμακας (Large Scale Fading), που μπορεί να περιλαμβάνει είτε μόνο τις απώλειες διάδοσης είτε και την παρουσία του φαινομένου της σκίασης, μεταξύ UE και Object, $X + jY$ είναι ο παράγοντας απωλειών μικρής κλίμακας (Small Scale Fading), που περιλαμβάνει το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath propagation), μεταξύ UE και Object. Να σημειώσουμε ότι η κεραία του UE θεωρείται ομοιοκατευθυντική ($G_{UE} = 1$ το κέρδος της κεραίας του UE με αναφορά στην ομοιοκατευθυντική κεραία) και η κεραία του Base

Station θεωρείται για κάθε sector ομοιοκατευθυντική σε αυτόν. Αν θεωρήσουμε ότι $1/LF_1$ είναι η μέση ισχύς του σήματος λήψης για μοναδιαία ισχύ εκπομπής τότε ο παράγοντας του απευθείας μονοπατιού εφόσον είναι NLoS ακολουθεί κατά μέτρο κατανομή Rayleigh δηλαδή αν

$$h_{direct} = h_{direct,i} + jh_{direct,q} \quad (3.19)$$

τότε $h_{direct,i}, h_{direct,q} \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ όπου $2\sigma^2 = 1/LF_1$ και επομένως όπως έχουμε αποδείξει

$$h_{direct} = h_{UE \rightarrow Object} = (X + jY) / \sqrt{LF_1} \quad (3.20)$$

όπου $X, Y \sim \mathcal{N}(0, 1/\sqrt{2})$, $Z = \sqrt{X^2 + Y^2} \sim \text{Rayleigh}(2\sigma^2 = 1)$ και $Z^2 = \text{Exp}(1)$.

3.3.3 Ανάλυση της διαδρομής μέσω ανάκλασης

Διαδρομή από UE μέχρι RIS

Μελετώντας τώρα το μονοπάτι από ανάκλαση μέσω του RIS έχουμε ότι : η διαδρομή από το ΥΕ προς το RIS έχει οριστεί ως LoS και αν αγνοηθούν φαινόμενα small fading, ο παράγοντας του συγκεκριμένου καναλιού είναι

$$h_{UE \rightarrow RIS} = S_{in} / \sqrt{LF_2} \quad (3.21)$$

όπου LF_2 οι απώλειες μεγάλης κλίμακας από το UE προς το RIS. Με S_{in} συμβολίζεται ο παράγοντας διάταξης του RIS (εφόσον την έχουμε θεωρήσει ως παθητική - ανακλαστική γραμμική στοιχειοκεραία) κατά την «είσοδο» του σήματος στο RIS και ισούται με

$$S_{in} = \sum_{i=1}^M \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d_s \cdot (i-1) \cdot \cos(\gamma_{in})\right) \quad (3.22)$$

όπου $d_s = \lambda/2$ το βήμα της στοιχειοκεραίας και γ_{in} η γωνία πρόσπτωσης στην στοιχειοκεραία. Η γωνία πρόσπτωσης στην στοιχειοκεραία ορίζεται ως η γωνία μεταξύ του άξονα της στοιχειοκεραίας και του διανύσματος μεταξύ του σημείου ενδιαφέροντος και του σημείου αναφοράς του RIS. Πιο συγκεκριμένα, αν $RIS_{start} \in \mathbb{R}^3$ η αρχή του RIS, $RIS_{end} \in \mathbb{R}^3$ το τέλος του RIS και $P \in \mathbb{R}^3$ το σημείο ενδιαφέροντος τότε το συνημίτονο μεταξύ των δύο διανυσμάτων ισούται με

$$\cos(\gamma) = \frac{(P - RIS_{start}) \cdot (RIS_{end} - RIS_{start})}{|P - RIS_{start}| \cdot |RIS_{end} - RIS_{start}|} \quad (3.23)$$

Πίνακας γωνιακών μετατοπίσεων RIS

Παράλληλα, ο πίνακας *Omega* είναι ένας διαγώνιος πίνακας που περιλαμβάνει ως στοιχεία την γωνία μετατόπισης (phase shift) για καθένα από τα M το πλήθος στοιχεία του RIS. Ο λόγος που ο πίνακας *Omega*, δηλαδή η συνάρτηση μεταφοράς του RIS, θεωρείται διαγώνιος πίνακας είναι ο μη συσχετισμός των στοιχείων του RIS μεταξύ τους. Σε περίπτωση που υπήρχε κάποια αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχείων ο πίνακας αυτός θα είχε μη μηδενικά στοιχεία σε κατάλληλες θέσεις. Με άλλα λόγια αν το i -οστό στοιχείο επηρέαζε το j -οστό τότε στην θέση (i, j) θα υπήρχε ο παράγοντας συσχέτισης. Κατά τέτοιο τρόπο δύναται να μοντελοποιηθούν φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των στοιχείων του RIS.

Διαδρομή από RIS μέχρι Object

Όσον αφορά το μονοπάτι από το RIS προς το Object ενδιαφέροντος, θεωρώντας το LoS και NLoS και συνεπώς Rician ως προς το small fading φαινόμενο, έχουμε ότι ο παράγοντας του καναλιού ισούται με

$$h_{RIS \rightarrow Object} = SF_3 \cdot \widetilde{S}_{out}, \quad \widetilde{S}_{out} \in \mathbb{R}^{1 \times M}, \quad SF_3 \in \mathbb{R}^{M \times 1} \quad (3.24)$$

όπου SF_3 οι απώλειες μικρής κλίμακας από το RIS προς το Object ενδιαφέροντος. Με \widetilde{S}_{out} συμβολίζεται ο παράγοντας διάταξης κατά την «έξοδο» του σήματος από το RIS και γράφοντάς το σε μητρική μορφή

$$\widetilde{S}_{out}(1, i) = \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda} \cdot d_s \cdot (i-1) \cdot \cos(\gamma_{out})\right) \quad (3.25\alpha')$$

$$SF_3(i, 1) = I_i + jQ_i \quad (3.25\beta')$$

όπου

$$I_i = W_i/\sqrt{LF_3}, \quad W_i \sim \mathcal{N}(\sqrt{K/(2 \cdot (K+1))}, 1/(2 \cdot (K+1))) \quad (3.26\alpha')$$

$$Q_i = Z_i/\sqrt{LF_3}, \quad Z_i \sim \mathcal{N}(\sqrt{K/(2 \cdot (K+1))}, 1/(2 \cdot (K+1))) \quad (3.26\beta')$$

$$r_i = \sqrt{W_i^2 + Z_i^2}, \quad r_i \sim \text{Rice}(K) \quad (3.26\gamma')$$

όπου LF_3 οι απώλειες μεγάλης κλίμακας του μονοπατιού, $d_s = \lambda/2$ το βήμα της στοιχειοκεραίας, γ_{in} η γωνία πρόσπτωσης στην στοιχειοκεραία και K ο παράγοντας Rice. Οι παραπάνω εξισώσεις περιγράφουν ένα σύστημα πολλαπλών εισόδων (M στοιχεία του RIS) και μονής εισόδου (MISO), προσέγγιση που ακολουθείται κατά κύριο λόγο στην διεθνή βιβλιογραφία λαμβάνοντας υπόψιν φαινόμενα χωρικής διαφορετικότητας (spatial diversity) καθώς είμαστε σε χιλιοστομετρική συχνότητα (mmWave) και τα elements RIS απέχουνε μεταξύ τους $\lambda/2$. Η παρούσα εργασία όμως προτείνει και μια διαφορετική θεώρηση αυτή τη φορά στο πλαίσιο διαμόρφωσης της κύριας δέσμης εκπομπής (beamforming) καθώς κύριος στόχος των επιφανειών RIS είναι η διαμόρφωση του διαγράμματος ακτινοβολίας μέσω των phase shift για κάθε στοιχείο του RIS βάσει των αναγκών του συστήματος. Επομένως, εμείς προτείνουμε το ακόλουθο :

$$h_{RIS \rightarrow Object} = (I + jQ) \cdot \sum_{i=1}^M \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda} \cdot d_s \cdot (i-1) \cdot \cos(\gamma_{out})\right) \quad (3.27)$$

Συνολική εξίσωση μονοπατιού από ανάκλαση

Συγκεντρώνοντας, λοιπόν, τις παραπάνω εξισώσεις μπορούμε να γράψουμε ότι ο συνολικός παράγοντας του από ανάκλαση λόγω του RIS καναλιού μπορεί να δοθεί ως γινόμενο

$$h_{reflect} = h_{RIS \rightarrow Object} \cdot \Omega \cdot h_{UE \rightarrow RIS} \quad (3.28)$$

καθώς διαδοχικά το σήμα εκπέμπεται από το UE, λαμβάνεται από το RIS (με δεδομένο κέρδος εισόδου – σαν κέρδος κεραίας λήψης – στο RIS που καθορίζεται από τον παράγοντα διάταξης του), αλληλεπιδρά με το RIS μέσω της στροφής φάσης (phase shift) κάθε στοιχείου του και τέλος εκπέμπεται από το RIS (με δεδομένο κέρδος εξόδου– σαν κέρδος κεραίας εκπομπής– από το RIS που καθορίζεται από τον παράγοντα διάταξης του) και τέλος φτάνει στο Object ενδιαφέροντος. Αν τώρα, μοντελοποιήσουμε κατάλληλα τις διαστάσεις των πινάκων ώστε το $h_{reflect}$ να είναι μονοδιάστατο ώστε να προστεθεί (συμβολή) με το h_{direct} καταλήγουμε στις αρχικές εξισώσεις που γράψαμε.

$$h_{with RIS} = h_{direct} + h_{reflect} = h_{UE \rightarrow RIS} + h_{RIS \rightarrow Object} \cdot \Omega \cdot h_{UE \rightarrow RIS} =$$

$$\frac{(X + jY)}{\sqrt{LF_1}} + \frac{1}{\sqrt{LF_2 \cdot LF_3}} \cdot \sum_{i=1}^M (W_i + jZ_i) \cdot \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda} \cdot d_s \cdot (i-1) \cdot (\cos(\gamma_{out}) - \cos(\gamma_{in})) + \delta_i\right) \quad (3.29)$$

3.4 Μοντελοποίηση καταστάσεων λειτουργίας

Καταρχάς, να αναφέρουμε ότι στις γενικές αρχές του ISAC αναφέρεται ότι έκαστος χρήστης μπορεί ταυτόχρονα την ίδια στιγμή μπορεί να βρίσκεται τόσο σε sensing όσο και σε communication mode. Εμείς λόγω της θεώρησης για διαφορετικά εύρη ζώνης για κάθε λειτουργία όπως εξηγήσαμε θεωρούμε ότι κάθε χρήστης με τον ίδιο εξοπλισμό μπορεί να βρίσκεται σε μια από τις δύο καταστάσεις λειτουργίας [44]. Προς αυτή την κατεύθυνση θεωρούμε ότι μεταξύ των χρονικών σχισμών που γίνεται το communication θα παρεμβάλλονται σχισμές για sensing, χωρίς όμως να αλλοιώνεται το communication, λόγω του διαφορετικού εύρους ζώνης που απαιτεί κάθε λειτουργία.

3.4.1 Μοντέλο ανίχνευσης (sensing model)

Όσον αφορά το μοντέλο ανίχνευσης, υποθέτουμε ότι κάθε κόμβος n διαθέτει έναν πομπό διπλής λειτουργίας. Για την ανίχνευση ενός στόχου, κάθε κόμβος n εκπέμπει μια κυματομορφή OFDM, η οποία στη συνέχεια ανακλάται πίσω μεταφέροντας τις πληροφορίες ανίχνευσης. Το αντίστοιχο ακτινοβολούμενο σήμα από τον κόμβο n στη χρονική στιγμή t γράφεται ως [45]

$$s_n(t) = \exp(j2\pi f_c t) \cdot \sum_{m=1}^{N_s} a c_m \exp(j2\pi q B_{sensing}(t - mT_s)) \text{rect}\left(\frac{t - mT_s}{T_s}\right) \quad (3.30)$$

όπου f_c (Hz) είναι η κεντρική συχνότητα, N_s είναι ο αριθμός των διαδοχικών συμβόλων που στέλνει ο υπερ n , a το πλάτος του σήματος που θα καθορίσει και την ισχύ του, c_m είναι ο μιγαδικός συντελεστής μοναδιαίου πλάτους που μεταφέρει την πληροφορία διαμορφωμένη κατά φάση (Phase Shift Keying modulation) του m -οστού συμβόλου και T_s (s) είναι η διάρκεια συμβόλου. Η τιμή του T_s ορίζεται ως $T_s = T + T_g$ όπου $T = 1/B_{subcarrier}$ δηλαδή είναι αντιστρόφως ανάλογο του εύρους ζώνης του κάθε υποφέροντος κατά OFDM και T_g είναι το κυκλικό πρόθεμα (cycle prefix). Σύμφωνα με την προτυποποίηση του OFDMA για το 5G/NR για $B_{subcarrier} = 60\text{KHz}$ έχουμε διάρκεια χρονικής σχισμής (time slot) 250ms και μετάδοση 14 συμβόλων. Αν θεωρήσουμε ισόχρονο διαμοιρασμό τότε $T_s \approx 20\text{ms}$, $T \approx 16\text{ms} \rightarrow T_g = 4\text{ms}$. Τέλος, ως $\text{rect}(t)$ συμβολίζουμε τον ορθογωνικό παλμό μοναδιαίου πλάτους και χρονικής διάρκειας 1s.

Το ανακλώμενο σήμα από τον στόχο στον χρήστη n γράφεται ως:

$$z_n(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} q_n(t) s_n(t - t) dt + w(t) \quad (3.31)$$

όπου $q_n(t)$ και $w(t)$ δηλώνουν την χρουστική απόκριση και το μηδενικής μέσης τιμής προσθετικός λευκός Gaussian θόρυβος (AWGN). Η απόδοση της λειτουργίας ανίχνευσης κάθε κόμβου αξιολογείται με τον υπολογισμό της Αμοιβαίας Πληροφορίας (Mutual Information - MI) [46],[45] μεταξύ του ανακλώμενου σήματος $z_n(t)$ και της χρουστικής απόκρισης $q_n(t)$ με δεδομένη την αρχική κυματομορφή εκπομπής $s_n(t)$.

$$MI_n = I(z_n(t), q_n(t) | s_n(t)) = \frac{1}{2} \cdot N_s \cdot T_s \cdot B_{sensing} \cdot \log_2(1 + SNR_n^{sensing}) \quad (3.32)$$

$$SNR_n^{sensing} = \frac{|a|^2 \cdot T_s \cdot |h_{n,channel}|^2}{N_0 \cdot B_{sensing}} \quad (3.33)$$

όπου $SNR_n^{sensing}$ ορίζεται ο σηματοθρομβικός λόγος για sensing mode του χρήστη n , $|a|^2$ είναι η ισχύς του εκπεμπόμενου σήματος, $h_{n,channel}$ είναι ο παράγοντας του καναλιού του χρήστη n όπως έχει αναλυθεί στο μέρος 3.3 και N_0 είναι η στάθμη θορύβου σε W/Hz .

3.4.2 Μοντέλο επικοινωνίας (communication model)

Όσον αφορά το μοντέλο ανίχνευσης, υποθέτουμε ότι κάθε κόμβος n διαθέτει έναν πομπό διπλής λειτουργίας. Για την ανίχνευση ενός στόχου, κάθε κόμβος n εκπέμπει μια κυματομορφή OFDM,

η οποία στη συνέχεια ανακλάται πίσω μεταφέροντας τις πληροφορίες ανίχνευσης. Το αντίστοιχο ακτινοβολούμενο σήμα από τον κόμβο n στη χρονική στιγμή t γράφεται ως [45]

$$s_n(t) = \exp(j2\pi f_c t) \cdot \sum_{m=1}^{N_s} \sum_{q=1}^{N_c} a_q c_q^m \exp(j2\pi B_{\text{subcarrier}}(t - mT_s)) \text{rect}\left(\frac{t - mT_s}{T_s}\right) \quad (3.34)$$

όπου N_c είναι ο αριθμός των υποφερρόντων που έχουν ανατεθεί στο υσερ n , a_q το πλάτος του q -οστού υποφέροντος που θα καθορίσει και την ισχύ του και c_q^m είναι ο μιγαδικός συντελεστής μοναδιαίου πλάτους που μεταφέρει την πληροφορία διαμορφωμένη κατά φάση (Phase Shift Keying Modulation) του m -οστού συμβόλου του q -οστού υποφέροντος.

Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (Bit Rate - BR) που μπορεί να επιτευχθεί προκύπτει με εφαρμογή του θεωρήματος του Shannon και έχουμε ότι

$$BR_n = B_{\text{comm}} \cdot \log_2(1 + SNR_n^{\text{comm}}) \quad (3.35)$$

$$SNR_n^{\text{comm}} = \frac{|a|^2 \cdot |h_{n,\text{channel}}|^2}{N_0 \cdot B_{\text{comm}}} \quad (3.36)$$

Κεφάλαιο 4

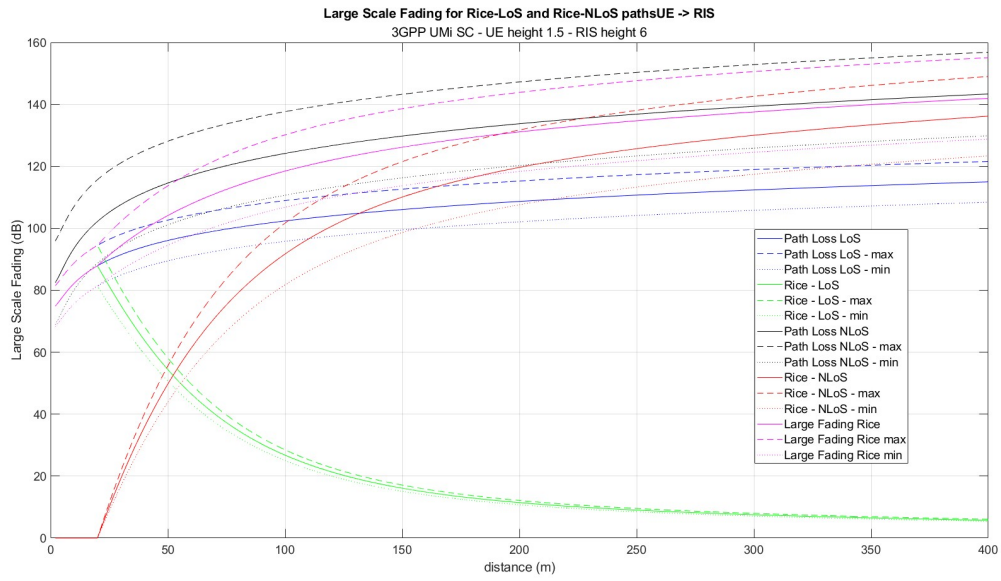
Προσομοίωση συστήματος

4.1 Μελέτη RIS υπό συνθήκες διαλείψεων μεγάλης κλίμακας και 1:1 συσχέτιση με χρήστη

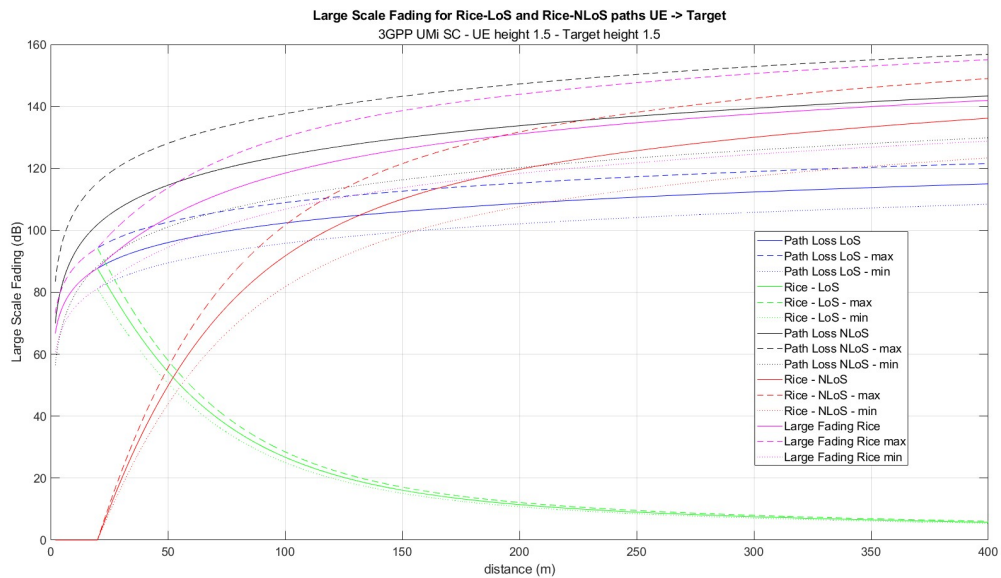
Στο παρόν μέρος θα μελετηθεί την συμπεριφορά του RIS σε συνθήκες διαλείψεων μεγάλης κλίμακας (απώλειες διάδοσης και σκίαση) και συσχέτισης RIS με χρήστη 1:1 (αυτό σημαίνει ότι κάθε RIS είναι συσχετισμένο αποκλειστικά με ένα χρήστη). Για δεδομένο ζεύγος τερματικών χρήστη και αντικείμενου ενδιαφέροντος και για δεδομένη συσχέτιση χρήστη με RIS, ο λόγος συσχέτισης 1:1 εξασφαλίζει την μέγιστη δυνατή βελτίωση υπό τις συγκεκριμένες τοπολογικές συνθήκες. Το προγραμματιστικό περιβάλλον προσομοίωσης για το Μέρος 5 αλλά και για όλα τα υπόλοιπα θα είναι το MATLAB 2022a.

4.1.1 Γραφική παρουσίαση του μοντέλου απωλειών μεγάλης κλίμακας της 3GPP

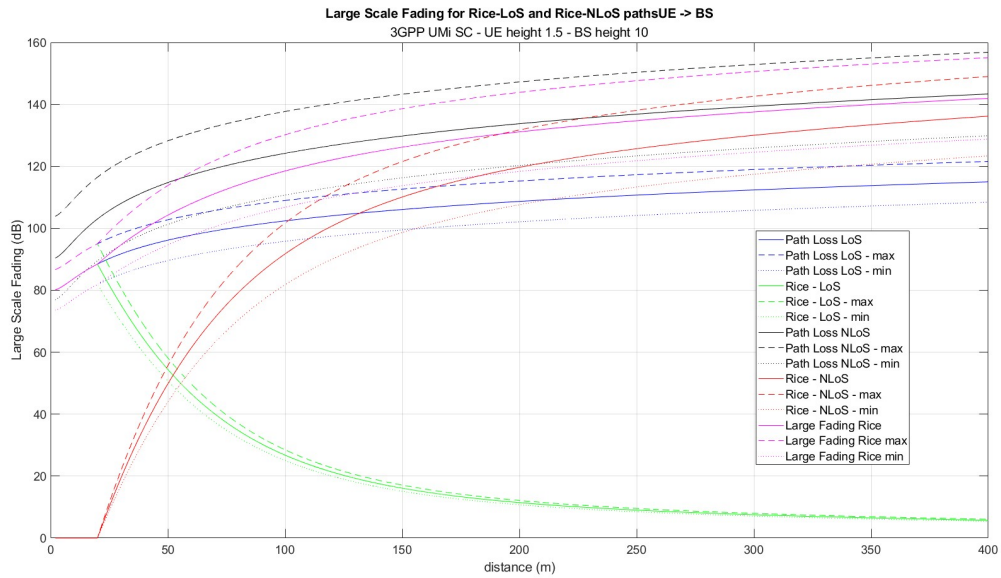
Ξεκινώντας το μέρος της εργασίας που αφορά τις προσομοιώσεις του συστήματος κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστεί γραφικά το μοντέλο απωλειών μεγάλης κλίμακας που αναλύσαμε στο Μέρος 2. Πιο συγκεκριμένα, έχει επιλεγεί για αρχή τα ύψη των διαφόρων συσκευών ως ακολούθως: ύψος Σταθμού Βάσης $10m$ όπως προδιαγράφεται από το πρότυπο, ύψος Συσκευής Χρήστη και ύψος Στόχου προς Ανίχνευση $1.5m$ όπως προδιαγράφεται από το πρότυπο και ύψος RIS $6m$ (ενδεικτικό ύψος ενός στύλου φωτισμού ή του πρώτου ορόφου μιας πολυκατοικίας). Επίσης, σύμφωνα με το πρότυπο για αστικό (urban) micro cell τύπου street canyon (ενδεικτικό παράδειγμα τέτοιας τοπολογίας είναι η λεωφόρος Τσαλδάρη ή η οδός Ερμού στην Αθήνα) η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο τερματικών δεν προβλέπεται μικρότερη από $10m$ και με δεδομένο ότι το micro cell έχει έκταση μερικές εκατοντάδες μέτρα η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο τερματικών τελικά θα μπορεί να λάβει τιμές στο διάστημα $10m \leq d_{2D} \leq 400m$. Όπως έχει αναφερθεί στο σύστημα υπάρχουν 5 τύποι καναλιών: $UE \rightarrow RIS$, $UE \rightarrow Base Station$, $UE \rightarrow Target$, $RIS \rightarrow Base Station$ και $RIS \rightarrow Target$ τους οποίους και προσομοιώνουμε (Σχήμα 4.1 έως Σχήμα 4.5).



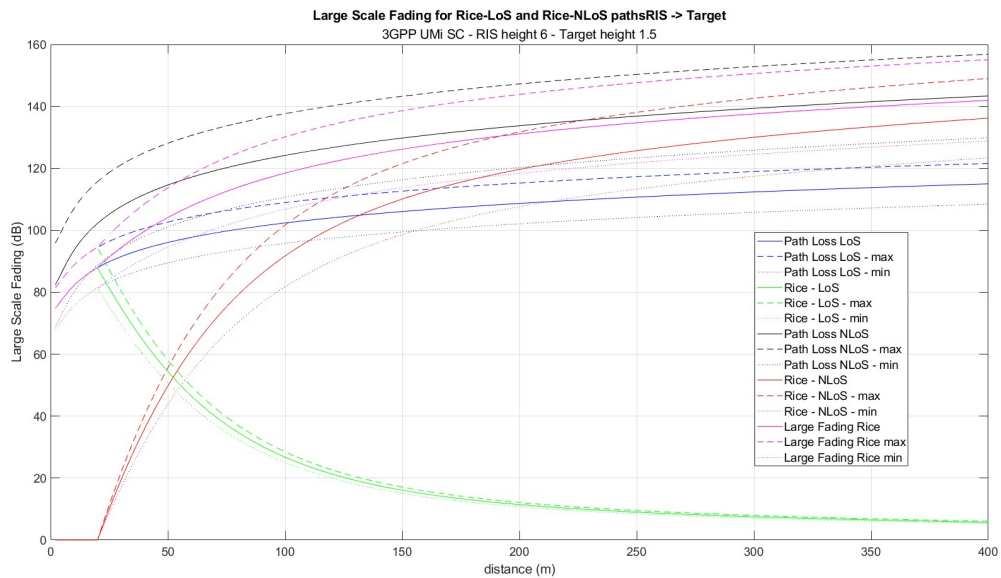
Σχήμα 4.1: Μοντέλο μεγάλων απωλειών σύμφωνα με την οδηγία της 3GPP για το κανάλι μεταξύ *UE* και *RIS*



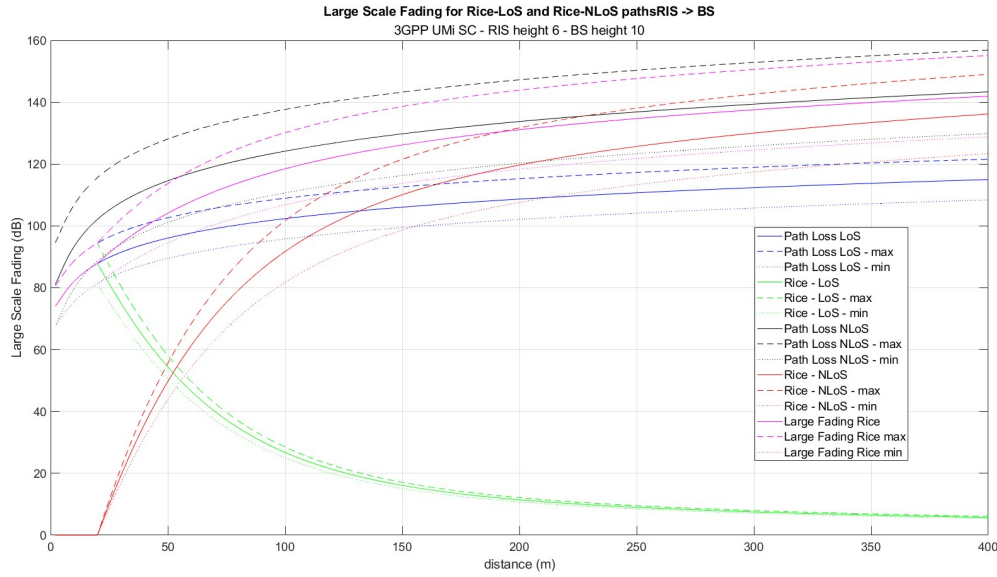
Σχήμα 4.2: Μοντέλο μεγάλων απωλειών σύμφωνα με την οδηγία της 3GPP για το κανάλι μεταξύ *UE* και *Target*



Σχήμα 4.3: Μοντέλο μεγάλων απωλειών σύμφωνα με την οδηγία της 3GPP για το κανάλι μεταξύ *UE* και *Base Station*



Σχήμα 4.4: Μοντέλο μεγάλων απωλειών σύμφωνα με την οδηγία της 3GPP για το κανάλι μεταξύ *RIS* και *Target*



Σχήμα 4.5: Μοντέλο μεγάλων απωλειών σύμφωνα με την οδηγία της 3GPP για το κανάλι μεταξύ RIS και Base Station

Και στα 5 διαγράμματα εστιάζεται η μελέτη στις απώλειες υπό συνθήκες LoS, NLoS και μεικτά LoS και NLoS (στην τελευταία περίπτωση για καλύτερη κατανόηση παρατίθεται τόσο ξεχωριστά την κάθε συνιστώσα όσο και το άθροισμά τους). Με συμπαγή γραμμή σε κάθε μια από τις 5 πιθανές συνθήκες παρουσιάζεται η απώλεια που οφείλεται σε απόσταση και συχνότητα φέροντος (αιτιοκρατική) ενώ με διακεκομμένες γραμμές παρουσιάζεται το εύρος τιμών που μπορεί να λάβει η απώλεια λόγω φαινομένων διαλείψεων μεγάλης κλίμακας. Το εύρος αυτό προκύπτει ως εξής : εφόσον οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας ακολουθούν την λογαριθμοκανονική κατανομή τότε με χρήση της συνάρτησης Q και του μετασχηματισμού $Z \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2) \rightarrow Z = \sigma \cdot X + \mu, X \sim \mathcal{N}(0, 1)$, η τιμή x για την οποία το υπάρχει πιθανότητα p να εμφανιστεί τιμή μεγαλύτερη από x δίνεται από την σχέση $x = \sigma \cdot Q^{-1}(p) + \mu$. Επομένως αν επιλέξουμε $p = 0.05$ για την εύρεση της μέγιστης τιμής του x και $p = 0.95$ για την εύρεση της ελάχιστης τιμής του x , τότε θα προκύψει ένα εύρος τιμών που θα ανήκει το x στο $95\% - 5\% = 90\%$ των περιπτώσεων δοκιμής. Στον οριζόντιο άξονα θέτουμε την οριζόντια απόσταση και στον κατακόρυφο άξονα την εξασθένιση σε κλίμακα dB .

Κοινό χαρακτηριστικό και των πέντε διαγραμμάτων είναι η ανεξαρτησία από το ύψος των δύο τερματικών (υπάρχει μια μικρή εξάρτηση για χαμηλές τιμές της οριζόντια απόστασης αλλά όσο αυτή αυξάνεται έχουμε απεξάρτηση) έχοντας περίπου την ίδια εξασθένιση για ίδια οριζόντια απόσταση. Ακόμα, όσο αυξάνει η μέση τιμή της εξασθένισης τόσο αυξάνει και το εύρος δυνατών τιμών που μπορεί να λάβει η εξασθένιση. Παρατηρείται πως για μικρές τιμές οριζόντιας απόστασης η προσέγγιση LoS και NLoS (συμβολίζεται ως Rice) ακολουθεί την LoS εξασθένιση και από μια απόσταση (περίπου $20m$) και μετά αυξάνεται τείνοντας προς την εξασθένιση NLoS, το οποίο είναι και λογικό καθώς όσο μεγαλύτερη η απόσταση των τερματικών τόσο πιο πιθανό είναι να υπάρχουν πολλά εμπόδια μεταξύ τους. Επιπλέον αξίζει να επισημανθεί και το ακόλουθο στοιχείο : με την υπόθεση εργασίας σχετικά με την ποιότητα των καναλιών που πραγματοποιήθηκε στο Μέρος 1.2 γίνεται εμφανές ότι αν $distance_{UE \rightarrow RIS} = 10m$, $distance_{UE \rightarrow BS} = 100m$ και $distance_{RIS \rightarrow BS} = 90m$ (εδώ μελετάται communication mode, τα συμπεράσματα ισχύουν και για σενιנג mode, τα νούμερα είναι ενδεικτικά) τότε ενώ ισχύει ότι $distance_{UE \rightarrow RIS} + distance_{RIS \rightarrow BS} = distance_{UE \rightarrow BS}$ έχουμε από την άλλη ότι $(Large Scale Loss)_{reflect} (dB) = (Large Scale Loss)_{UE \rightarrow RIS} (dB) + (Large Scale Loss)_{RIS \rightarrow BS} (dB) \gg (Large Scale Loss)_{direct} (dB)$. Η άνωθεν διαπίστωση αιτιολογείται από το γεγονός ότι η ανακλαστική επιφάνεια επανεκπέμπει την ισχύ που λαμβάνει, καθώς

έχουμε θεωρήσει απουσία απωλειών επί του RIS, η οποία όμως είναι μικρότερης πυκνότητας από την πυκνότητα ισχύος εκπομπής στον πομπό.

4.1.2 Μελέτη του εύρους τιμών της επιτεύξιμης βελτίωσης στο performance των χρηστών

Στο επόμενο στάδιο της παρούσας μελέτης αποφασίσαμε να λύσουμε την κεντρική εξίσωση του συστήματος για το channel factor με χρήση RIS ώστε να βρεθεί η μέγιστη τιμή την οποία μπορεί να λάβει ώστε να δούμε και τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται. Με δεδομένες τις υποθέσεις εργασίας του παρόντος μέρους, που αναφέρθηκε παραπάνω, έχουμε :

$$h_{with\ RIS} = \frac{1}{\sqrt{LF_{UE \rightarrow Object}}} + \frac{1}{\sqrt{LF_{RIS \rightarrow Object} \cdot LF_{UE \rightarrow RIS}}} \cdot \sum_{i=1}^M \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d_s \cdot (i-1) \cdot (\cos(\gamma_{out}) - \cos(\gamma_{in})) + \delta_i\right) \quad (4.1)$$

Αν τεθεί

$$\theta_i = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d_s \cdot (i-1) \cdot (\cos(\gamma_{out}) - \cos(\gamma_{in})) + \delta_i \quad (4.2\alpha)$$

$$a = \frac{1}{\sqrt{LF_{UE \rightarrow Object}}} = \frac{1}{\sqrt{LF_{direct}}} > 0 \quad (4.2\beta')$$

$$b = \frac{1}{\sqrt{LF_{RIS \rightarrow Object} \cdot LF_{UE \rightarrow RIS}}} = \frac{1}{\sqrt{LF_{reflect}}} > 0 \quad (4.2\gamma')$$

τότε

$$\begin{aligned} h_{with\ RIS} &= a + b \cdot \sum_{i=1}^M \exp(j\theta_i) \Rightarrow \\ h_{with\ RIS} &= \left(a + b \cdot \sum_{i=1}^M \cos \theta_i \right) + j \left(b \cdot \sum_{i=1}^M \sin \theta_i \right) \Rightarrow \\ |h_{with\ RIS}|^2 &= a^2 + b^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^M \cos \theta_i \right)^2 + 2ab \cdot \sum_{i=1}^M \cos \theta_i + b^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^M \sin \theta_i \right)^2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Από την ανισότητα Cauchy – Schwartz προκύπτει ότι

$$\begin{aligned} |h_{with\ RIS}| &= \left| a + b \cdot \sum_{i=1}^M \exp(j\theta_i) \right| \leq a + b \cdot \left| \sum_{i=1}^M \exp(j\theta_i) \right| \leq a + b \cdot \sum_{i=1}^M |\exp(j\theta_i)| \Rightarrow \\ |h_{with\ RIS}| &\leq a + b \cdot M = |h_{with\ RIS}|_{max} \end{aligned} \quad (4.4)$$

και επομένως συμπεραίνουμε ότι για μεγιστοποίηση του παράγοντα $|h_{with\ RIS}|^2$ θέλουμε $\theta_i = 0 \forall i$. Αν ορίσουμε ως βελτίωση (improvement) στην απόδοση (performance) του συστήματος την ακόλουθη σχέση

$$improvement = \frac{metric_{with\ RIS} - metric_{without\ RIS}}{metric_{without\ RIS}} \quad (4.5)$$

όπου $metric = \{\text{Bit Rate για communication mode, Mutual Information για sensing mode}\}$, $with\ RIS$ όταν χρησιμοποιούμε την ανακλαστική επιφάνεια και έχουμε στον δέκτη συμβολή reflected και direct σήματος και $without\ RIS$ όταν δεν χρησιμοποιούμε ανακλαστική επιφάνεια και έχουμε μόνο direct σήμα στον δέκτη, τότε η μέγιστη δυνατή επιτεύξιμη βελτίωση για κάθε χρήστη θα είναι :

- Για communication mode

$$\begin{aligned}
improvement^{comm} &= \frac{\log_2(1 + SNR_{with RIS}^{comm})}{\log_2(1 + SNR_{without RIS}^{comm})} - 1 \Rightarrow \\
improvement^{comm} &= \frac{\log_2(1 + \frac{P \cdot |h_{with RIS}|^2}{N_0 \cdot B_{comm}})}{\log_2(1 + \frac{P \cdot |h_{without RIS}|^2}{N_0 \cdot B_{comm}})} - 1 \xrightarrow{|h_{with RIS}|=max} \\
improvement_{max achievable}^{comm} &= \frac{\log_2(1 + \frac{P \cdot |a+b \cdot M|^2}{N_0 \cdot B_{comm}})}{\log_2(1 + \frac{P \cdot |a|^2}{N_0 \cdot B_{comm}})} - 1 \tag{4.6}
\end{aligned}$$

- Για sensing mode

$$\begin{aligned}
improvement^{sensing} &= \frac{\log_2(1 + SNR_{with RIS}^{sensing})}{\log_2(1 + SNR_{without RIS}^{sensing})} - 1 \Rightarrow \\
improvement^{sensing} &= \frac{\log_2(1 + \frac{P \cdot T_s \cdot |h_{with RIS}|^2}{N_0 \cdot B_{comm}})}{\log_2(1 + \frac{P \cdot T_s \cdot |h_{without RIS}|^2}{N_0 \cdot B_{comm}})} - 1 \xrightarrow{|h_{with RIS}|=max} \\
improvement_{max achievable}^{sensing} &= \frac{\log_2(1 + \frac{P \cdot T_s \cdot |a+b \cdot M|^2}{N_0 \cdot B_{comm}})}{\log_2(1 + \frac{P \cdot T_s \cdot |a|^2}{N_0 \cdot B_{comm}})} - 1 \tag{4.7}
\end{aligned}$$

Επιπλέον, με βάση την διαίσθησή μας υπό συνθήκες διαλείψεων μεγάλης κλίμακας σημαντικότερη βελτίωση παρατηρείται όταν το απευθείας μονοπάτι είναι κακό (δηλαδή έχει υψηλή εξασθένιση) και το μονοπάτι από ανάκλαση είναι καλό (δηλαδή έχει χαμηλή εξασθένιση). Αντίθετα, μικρότερη βελτίωση παρατηρείται όταν το απευθείας μονοπάτι είναι καλό (δηλαδή έχει χαμηλή εξασθένιση) και το μονοπάτι από ανάκλαση είναι κακό (δηλαδή έχει υψηλή εξασθένιση). Αν επομένως ορίσουμε για κάθε μονοπάτι το εύρος τιμών που μπορεί να πάρει η εξασθένιση όπως πραγματοποιήσαμε και στο Μέρος 5.1 τότε θα έχουμε

$$Attenuation (dB) = [Attenuation^{min,LF} (dB), Attenuation^{max,LF} (dB)] \tag{4.8\alpha}$$

$$Attenuation^{min,LF} (dB) = \sigma \cdot Q^{-1}(0.95) + (Path Loss of the channel) \tag{4.8\beta'}$$

$$Attenuation^{max,LF} (dB) = \sigma \cdot Q^{-1}(0.05) + (Path Loss of the channel) \tag{4.8\gamma'}$$

όπου το σ αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση. Επομένως, για κάθε τριάδα $UE, RIS, Object$ έχουμε την αντιστοίχιση στο διάνυσμα εξασθενίσεων

$$[Attenuation_{UE \rightarrow Obj}, Attenuation_{UE \rightarrow RIS}, Attenuation_{RIS \rightarrow Obj}] \tag{4.9}$$

Επομένως για κάθε τριάδα $UE, RIS, Object$ η καλύτερη και η χειρότερη βελτίωση μπορούν να αντιστοιχιστούν σε ένα τέτοιο διάνυσμα (συντομογραφία του Attenuation - Att)

$$improvement_{max achievable}^{max,LF} \rightarrow [Att_{UE \rightarrow Obj}^{max,LF}, Att_{UE \rightarrow RIS}^{min,LF}, Att_{RIS \rightarrow Obj}^{min,LF}] \tag{4.10\alpha'}$$

$$improvement_{max achievable}^{min,LF} \rightarrow [Att_{UE \rightarrow Obj}^{min,LF}, Att_{UE \rightarrow RIS}^{max,LF}, Att_{RIS \rightarrow Obj}^{max,LF}] \tag{4.10\beta'}$$

Τώρα, μπορούν να υπολογιστούν οι ακόλουθες πιθανότητες, θεωρώντας τα επιμέρους τρία μονοπάτια ανεξάρτητα μεταξύ τους:

$$\begin{aligned}
&\mathbb{P}[improvement_{max achievable} \geq improvement_{max achievable}^{max,LF}] = \\
&\mathbb{P}[Att_{UE \rightarrow Obj} \geq Att_{UE \rightarrow Obj}^{max,LF}, Att_{UE \rightarrow RIS} \leq Att_{UE \rightarrow RIS}^{min,LF}, Att_{RIS \rightarrow Obj} \leq Att_{RIS \rightarrow Obj}^{min,LF}] =
\end{aligned}$$

$$\mathbb{P}[Att_{UE \rightarrow Obj} \geq Att_{UE \rightarrow Obj}^{max,LF}] \cdot \mathbb{P}[Att_{UE \rightarrow RIS} \leq Att_{UE \rightarrow RIS}^{min,LF}] \cdot \mathbb{P}[Att_{RIS \rightarrow Obj} \leq Att_{RIS \rightarrow Obj}^{min,LF}] = 0.05^3$$

και

$$\begin{aligned} & \mathbb{P}[improvement_{max\ achievable} \leq improvement_{max\ achievable}^{min,LF}] = \\ & \mathbb{P}[Att_{UE \rightarrow Obj} \leq Att_{UE \rightarrow Obj}^{min,LF}, Att_{UE \rightarrow RIS} \geq Att_{UE \rightarrow RIS}^{max,LF}, Att_{RIS \rightarrow Obj} \geq Att_{RIS \rightarrow Obj}^{max,LF}] = \\ & \mathbb{P}[Att_{UE \rightarrow Obj} \leq Att_{UE \rightarrow Obj}^{min,LF}] \cdot \mathbb{P}[Att_{UE \rightarrow RIS} \geq Att_{UE \rightarrow RIS}^{max,LF}] \cdot \mathbb{P}[Att_{RIS \rightarrow Obj} \geq Att_{RIS \rightarrow Obj}^{max,LF}] = 0.05^3 \end{aligned}$$

Επομένως, το $improvement_{max\ achievable}$ θα ανήκει στο διάστημα $[improvement_{max\ achievable}^{min,LF}, improvement_{max\ achievable}^{max,LF}]$ με πιθανότητα $1 - 2 \cdot 0.05^3 = 0,99975$. Ακολούθως παρουσιάζονται το $improvement$ υπό συνθήκες Path Loss, η μέγιστη τιμή του μέγιστου επιτεύξιμου $improvement$ λόγω Large Scale Fading και η ελάχιστη τιμή του μέγιστου επιτεύξιμου $improvement$ λόγω Large Scale Fading συναρτήσει της εξασθένησης του απευθείας και του μονοπατιού από ανάκλαση στο RIS τόσο για communication όσο και για sensing mode (Σχήμα 4.6 έως Σχήμα 4.9β').

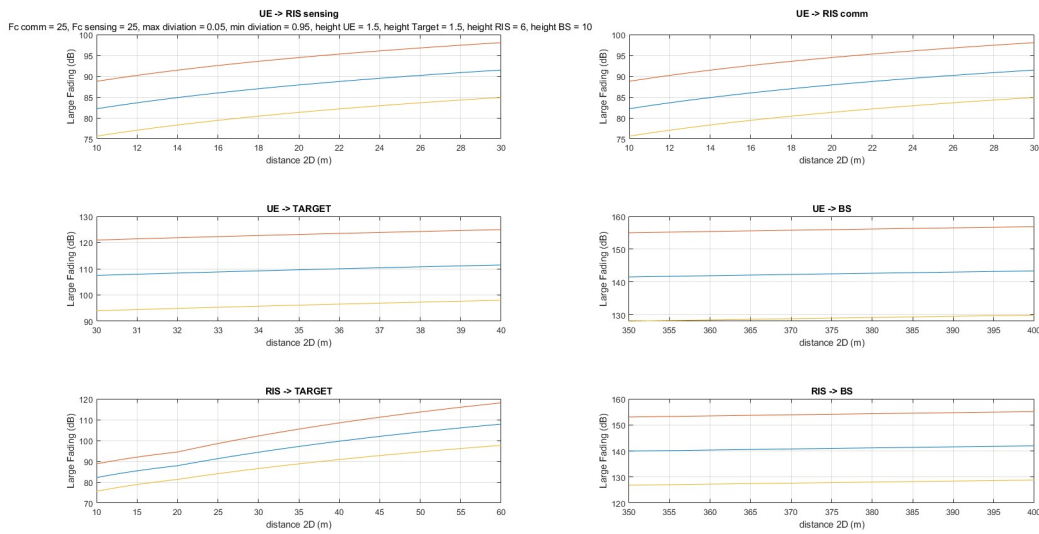
Για τις άνωθεν γραφικές θεωρούμε πλήθος στοιχείων του RIS $M = 36$ και τις ακόλουθες διαστάσεις στη τοπολογία : θεωρούμε micro cell ακτίνας $400m$ και θέλουμε να παρέχουμε βελτίωση για communication mode στους UE που βρίσκονται στην περιφέρεια της κυψέλης δηλαδή $350m \leq d_{2D,UE \rightarrow BS} \leq 400m$. Έχει επιλεγεί να μελετηθεί η περίπτωση που η ανακλαστική επιφάνεια είναι κοντά στο UE (edge approach) θεωρώντας ότι η περίπτωση τοποθέτησης της ανακλαστικής επιφάνειας κοντά στο BS θέτει τον κίνδυνο της ύπαρξης ενός υπολογίσιμου σχεδαστή πλησίον ενός πομπού υψηλής ισχύος. Έτσι $350m \leq d_{2D,RIS \rightarrow BS} \leq 400m$. Επίσης, θέτουμε το εύρος κάλυψης (coverage area) του RIS στα $20m$ και λαμβάνοντας υπόψη το μοντέλο απωλειών μεγάλης κλίμακας προκύπτει $10m \leq d_{2D,UE \rightarrow RIS} \leq 30m$. Όσον αφορά την απόσταση μεταξύ του UE και του $Target$ για την λειτουργία sensing, εφόσον είμαστε σε αστικό περιβάλλον micro cell, έχουμε χαμηλό επίπεδο ισχύος εκπομπής και χρησιμοποιούμε κεραίες εκπομπής, που λόγω των φυσικών διαστάσεων δεν έχουν πολύ μικρό άνοιγμα ημίσειας ισχύος, θεωρούμε ότι $30m \leq d_{2D,UE \rightarrow Target} \leq 40m$ και αντίστοιχος επιλέγουμε $10m \leq d_{2D,RIS \rightarrow Target} \leq 60m$.

Ξεκινώντας την μελέτη των γραφικών παραστάσεων που προέκυψαν δύναται να προκύψουν ορισμένα άμεσα συμπεράσματα.

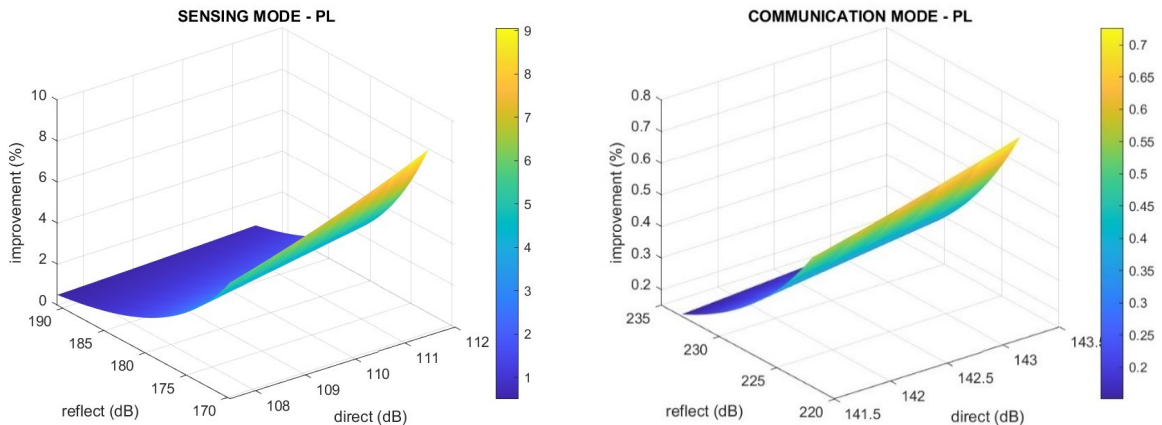
- Η επίδραση της σκίασης είναι εξαιρετικά έντονη και για τις δύο καταστάσεις λειτουργίας, καθώς μεταβάλλει τη βελτίωση κατά μια τάξη μεγέθους τόσο αυξάνοντάς την όσο και μειώνοντάς την σε σχέση με την βελτίωση υπό συνθήκες αποκλειστικά απωλειών διάδοσης.
- Σημαντική βελτίωση παρατηρείται υπό συνθήκη πολύ κακού απευθείας μονοπατιού (ως προς την εξασθένηση) και πολύ καλού μονοπατιού από ανάκλαση (ως προς την εξασθένηση) ανεξαρτήτου καταστάσεως λειτουργίας ή παρουσίας σκίασης, ενώ για τις υπόλοιπες περιπτώσεις (σχετικών ποιοτήτων μεταξύ των καναλιών) η βελτίωση είναι σημαντικά μικρότερη.
- Η βελτίωση που παρέχεται σε κατάσταση λειτουργίας sensing είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από τη βελτίωση σε κατάσταση λειτουργίας communication για την ίδια συνθήκη εξασθένησης. Η παραπάνω όμως διαφοροποίηση όμως δεν εξαρτάται από τις μετρικές αξιολόγησης έκαστης λειτουργίας (σε μεγάλο βαθμό) αλλά από την τοπολογία που επιλέχθηκε για κάθε κατάσταση. Πιο συγκεκριμένα, το κανάλι $UE \rightarrow RIS$ είναι κοινό, η ποιότητα του καναλιού $RIS \rightarrow Target$ είναι η ίδια με αυτή $RIS \rightarrow BS$ και η ποιότητα του καναλιού $UE \rightarrow Target$ είναι ίδια με αυτή $UE \rightarrow BS$ και το μόνο που αλλάζει είναι οι πιθανές αποστάσεις στα κανάλια (αφού η συχνότητα είναι η ίδια). Άρα συμπεραίνουμε ότι όσο μικρότερες οι αποστάσεις τόσο καλύτερη η βελτίωση αλλά πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι για μικρότερες αποστάσεις έχω και καλύτερη ποιότητα καναλιού (και συνεπώς ισχυρότερο απευθείας μονοπάτι). Η παραπάνω παρατήρηση έρχεται να ενισχυθεί από την μελέτη και των σχημάτων Σχήμα 4.1 έως και Σχήμα 4.5 στα οποία βλέπουμε ότι για μικρές οριζόντιες αποστάσεις το κανάλι LoS και

NLoS – καταχρηστικά ως Rice – (άρα τα κανάλια $RIS \rightarrow Target$, $RIS \rightarrow BS$ που ανήκουν στο μονοπάτι ανάκλασης) έχει σημαντικά μικρότερη εξασθένιση από το κανάλι NLoS (άρα τα κανάλια $UE \rightarrow Target$, $UE \rightarrow BS$ που ορίζουν το απευθείας μονοπάτι για κάθε κατάσταση λειτουργίας).

Συνεπώς μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για να είναι ουσιαστική η βελτίωση λόγω της χρήση RIS, ακόμα και υπό τις πλέον ευνοϊκές συνθήκες, πρέπει να χρησιμοποιηθεί προς όφελος του συστήματος το φαινόμενο της σκίασης (το οποίο εξαρτάται τόσο από την σχεδιαστική μέθοδο του μηχανικού όσο και από τις διαθέσιμες πιθανές θέσεις τοποθέτησης των RIS, δηλαδή την γεωγραφική τοπολογία).



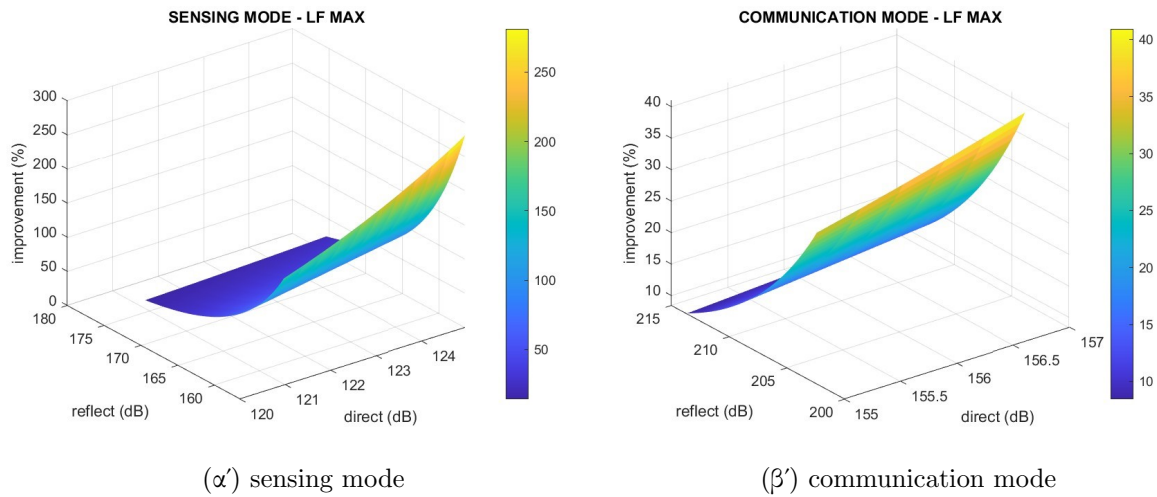
Σχήμα 4.6: Απώλειες διάδοσης (μπλε), μέγιστη τιμή εξασθένισης (πορτοκαλί), ελάχιστη τιμή εξασθένισης (κίτρινο) για καθένα από τους διαύλους $UE \rightarrow RIS$, $UE \rightarrow Base Station$, $UE \rightarrow Target$, $RIS \rightarrow Base Station$ και $RIS \rightarrow Target$.



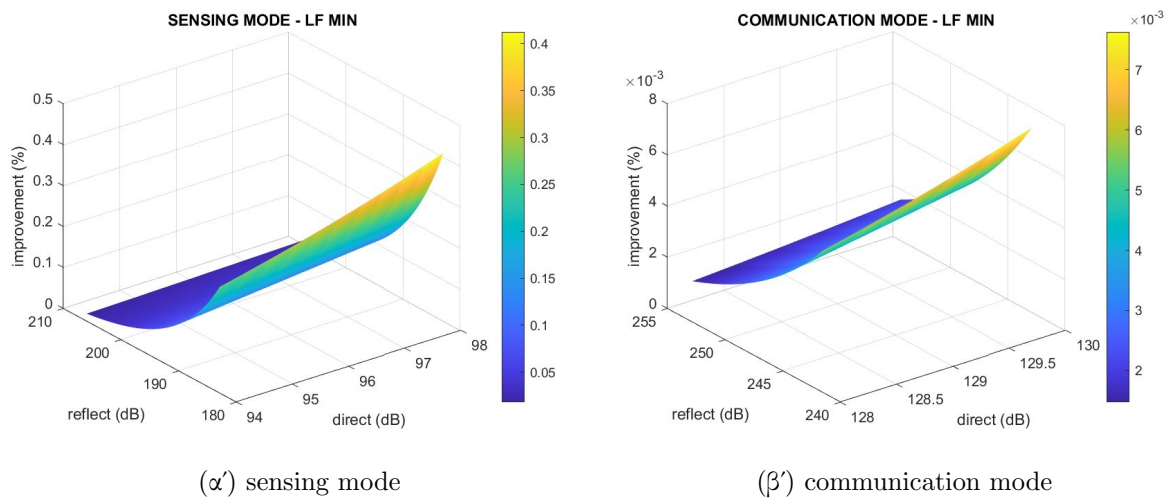
(α) sensing mode

(β) communication mode

Σχήμα 4.7: Βελτίωση υπό συνθήκες 1:1 και Path Loss



Σχήμα 4.8: Βελτίωση υπό συνθήκες 1:1, Path Loss και Shadowing (μέγιστη τιμή λόγω shadowing)



Σχήμα 4.9: Βελτίωση υπό συνθήκες 1:1, Path Loss και Shadowing (ελάχιστη τιμή λόγω shadowing)

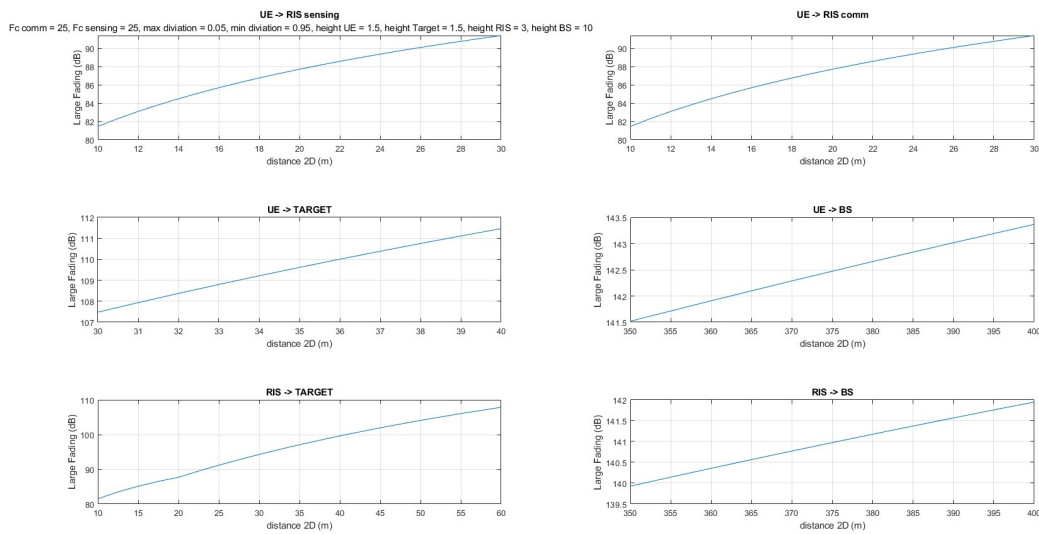
4.1.3 Μελέτη βελτίωσης συναρτήσεϊ του πλήθους των στοιχείων του RIS

Στο μέρος αυτό μελετάται η επίδραση του πλήθους των στοιχείων της ανακλαστικής επιφάνειας στην μέγιστη επιτεύξιμη βελτίωση. Επιλέγουμε να κρατήσουμε τα ίδια εύρη τιμών οριζόντιων αποστάσεων όπως στο Μέρος 5.2, να μελετήσουμε μόνο την επίδραση του Path Loss (εφόσον δεν είναι κύριος στόχος η μελέτη της επίδρασης των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας) και να παραμένει η συσχέτιση 1:1 μεταξύ *RIS* και *UE* και να μεταβάλλουμε την τιμή του *M* εντός του συνόλου {36, 49, 64, 81, 100, 121, 144, 169} (παρατηρούμε πως είναι αριθμοί της μορφής a^2 όπου το a ανήκει στους φυσικούς από το 6 μέχρι το 13). Επομένως, προκύπτουν οι γραφικές παραστάσεις (Σχήμα 4.10 έως Σχήμα 4.12β') στις οποίες εκτός από τα την παρουσίαση των απωλειών διάδοσης για καθένα από τα 5 κανάλια (*UE* → *RIS*, *UE* → *Base Station*, *UE* → *Target*, *RIS* → *Base Station*, *RIS* → *Target*), παραθέτουμε για κάθε κατάσταση λειτουργίας την μέγιστη επιτεύξιμη βελτίωση συναρτήσεϊ των απωλειών απευθείας και από ανάκλαση μονοπατιού για την μέγιστη τιμή του *M* και την μέγιστη επιτεύξιμη βελτίωση υπό συνθήκη του χειρότερου απευθείας μονοπατιού συναρτήσεϊ του *M* και των απωλειών απευθείας μονοπατιού. Μέσω των γραφικών μπορούμε να παρατηρήσουμε την έντονη εξάρτηση της μέγιστης επιτεύξιμης βελτίωσης από την τιμή του *M* και μάλιστα ως M^2

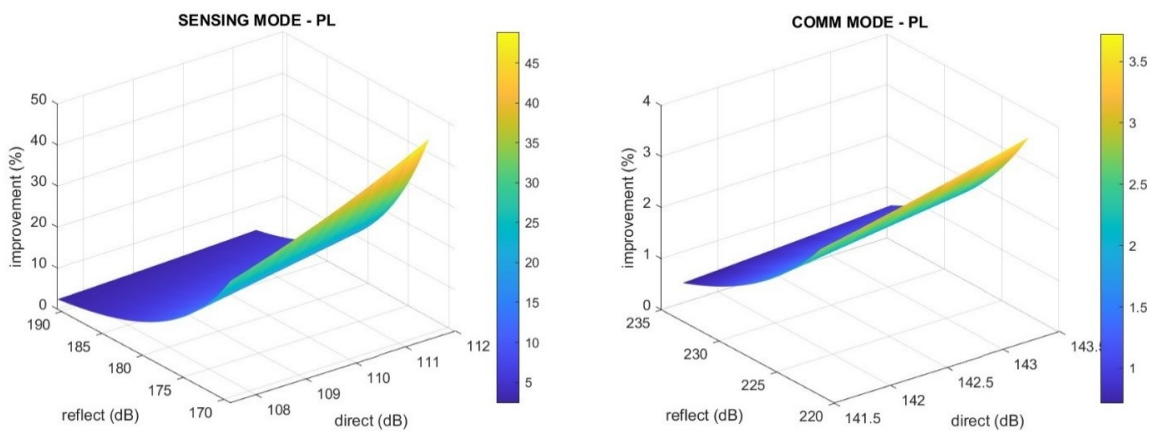
γεγονός που μπορεί να διαπιστωθεί και από την βελτίωση του παράγοντα καναλιού ως εξής :

$$(\text{channel factor improvement}) = \frac{|h_{with RIS}|^2}{|h_{without RIS}|^2} - 1 = \frac{2abM + b^2M^2}{a^2} = 2\frac{a}{b}M + \left(\frac{a}{b}\right)^2 M^2$$

Επιπλέον, βλέπουμε ξανά ότι η βελτίωση για sensing mode είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από την βελτίωση για communication mode. Συμπερασματικά, διαπιστώνουμε είναι αναγκαίο να κινηθούμε σε τιμές του M μεγαλύτερες του 100 για να έχουμε μια όσο γίνεται καλύτερη μέγιστη επιτεύξιμη ενίσχυση.



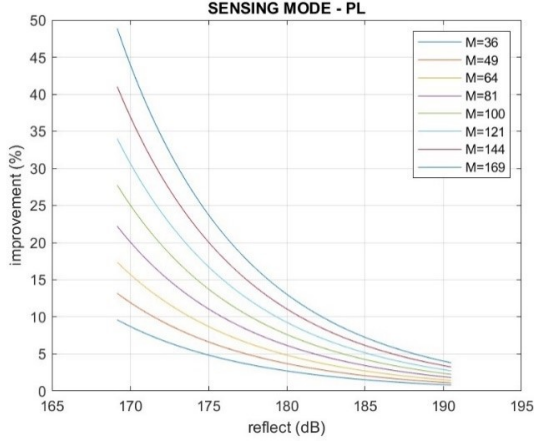
Σχήμα 4.10: Απώλειες διάδοσης για καθένα από τους διαύλους $UE \rightarrow RIS$, $UE \rightarrow Base Station$, $UE \rightarrow Target$, $RIS \rightarrow Base Station$, $RIS \rightarrow Target$.



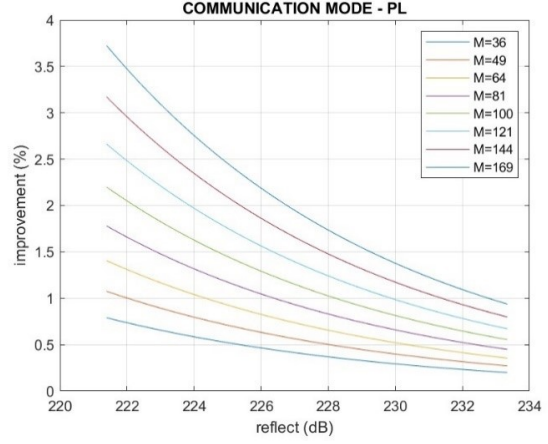
(α) sensing mode

(β) communication mode

Σχήμα 4.11: Βελτίωση υπό συνθήκες 1:1 και Path Loss για $M = 169$



(α) sensing mode



(β) communication mode

Σχήμα 4.12: Βελτίωση υπό συνθήκες 1:1, Path Loss, χειρότερου απευθείας μονοπατιού συναρτήσει του πλήθους των στοιχείων του RIS

4.2 Μελέτη RIS ως στοιχειοκεραία

4.2.1 Επίδραση παράγοντα διάταξης στο improvement λόγω χρήσης RIS

Όπως έχουμε αναφέρει και στο θεωρητικό υπόβαθρο θεωρούμε το RIS ως μια παθητική ανακλαστική στοιχειοκεραία. Ως εκ τούτου πρέπει να μελετήσουμε την επίδραση του παράγοντα διάταξης στον συντελεστή του καναλιού και στην βελτίωση που μπορεί να παρέχει η χρήση RIS στο σύστημα. Επομένως κρατώντας πάλι συνθήκες αποκλειστικά απωλειών διάδοσης (Path Loss) και γράφουμε την εξίσωση υπό της τωρινές συνθήκες

$$h_{with\ RIS} = w \cdot \left(1 + \sqrt{z} \cdot \sum_{i=1}^M \exp \left(j \frac{2\pi}{\lambda} d_s (i-1) (\cos \gamma_{out} - \cos \gamma_{in}) + j \delta_i \right) \right) \quad (4.11)$$

Όπου έχουμε ορίσει ως $w = 1/\sqrt{LF_1}$ και ως $z = LF_1/(LF_2 \cdot LF_3)$.

Όπως έχουμε δει αν ένας χρήτης είναι συσχετισμένος με ένα RIS με λόγο συσχέτισης 1:1 τότε αν ο χρήτης (για καλύτερη κατανόηση του παρακάτω συλλογισμού θα αναφερόμαστε στον χρήστη αυτό με τον A/A 1) έχει γωνία εισόδου στο RIS και γωνία εξόδου στο RIS τέτοιες ώστε $angle = \cos \gamma_{out} - \cos \gamma_{in}$ θα έχουμε ότι

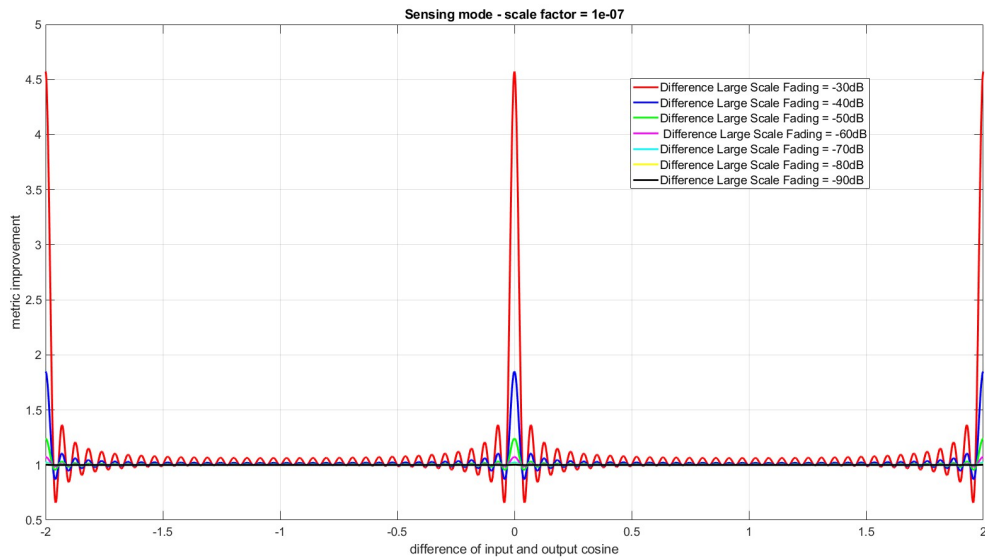
$$\delta_i = -\frac{2\pi}{\lambda} d_s (i-1) (\cos \gamma_{out} - \cos \gamma_{in}) \quad \forall i \quad (4.12)$$

Αν τώρα έρθει κάποιος χρήτης με A/A 2, ο οποίος θέλει να συσχετιστεί με το RIS χωρίς όμως να μεταβάλει την γωνιακή μετατόπιση κάθε στοιχείου του RIS, θα έχει παράγοντα διάταξης καναλιού

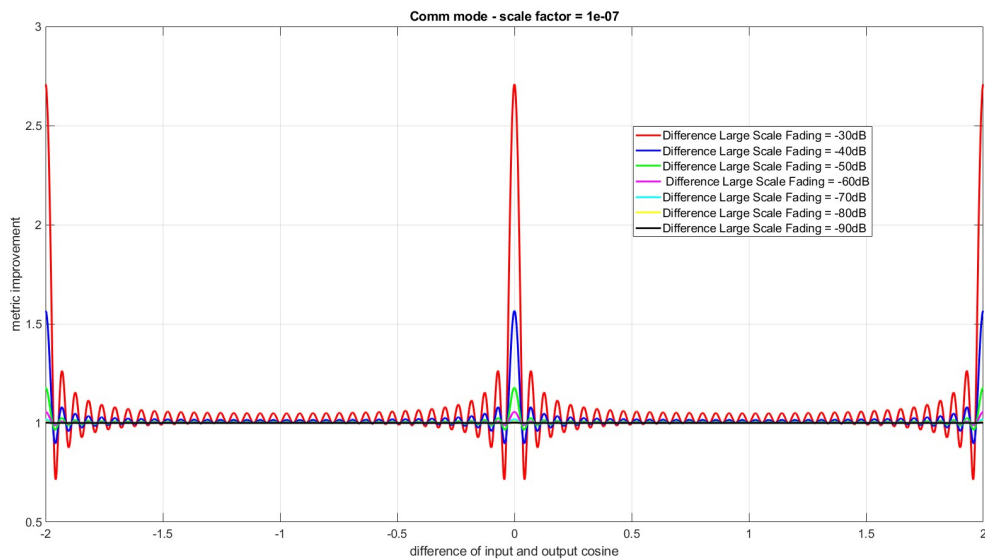
$$h_{with\ RIS} = w \cdot \left(1 + \sqrt{z} \cdot \sum_{i=1}^M \exp \left(j \frac{2\pi}{\lambda} d_s (i-1) \phi \right) \right) \quad (4.13\alpha')$$

$$\phi = \cos \theta_{out} - \cos \theta_{in} - \cos \gamma_{out} + \cos \gamma_{in} \quad (4.13\beta')$$

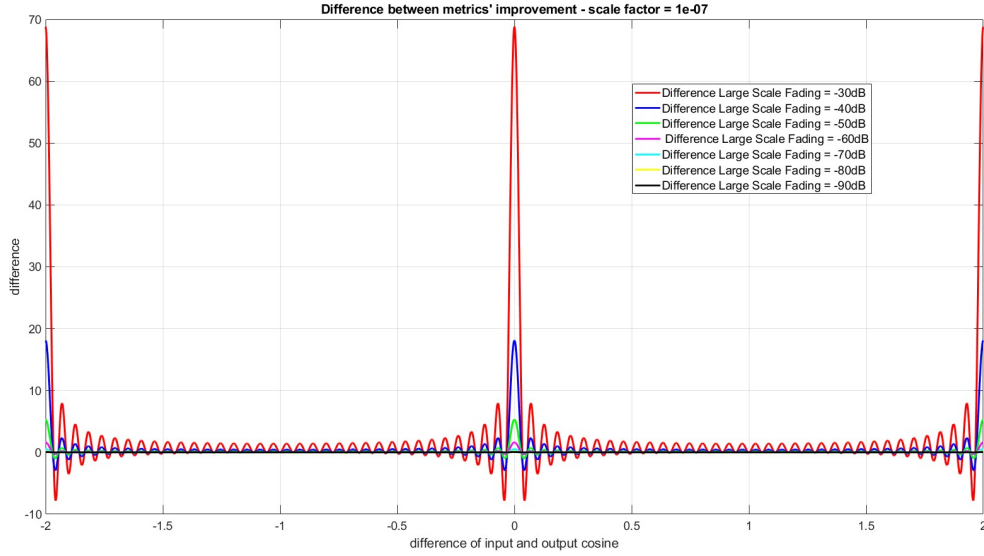
Αν προσομοιώσουμε σύστημα τόσο την κατάσταση ζομμυνισατιον όσο και την κατάσταση σενσινγ με την παραπάνω εξίσωση για $w = 10^{-7}$ (τιμή που λάβαμε με επισκόπηση των αντίστοιχων μετρήσεων του Μέρους 5, η παράμετρος αυτή ονομάζεται scale factor στην προσομοίωση), $z(dB)$ στο διάστημα $[-90dB, -30dB]$ με βήμα $10dB$, $M = 36$ και $\cos \gamma_{out} - \cos \gamma_{in} = 0$ (διαφορετική τιμή θα προκαλούσε απλή κυκλική μετατόπιση των διαγραμμάτων χωρίς αλλοίωση της μορφής τους)



Σχήμα 4.13: Βελτίωση sensing mode συναρτήσει της διαφορά των συνημίτονων των γωνιών εξόδου και εισόδου για αξονικό RIS



Σχήμα 4.14: Βελτίωση communication mode συναρτήσει της διαφορά των συνημίτονων των γωνιών εξόδου και εισόδου για αξονικό RIS



Σχήμα 4.15: Διαφορά (%) βελτίωσης μεταξύ των δύο καταστάσεων λειτουργίας για αξονικό RIS

προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα (Σχήμα 4.13 έως και Σχήμα 4.15) : βελτίωση των μετρικών για χρήστη με A/A_2 τόσο για κατάσταση λειτουργίας sensing όσο και communication καθώς και την διαφορά επί τις εκατό των δύο βελτιώσεων. Μελετώντας τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να οδηγηθούμε στα ακόλουθα συμπεράσματα :

- Η μορφή των γραφικών παραστάσεων είναι παρόμοια με αυτή του διαγράμματος ακτινοβολίας στοιχειοκεραίων καθώς ο κύριος λοβός (μέγιστη βελτίωση) βρίσκεται στο σημείο στο οποίο η στοιχειοκεραία είναι προσανατολισμένη και προσδιορίζεται από την φάση του ρευματικού συντελεστή d_i (που με την σειρά του καθορίζεται από το $\cos \gamma_{out} - \cos \gamma_{in}$) και οι πλευρικοί λοβοί είναι σημαντικά μικρότεροι του κύριου. Ως εκ τούτου υπάρχει η περίπτωση κάποιος χρήστης να έχει τέτοια τιμή του φ ώστε να βρίσκεται σε μηδενικό (η λέξη χρησιμοποιείται με την σημασία που έχει στα διαγράμματα ακτινοβολίας κεραιών) και να λάβει μηδενική βελτίωση ή και αρνητική όπως βλέπουμε στις γραφικές δηλαδή αναιρετική συμβολή στον δέκτη.
- Ακόμα βλέπουμε ότι παρουσιάζουν οι γραφικές παραστάσεις μια περιοδικότητα με περίοδο $[-1,1]$ ακόμα και με αλλαγή της τιμής του $\cos \gamma_{out} - \cos \gamma_{in}$.
- Οι παραπάνω γραφικές εξάχθηκαν με πλήθος στοιχείων του RIS $M = 36$. Όπως ξέρουμε από την θεωρία στοιχειοκεραίων όσο μεγαλύτερο το πλήθος των στοιχείων τόσο πιο κατευθυντικές γίνονται οι στοιχειοκεραίες με αύξηση του κέρδους του κύριου λοβού, μείωση της γωνίας ημίσειας ισχύος και καταπίεση των πλευρικών λοβών. Επομένως, αν προσομοιάναμε για $M=100$ θα είχαμε ένα πιο κατευθυντικό (με την έννοια που χρησιμοποιείται στις στοιχειοκεραίες) διάγραμμα
- Ως $z(dB) = LF_{UE \rightarrow Obj}(dB) - LF_{UE \rightarrow RIS}(dB) - LF_{RIS \rightarrow Obj}(dB)$ και συνεπώς είναι μια μετρική της σχετικής ποιότητας μεταξύ του απευθείας και του από ανάκλαση μονοπατιού. Όπως είδαμε στο Μέρος 5 όσο βελτιώνεται το από ανάκλαση μονοπάτι (μείωση $LF_{UE \rightarrow RIS}(dB) + LF_{RIS \rightarrow Obj}(dB)$) και χειροτερεύει το απευθείας (αύξηση $LF_{UE \rightarrow Obj}(dB)$), δηλαδή το $z(dB)$ αυξάνει, τόσο αυξάνεται η βελτίωση που μπορεί να δώσει το RIS εφόσον συγκρίνουμε για την ίδια κατάσταση λειτουργίας. Όπως μπορούμε να δούμε εύκολα το $z(dB)$ έχει άμεση σχέση με την τιμή του $|h_{with\ RIS}|^2$ και μάλιστα με την μέγιστη επιτεύξιμη τιμή που μπορεί να λάβει.
- Παρατηρούμε επίσης μια σημαντική διαφορά στις βελτιώσεις μεταξύ του sensing και του communication καταστάσεων λειτουργίας αν συγκρίνουμε τις δύο καταστάσεις όταν έχουν ίδια

τιμή στις παραμέτρους $|h_{with RIS}|^2$ και προφανώς στην $|h_{without RIS}|^2$ (Σχήμα 4.15). Διαπιστώνουμε ότι η μορφή των διαγραμμμάτων εξαρτάται από τον παράγοντα διάταξης, η σχετική ποιότητα των καναλιών για ίδιο mode λειτουργίας καθορίζει τον δυνατό εύρος της βελτίωσης και άρα η κατάσταση λειτουργίας έρχεται να ρυθμίσει και αυτή τη μέγιστη τιμή της βελτίωσης. Από τις σχέσεις (4.6) και (4.7) μπορούμε να δούμε ότι η βελτίωση είναι συνάρτηση της μορφής

$$f(x) = \frac{\log_2(1 + a \cdot x)}{\log_2(1 + b \cdot x)} x > 0 \quad (4.14\alpha')$$

$$a = \frac{P \cdot |h_{with RIS}|^2}{N_0} > 0 \quad b = \frac{P \cdot |h_{without RIS}|^2}{N_0} > 0 \quad (4.14\beta')$$

όπου κατάσταση sensing $x = T_s/B_{sensing} = 10^{-5}/10^8 = 10^{-13}$ ενώ για communication $x = T_s/B_{comm} = 1/(720 \cdot 10^3) = 1.38 \cdot 10^{-6}$. Ύστερα από μελέτη της συνάρτησης διαπιστώσαμε πως όντως είναι φθίνουσα συνάρτηση του x . Πρέπει να υπογραμμίσουμε ότι φαίνεται πως η προσέγγιση του sensing με τον παρόντα τρόπο (έκφραση για $SNR^{sensing}$ και η χρήση των μετρικών Bit Rate και Mutual Information) εμφανίζει μια μεροληπτικότητα για το σύστημα μας.

Συμπερασματικά, από τα παραπάνω σχήματα και την ανάλυση που ακολούθησε βλέπουμε ήδη ότι ένας κρίσιμος παράγοντας που καθορίζει εντόνως την απόδοση ενός RIS ως προς την βελτίωση που παρέχει στο πλαίσιο χρήσης του από πολλούς χρήστες θα είναι οι σχετικές γωνίες εισόδου και εξόδου στο RIS.

4.2.2 Διακύμανση λόγω γωνιακής απόκλισης της βελτίωσης με χρήση RIS

Αν επανέλθουμε στην βασική εξίσωση υπό συνθήκες διαλείψεων μεγάλης κλίμακας, όπως την εκφράσαμε στο Κεφάλαιο 4.2 και θεωρήσουμε ως $\Delta\theta = \cos \gamma_{out} - \cos \gamma_{in}$ τότε θα έχουμε

$$h_{with RIS} = w \cdot \left(1 + \sqrt{z} \cdot \sum_{i=1}^M \exp \left(j \left(\frac{2\pi}{\lambda} d_s (i-1) \Delta\theta + \delta_i \right) \right) \right)$$

Όπως έχουμε αναφέρει για να έχουμε τη μέγιστη επιτευξίμη βελτίωση πρέπει ο εκθέτης του εκθετικού να έχει μέτρο όσο γίνεται πιο κοντά στο μηδέν. Τώρα στην περίπτωση που υπάρχει συσχέτιση του RIS με παραπάνω από ένα χρήστη, τα $\Delta\theta$ μεταξύ των χρηστών ενδέχεται να διαφέρουν πολύ ή λίγο. Άρα, και τα επιθυμητά δ_i για μέγιστη δυνατή βελτίωση θα διαφέρουν πολύ ή λίγο και συνεπώς αυτό θα έχει και επίδραση στην βελτίωση που παρέχεται σε κάθε χρήστη. Ως εκ τούτου θα πρέπει να υπάρχει μια μέθοδος βελτιστοποίησης ώστε το δ_i να βελτιστοποιείται βάσει κάποιου κριτηρίου. Ύστερα, από την βελτιστοποίηση θα υπάρχει για κάθε χρήστη και για κάθε στοιχείο του RIS μια διαφορά μεταξύ του της επιθυμητής (έστω q_i) και της υπάρχουσας (έστω δ_i) γωνιακής μετατόπισης του στοιχείου. Αυτή η διαφορά ισούται με :

$$\phi_i = \delta_i - q_i, \quad q_i = -\frac{2\pi}{\lambda} d_s (i-1) \Delta\theta \quad (4.15\alpha')$$

$$\phi_i = \pi \cdot (i-1) \cdot \Delta\theta + \delta_i, \quad \forall i \quad (4.15\beta')$$

και άρα

$$h_{with RIS} = w \cdot \left(1 + \sqrt{z} \cdot \sum_{i=1}^M \exp(j\phi_i) \right) \quad (4.16)$$

Όσο μεγαλύτερη γωνιακή συσχέτιση έχουν οι χρήστες μεταξύ τους (δηλαδή μικρότερες μεταβολές στο $\Delta\theta$), θα θέλουν περίπου ίδια δ_i για μέγιστη βελτίωση και συνεπώς η διακύμανση του ϕ_i θα είναι μικρή (το ϕ_i θα θεωρήσουμε στην ανάλυση μας πως μεταβάλλεται γύρω από το την βέλτιστη

τιμή που είναι το μηδέν). Άρα μπορούμε να δούμε ότι το ϕ_i είναι χρήσιμο να το προσεγγίσουμε ως γωνία στη μονάδα μέτρησης των ακτινίων (rad) και με μια πρώτη ματιά μπορούμε να δούμε ότι ότι επιθυμητό είναι $\phi_i \in [-\kappa\pi, \kappa\pi]$, $\kappa \in [0, 1]$ δηλαδή με κέντρο την επιθυμητή βέλτιστη τιμή. Ακόμα αν ορίσουμε

$$\delta_i \triangleq -\pi \cdot (i-1) \cdot \Delta\gamma^{(i)}, \quad \Delta\gamma^{(i)} \triangleq \cos \gamma_{out}^{(i)} - \cos \gamma_{in}^{(i)} \quad (4.17)$$

και σε αυτή την κατεύθυνση αν έχουμε μια προδιαγραφή λειτουργίας

$$|\phi_i| \leq \kappa\pi \Rightarrow |\pi \cdot (i-1) \cdot \Delta\theta + \delta_i| = |\pi \cdot (i-1) \cdot \Delta\theta - \pi \cdot (i-1) \cdot \Delta\gamma^{(i)}| \leq \kappa\pi \Rightarrow |\Delta\theta - \Delta\gamma^{(i)}| \leq \frac{\kappa}{(i-1)}, \forall i \quad (4.18)$$

Όπως μπορούμε να δούμε όσο αυξάνεται ο A/A του στοιχείου του RIS τόσο πιο μικρά είναι τα περιθώρια προσαρμογής εντός της προδιαγραφής λειτουργίας. Επομένως μπορούμε να κατανοήσουμε το trade off που υπάρχει μεταξύ του κέρδους της στοιχειοκεραίας, που είναι ανάλογο του τετράγωνου του M, και της αύξησης της κατευθυντικότητας με μείωση της γωνίας ημίσειας ισχύος. Στις γραφικές παραστάσεις των παρακάτω σχημάτων (Σχήμα 4.16 έως και Σχήμα 4.18) παρουσιάζεται η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας (Cumulative Density Function - CDF) αν θεωρήσουμε ότι το ϕ_i κατανέμεται ομοιόμορφα στο $[-\kappa\pi, \kappa\pi]$ για $\kappa = \{1/10 \rightarrow \text{solid}, 1/8 \rightarrow \text{dusted line}, 1/6 \rightarrow \text{dusted}, 1/4 \rightarrow \text{dusted circle},$

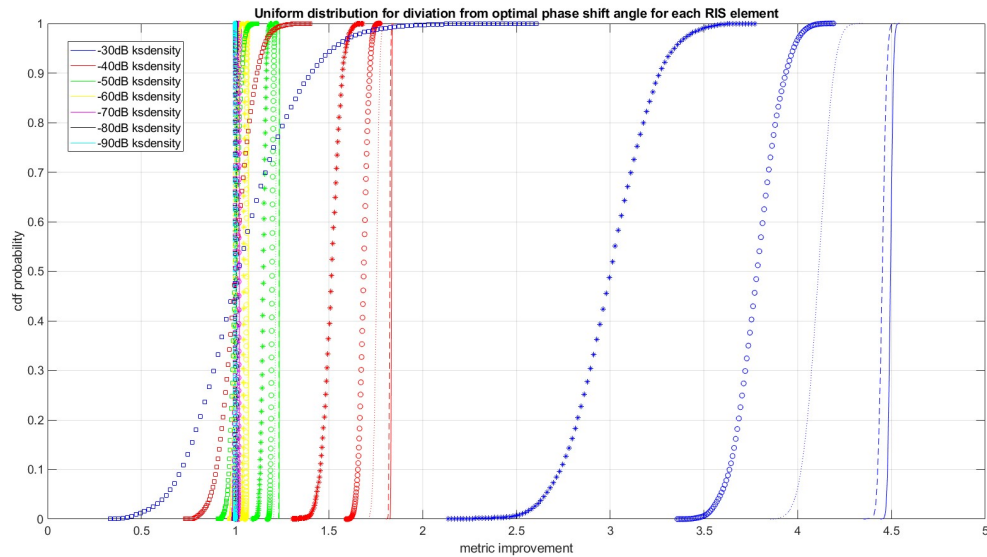
$1/2 \rightarrow \text{dusted star}, 1 \rightarrow \text{dusted square}\}$, για $w = 10^{-7}$ (τιμή που λάβαμε με επισκόπηση των αντίστοιχων μετρήσεων του Κεφαλαίου 4.1, η παράμετρος αυτή ονομάζεται scale factor στην προσομοίωση) και $z(\text{dB})$ στο διάστημα $[-90\text{dB}, -30\text{dB}]$ με βήμα 10dB για κατάσταση λειτουργίας sensing (για κατάσταση λειτουργίας communication θα άλλαζαν μόνο τα ποσοτικά και όχι τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των CDF).

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη των γραφικών παραστάσεων είναι τα ακόλουθα :

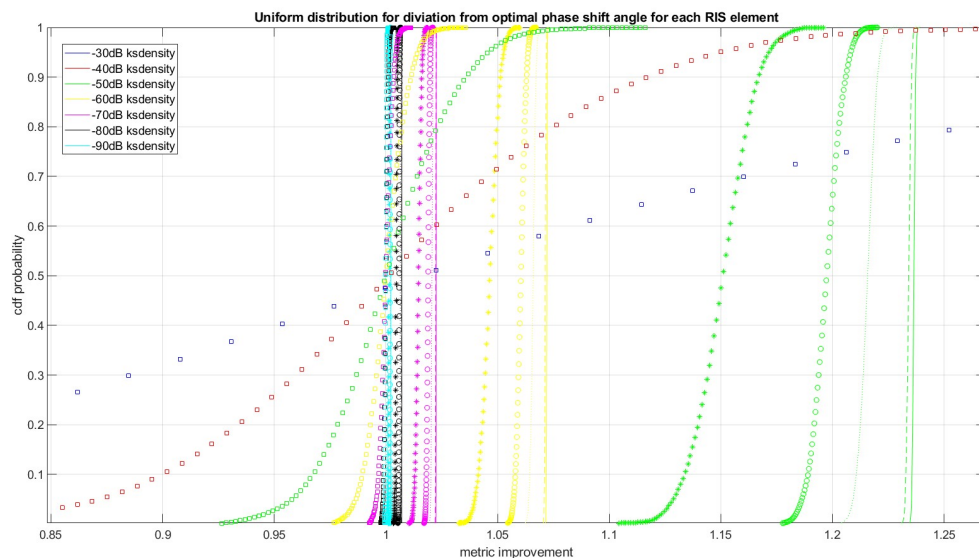
- Με αύξηση της τιμής της παραμέτρου κ έχουμε αύξηση της διακύμανσης της βελτίωσης και μείωση της μέσης τιμής της. Για μικρές τιμές του κ έχουμε σχεδόν κατακόρυφη γραμμή (σχεδόν σταθερή τιμή βελτίωσης ίδια με την μέση τιμή) ενώ όσο αυξάνεται η τιμή του κ η γραφική παράσταση λαμβάνει όλο και πιο έντονη σιγμοειδής μορφή. Μάλιστα για ορισμένες τιμές του κ δύναται να υπάρξει και αρνητική βελτίωση ακόμα και για υψηλές τιμές του z (δηλαδή συμφέρουσα σχέση ποιότητας απευθείας και από ανάκλαση μονοπατιού).
- Με την αύξηση του z παρατηρούμε ότι αφενός έχουμε αύξηση της μέσης τιμής για ίδια τιμή του κ αλλά αφετέρου έχουμε πολύ πιο έντονα φαινόμενα διακύμανσης όσο αυξάνεται η τιμή του κ .
- Αύξηση της τιμής του κ σημαίνει ότι οι χρήστες διαφέρουν σημαντικά ως προς τις σχετικές γωνιακές θέσεις (γωνίες εισόδου και εξόδου από το RIS) και επομένως ο κύριος λοβός της παθητικής ανακλαστικής στοιχειοκεραίας πρέπει να ανοίξει σημαντικά για να καλύψει όλους τους χρήστες και συνεπώς να μειωθεί το κατευθυντικό κέρδος. Ταυτόχρονα, λόγω της περιορισμένης ισχύος εκπομπής αυτή η μείωση θα οδηγήσει και σε μείωση της εκπεμπόμενης ισχύος προς τις κατευθύνσεις εντός του κυρίου λοβού και ως εκ τούτου θα έχουμε μείωση της βελτίωσης που παρέχει η χρήση του RIS.

Σε παρόμοια φιλοσοφία, παρουσιάζουμε στις γραφικές παραστάσεις (Σχήμα 4.19 έως και Σχήμα 4.21) την CDF της βελτίωσης με χρήση RIS αν η διαφορά μεταξύ βέλτιστης και υπάρχουσας γωνιακής μετατόπισης κάθε στοιχείου του RIS ακολουθεί κανονική κατανομή $\mathcal{N}(0, (\kappa\pi)^2 / (Q^{-1}(0.005))^2)$, δηλαδή το εύρος τιμών να είναι σχεδόν όπως και στα Σχήματα 4.16-4.18. Στα Σχήμα 4.22-4.24 η διαφορά μεταξύ βέλτιστης και υπάρχουσας γωνιακής μετατόπισης κάθε στοιχείου του RIS ακολουθεί κανονική κατανομή $\mathcal{N}((\kappa\pi), (\kappa\pi)^2 / 4 \cdot Q^{-1}(0.005))^2)$. Στην πρώτη ομάδα σχημάτων βλέπουμε ότι λόγω της κανονικής κατανομής (υψηλή πιθανότητα ο αριθμός να είναι γύρω από την μέση τιμή

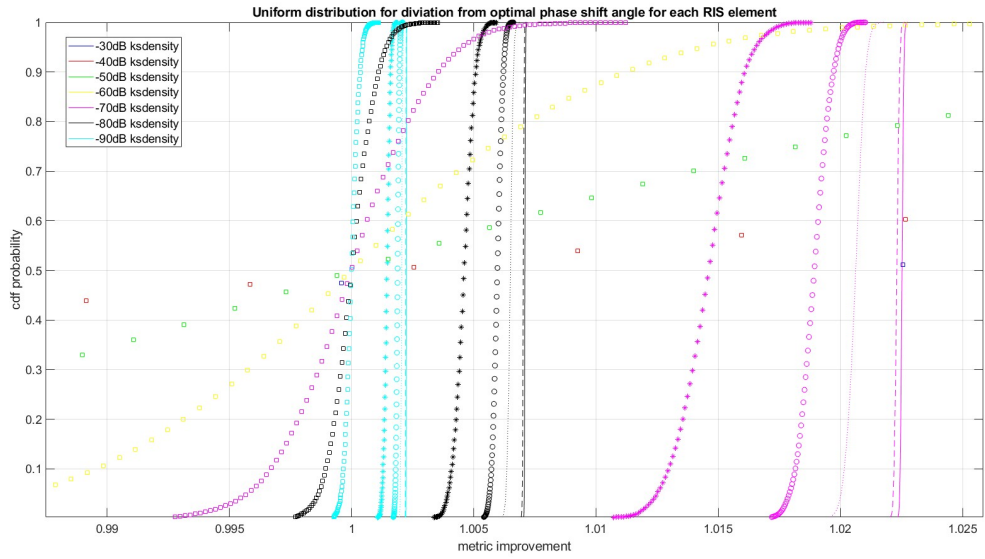
αν έχω και χαμηλή διασπορά) και της μηδενικής μέσης τιμής (τιμή που δίνει τη μέγιστη βελτίωση) έχουμε καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την ομοιόμορφη κατανομή στο ίδιο εύρος τιμών. Από την άλλη, στην δεύτερη ομάδα σχημάτων βλέπουμε ότι λόγω της κανονικής κατανομής μη μηδενικής μέσης τιμής, η οποία μπορεί να είναι και σημαντικά μεγαλύτερη του μηδενός (όμοια συμπεριφορά και για αρνητικές τιμές), και μικρότερης διασποράς σε σχέση με πριν διαπιστώνουμε έντονες μεταβολές, ακόμα και αποκλειστικά αναιρετικών συμβολών. Πάντως βλέπουμε ότι σε γενικές γραμμές τα συμπεράσματα που εξήγαγαμε από τα Σχήματα 4.16-4.18 ισχύουν και στα υπόλοιπα σχήματα του παρόντος μέρους.



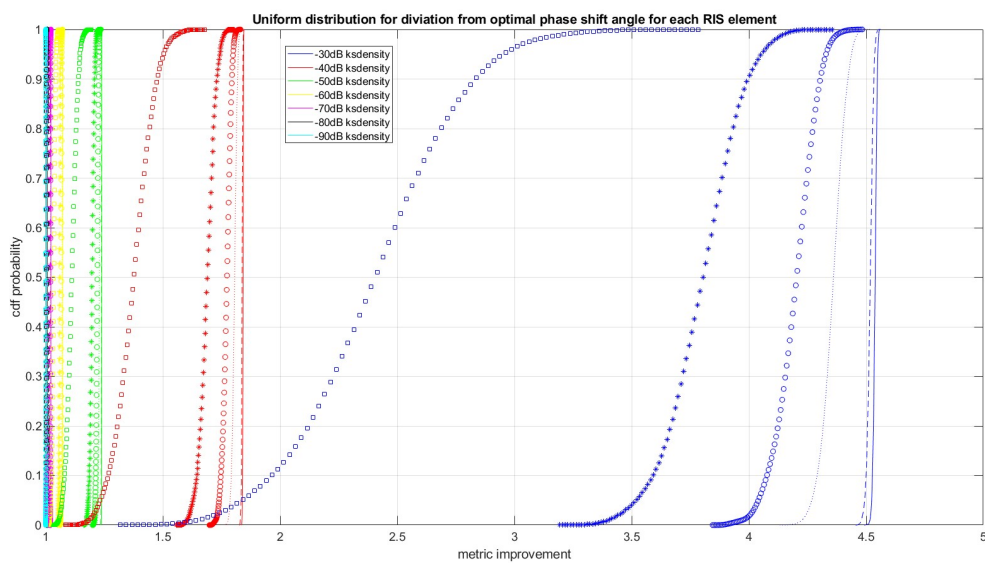
Σχήμα 4.16: CDF της βελτίωσης λόγω χρήσης του RIS για ομοιόμορφη κατανομή της διαφοράς επιθυμητής και υπάρχουσας γωνιακής μετατόπισης των στοιχείων του RIS



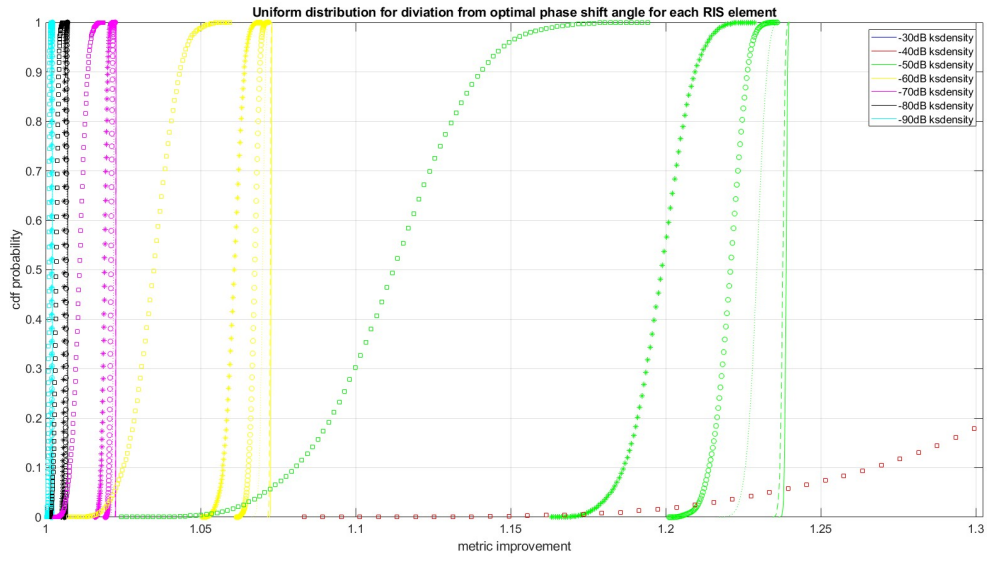
Σχήμα 4.17: Εστίαση στο Σχήμα 4.16



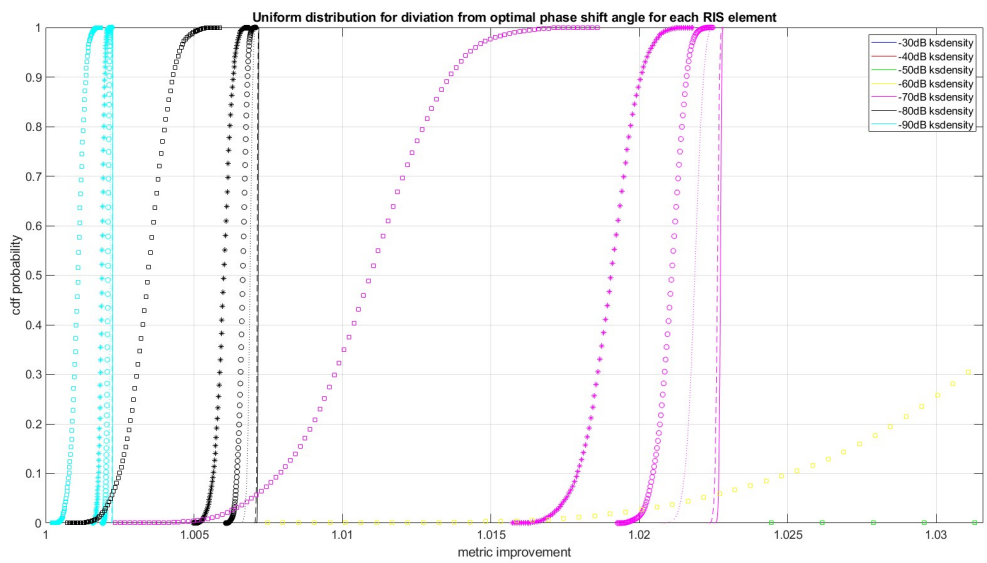
Σχήμα 4.18: Εστίαση στο Σχήμα 4.17



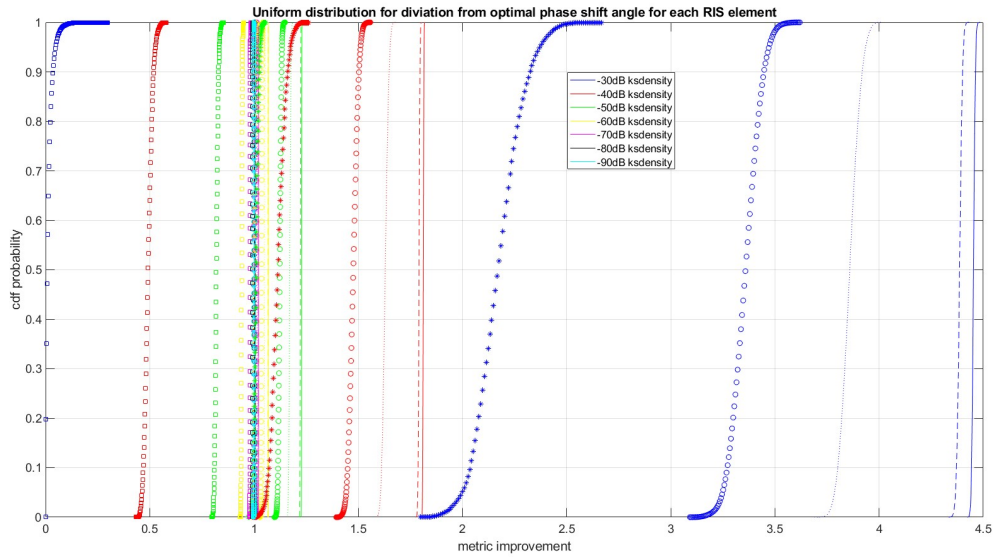
Σχήμα 4.19: CDF της βελτίωσης λόγω χρήσης του RIS για κανονική κατανομή μηδενικής μέσης τιμής της διαφοράς επιθυμητής και υπάρχουσας γωνιακής μετατόπισης των στοιχείων του RIS



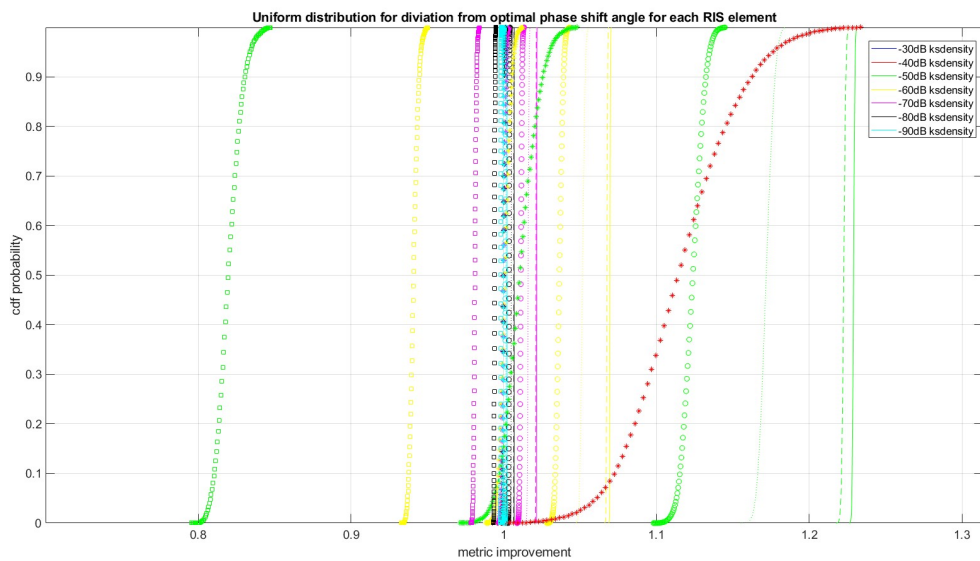
Σχήμα 4.20: Εστίαση στο Σχήμα 4.19



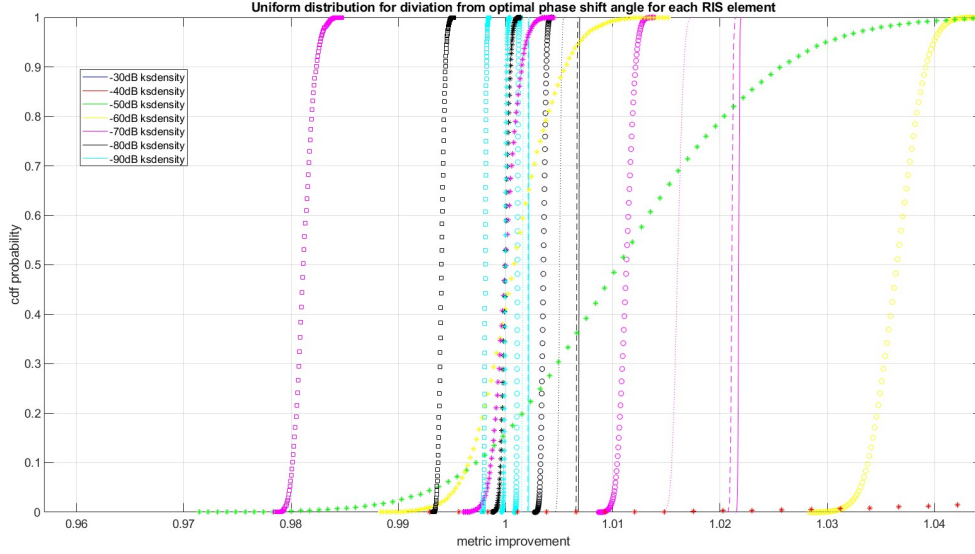
Σχήμα 4.21: Εστίαση στο Σχήμα 4.20



Σχήμα 4.22: CDF της βελτίωσης λόγω χρήσης του RIS για κανονική κατανομή μη μηδενικής μέσης τιμής της διαφοράς επιθυμητής και υπάρχουσας γωνιακής μετατόπισης των στοιχείων του RIS



Σχήμα 4.23: Εστίαση στο Σχήμα 4.22



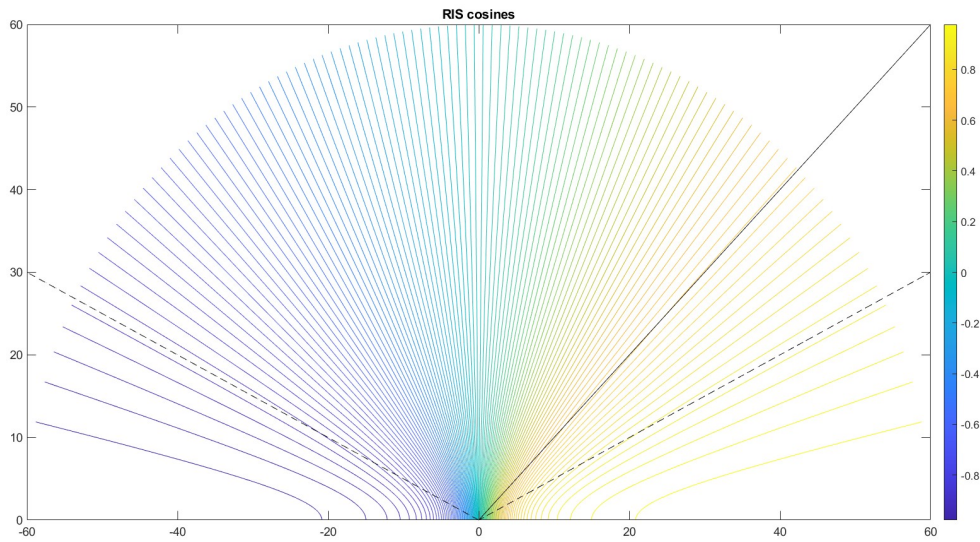
Σχήμα 4.24: Εστίαση στο Σχήμα 4.23

4.2.3 Μελέτη της γωνίας εισόδου/εξόδου στο RIS

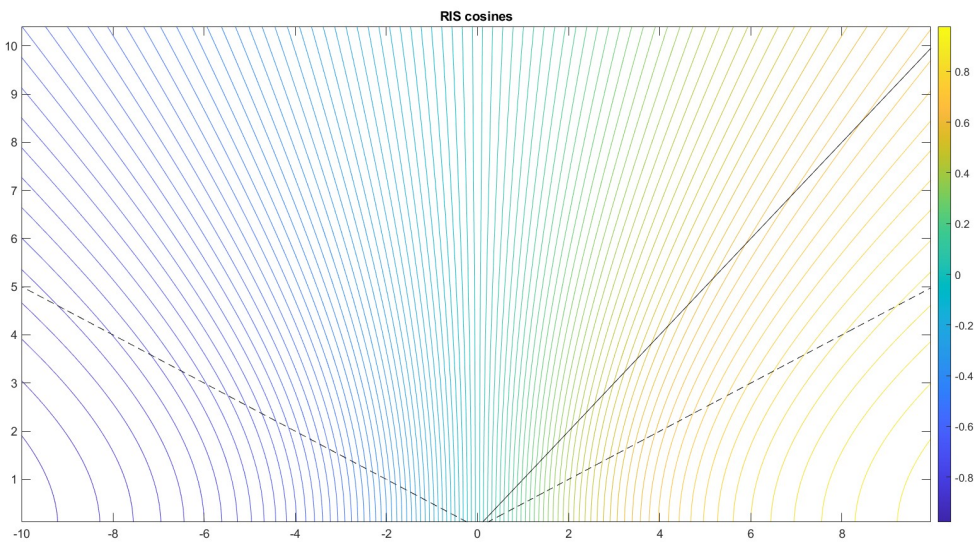
Διαπιστώνοντας στα Κεφάλαια 4.2.1 και 4.2.2 πόσο κομβική είναι η σχετική γωνιακή θέση του τερματικού και η επιθυμητή γωνία εξόδου από το RIS που επιθυμεί, σε σχέση με τους υπόλοιπους χρήστες που κάνουν associate με το RIS, θεωρούμε σκόπιμο να μελετήσουμε τον γεωμετρικό τόπο των σημείων στην περιοχή κάλυψης που βλέπουν το RIS με την ίδια γωνία. Για την προσομοίωση θεωρούμε περιοχή κάλυψης του RIS ακτίνας $[10m, 80m]$ και γωνίας στο οριζόντιο επίπεδο $[\pi/6, 5\pi/6]$, ύψος RIS $6m$, ύψος τερματικού $1.5m$. Επίσης, βάσει της υπάρχουσας βιβλιογραφίας που έχει κατασκευάσει RIS το εύρος γωνιών στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει το RIS είναι $[\pi/6, 5\pi/6]$ στο οριζόντιο επίπεδο αν θεωρήσουμε αξιωματική μέτρηση της γωνίας ως προς τον άξονα της στοιχειο-κεραίας. Η γωνία υπολογίζεται μέσω του τύπου

$$\cos(\theta) = \frac{u \cdot v}{|u| \cdot |v|}, \quad u \in \mathbb{R}^3, \quad v \in \mathbb{R}^3 \quad (4.19)$$

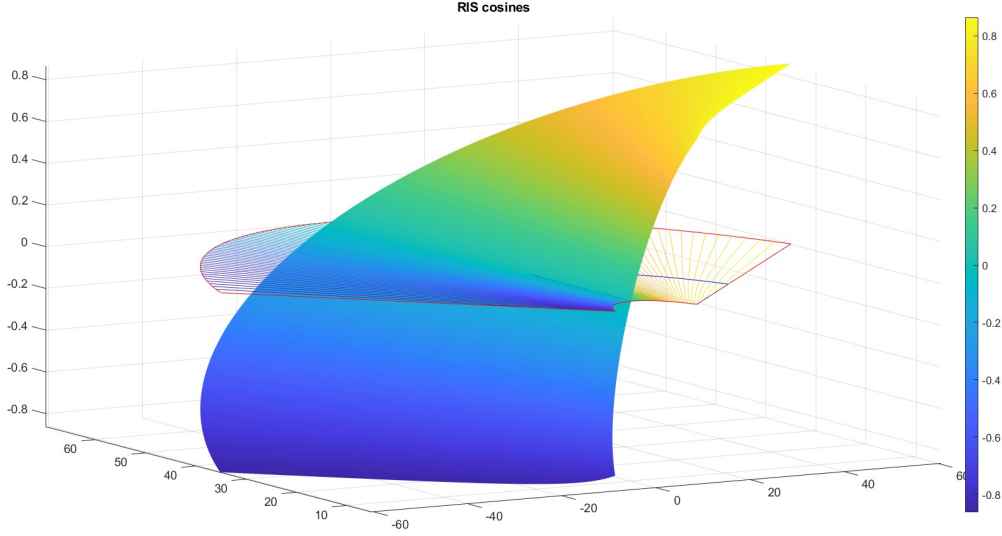
Χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις surf και contour από το προγραμματιστικό περιβάλλον του MATLAB εξάγουμε τις γραφικές παραστάσεις στα Σχήματα 4.25-4.27. Παρατηρούμε καταρχάς ότι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που έχουν την ίδια γωνία εισόδου στο RIS είναι ευθεία για όλο το εύρος της περιοχής κάλυψης. Επιπλέον, βλέπουμε ότι μπορούμε να χωρίσουμε την γραφική σε τρία μέρη και είναι περιττή ως προς 90 μοίρες αν θεωρήσουμε ότι το RIS έχει άξονα την ημιευθεία Ox στο καρτεσιανό επίπεδο : Το πρώτος μέρος είναι $[0, \pi/6]$, στο οποίο η χωρική μεταβολή του συνημίτονου είναι μικρή (εξού και η πεπλατυσμένη μορφή στην αποτύπωση μέσω surf), το δεύτερο μέρος είναι $[\pi/6, \pi/3]$, στο οποίο υπάρχει μια λίγο πιο έντονη χωρική μεταβολή, και το τρίτο μέρος είναι $[\pi/3, \pi/2]$, στο οποίο η χωρική μεταβολή του συνημίτονου είναι σχεδόν γραμμική. Όμως σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία που αφορά την κατασκευή RIS το εύρος κάλυψης στο οριζόντιο επίπεδο είναι $[\pi/6, 5\pi/6]$. Ταυτόχρονα βλέπουμε ότι για αποστάσεις μικρότερες των $10m$ από το RIS ο γεωμετρικός τόπος των σημείων με ίδιο $\cos(\theta)$ δεν είναι ευθεία (της μορφής $y = a \cdot x + b$) και ταυτόχρονα υπάρχει μια απόκλιση μεταξύ της γωνίας στο δισδιάστατο επίπεδο και αυτής του τρισδιάστατου χώρου, που οφείλεται στην υψομετρική διαφορά τερματικού και RIS.



Σχήμα 4.25: Συνημίτονο γωνίας εισόδου στο RIS (χρήση συνάρτησης contour – δυναμικών γραμμών). Με διακεκομμένη μαύρη γραμμή παρουσιάζεται το μέγιστο δυνατό εύρος κάλυψης του RIS και με συνεχ μαύρη γραμμή η ευθεία $y = x$ προς εμφάνιση της απόκλισης δισδιάστατης και τρισδιάστατης γωνίας.



Σχήμα 4.26: Εστίαση του Σχήματος 4.25 στην περιοχή απόστασης από το RIS μικρότερης των 10m



Σχήμα 4.27: Συνημίτονο γωνίας εισόδου στο RIS (χρήση συνάρτησης surf) για απόσταση μεγαλύτερη των 10m από το RIS

4.3 Βελτιστοποίηση γωνιακών μετατοπίσεων RIS και τομεοποίηση

4.3.1 Διατύπωση προβλήματος βελτιστοποίησης

Όπως διαπιστώσαμε και στο Κεφάλαιο 4.2 της παρούσας εργασίας, όταν το RIS πρόκειται να προσπελασθεί από πολλούς χρήστες, εμφανίζεται η ανάγκη για βελτιστοποίηση της γωνιακής μετατόπισης εκάστου στοιχείου του RIS βάσει του επιθυμητού κριτηρίου που επιλέγει ο σχεδιαστής. Με βάση την βασική εξίσωση του συστήματος (που περιγράφει τον παράγοντα καναλιού με χρήση RIS) υπό συνθήκες διαλείψεων μεγάλης κλίμακας, έχουμε ότι ο n -οστός χρήστης επιθυμεί από το i -οστό στοιχείο του RIS γωνιακή μετατόπιση

$$\delta_i^{(n)} = -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot d_s \cdot (i-1) \cdot (\cos \gamma_{out}^{(n)} - \cos \gamma_{in}^{(n)}), \forall i \in \{1, \dots, M\} \quad (4.20)$$

για να επιτύχει την μέγιστη δυνατή βελτίωση (συνθήκη ενισχυτικής συμβολής στον δέκτη). Αν ορίσουμε

$$\Omega^{(n)} = \text{diag}(v^{(n)}), v^{(n)} \in \mathbb{R}^{1 \times 3}, v^{(n)}(1, i) = \exp(j\delta_i^{(n)}) \quad (4.21)$$

όπου $\Omega^{(n)}$ ο διαγώνιος πίνακας και $v^{(n)}$ ο αντίστοιχος πίνακας γραμμή των γωνιακών μετατοπίσεων του RIS προσαρμοσμένο στον n -οστό χρήστη προς μέγιστη δυνατή βελτίωση των επιδόσεών του. Προφανώς ο πίνακας $v^{(n)}$ αλλάζει από χρήστη σε χρήστη και δεν υπάρχει πίνακας που να μεγιστοποιεί ταυτόχρονα την απόδοση όλων των χρηστών. Για να επιτύχουμε ισορροπία μεταξύ των διαφορετικών διανυσμάτων $v^{(n)}$ των χρηστών και να εντοπίσουμε την ολική λύση για το πρόβλημα προσαρμογής αλλαγής φάσης όλων των στοιχείων του RIS, ορίζουμε για κάθε χρήστη n κατάλληλο συντελεστή βάρους $w_n \in [0, 1]$ [47],[48] και υπολογίζουμε τον γραμμικό συνδυασμό των διανυσμάτων $v^{(n)}$ των χρηστών ως εξής

$$v = \sum_{n=1}^N w_n \cdot v^{(n)}, \Omega = \text{diag}(\exp(j\angle v)), \sum_{n=1}^N w_n = 1 \quad (4.22)$$

όπου N το πλήθος των χρηστών που θα συσχετιστούν με το συγκεκριμένο RIS. Ο τελικό σκοπός της μεθόδου αυτή είναι να προσδιορίσουμε τη βέλτιστη τιμή του συντελεστή βάρους w_n για κάθε

χρήστη κάθε όρου του διανύσματος v που θα οδηγήσει σε υψηλή (ή χαμηλή ανάλογα με την έκφραση για την f) τιμή το άθροισμα

$$F = \sum_{n=1}^N f^{(n)} \quad (4.23)$$

όπου η συνάρτηση $f^{(n)}$ είναι μια μετρική της απόδοσης του χρήστη n όταν χρησιμοποιεί το RIS και πρέπει να έχει κοινή μορφή για όλους τους χρήστες (θα εξηγηθεί ακολούθως ο επιθετικός προσδιορισμός κοινή).

Η μετρική αυτή μπορεί να σχετίζεται είτε με την κατάσταση λειτουργίας του χρήστη (Bit Rate για communication mode, Mutual Information για sensing mode) είτε να είναι ανεξάρτητη αυτής και να εστιάζει στην ποιότητα του καναλιού (σηματοθροβικός λόγος ή παράγοντας καναλιού). Με δεδομένο ότι μελετάμε την βελτίωση (improvement) συναρτήσει των μετρικών αξιολόγησης εκάστης κατάστασης λειτουργίας επιλέγουμε την πρώτη κατεύθυνση. Όμως πρέπει να επισημάνουμε ότι το πεδίο τιμών του Mutual Information έχει μέγιστη τιμή τάξης μεγέθους μερικές δεκάδες ενώ το πεδίο τιμών του Bit Rate είναι τάξης μεγέθους από 100Kbps μέχρι 10Mbps. Ως εκ τούτου θα χρειαστεί μια κανονικοποίηση των μεγεθών αυτών, διότι σε αντίθετη περίπτωση μεγιστοποίηση αθροίσματος Bit Rate και Mutual Information χωρίς κανονικοποίηση θα δρούσε μεροληπτικά υπέρ των πρώτων καθώς οποιαδήποτε αύξηση του Bit Rate ενός χρήστη με communication mode θα ήταν καλύτερη από οποιαδήποτε αύξηση του Mutual Information ενός χρήστη με sensing mode. Επομένως, προκύπτει η ανάγκη για κανονικοποίηση των μετρικών κάθε κατάστασης και έτσι επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε ως μετρική τη βελτίωση με χρήση RIS όπως την ορίσαμε στο Κεφάλαιο 4.1.2. Προς αυτή την κατεύθυνση καταλήξαμε σε τρεις πιθανές μορφές της συνάρτησης f

$$f_1 = \frac{(total\ metric\ with\ RIS) - (metric\ without\ RIS)}{(individual\ metric\ with\ IS) - (metric\ without\ RIS)} = \frac{(total\ improvement)}{(individual\ improvement)}$$

$$f_2 = \frac{(individual\ metric\ with\ RIS) - (total\ metric\ with\ RIS)}{(metric\ without\ RIS)} =$$

$$= (individual\ improvement) - (total\ improvement)$$

$$f_3 = \frac{(total\ metric\ with\ RIS)}{(metric\ without\ RIS)} - 1 = (total\ improvement)$$

όπου ως *metric* αναφέρεται το Bit Rate ή το Mutual Information ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας, ο προσδιορισμός *total* αναφέρεται στην χρήση του πίνακα *Omega* για τον υπολογισμό του παράγοντα καναλιού του n -οστού χρήστη με χρήση RIS, ο προσδιορισμός *individual* αναφέρεται στην χρήση του πίνακα *Omega*^(n) για τον υπολογισμό του παράγοντα καναλιού του n -οστού χρήστη με χρήση RIS (άρα μέγιστη επιτεύξιμη τιμή) και η φράση *with/without RIS* αναφέρεται στην χρήση ή όχι του RIS. Να σημειώσουμε ότι όταν δεν έχουμε χρήση RIS δεν απαιτείται ο προσδιορισμός *total – individual* για ευνόητους λόγους.

Στις δύο πρώτες πιθανές μορφές σκοπός μας είναι να εκφράσουμε είτε μέσω λόγου είτε μέσω λόγου διαφοράς πόσο καλά προσεγγίζει η βελτίωση την μέγιστη δυνατή επιτεύξιμη τιμή της. Αν επιλέξουμε την πρώτη μορφή, τότε για κάθε χρήστη η επιθυμητή τιμή της f_1 είναι 1 και στόχο έχουμε την μεγιστοποίηση της F . Αν από την άλλη επιλέξουμε τη δεύτερη μορφή, τότε για κάθε χρήστη η επιθυμητή δυνατή τιμή της f_2 είναι 0 και στόχο έχουμε την ελαχιστοποίηση της F . Παρόλα αυτά και οι δύο παραπάνω περιπτώσεις παρουσιάζουν το εξής μειονέκτημα : αν έχουμε ένα χρήστη με καλό μονοπάτι ανάκλασης και ένα με κακό (δηλαδή το *individual metric with RIS* του πρώτου είναι μεγαλύτερο του δεύτερου και ομοίως το *individual improvement*) τότε να επιτύχουμε την καλύτερη δυνατή τιμή της F θα πρέπει να προσαρμοστεί ο πίνακας *Omega* στον πρώτο χρήστη ώστε να αυξήσει το δικό του *total improvement* προς αύξηση του λόγου της f_1 ή μείωση της διαφοράς της f_2 καθώς έχει μεγαλύτερη επίδραση από τον δεύτερο χρήστη. Μια πιθανή λύση θα ήταν η

εικονική μείωση της τιμής του *individual improvement* μέσω μιας σιγμοειδής συνάρτησης όπως η ακόλουθη

$$reference\ value = prctile(\textit{individual improvement of all users}, k\%)$$

$$(\textit{new individual improvement})^{(i)} = \begin{cases} (\textit{individual improvement})^{(i)}, \\ (\textit{individual improvement})^{(i)} < (\textit{reference value}) \\ \frac{2 \cdot (\textit{reference value})}{1 + \exp(\textit{reference value} - (\textit{individual improvement})^{(i)})}, \\ (\textit{individual improvement})^{(i)} \geq (\textit{reference value}) \end{cases}$$

όπου *prctile* η συνάρτηση του MATLAB η οποία δεχόμενη ως όρισμα τον πίνακα των μέγιστων δυνατών βελτιώσεων για κάθε χρήστη *i* δίνει ως έξοδο την τιμή για την οποία το *k*% των τιμών του πίνακα εισόδου είναι μικρότερες από αυτή. Προφανώς η τιμή εξόδου μειώνεται με μείωση του *k* και αυξάνεται με αύξηση του δίνοντας την δυνατότητα στον σχεδιαστή να βρεί την κατάλληλη τιμή του *k* ανάλογα με την τοπολογία. Η ρύθμιση του *k* πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή όταν πρόκειται να λάβουμε υπόψιν φαινόμενα σκίασης, καθώς εκεί το εύρος τιμών των μέγιστων βελτιώσεων θα είναι αρκετά μεγάλο (ο παραπάνω συλλογισμός είναι worst case scenario καθώς σε πραγματικές τοπολογίες κοντινά σημεία έχουν παρόμοια κανάλι ως προς τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας).

Από την άλλη η συνάρτηση f_3 δεν παρουσιάζει τέτοιο πρόβλημα, είναι η μετρική αξιολόγησης της επίδοσης του κάθε χρήστη και έτσι αποφασίσαμε ότι είναι αυτή που θα χρησιμοποιήσουμε στην πορεία της εργασίας. Όμως πρέπει να μεριμνήσουμε εδώ μέσω κάποιου περιορισμού (constraint) να προσπαθήσουμε να δώσουμε ένα κατώτατο όριο βελτίωσης που πρέπει να παρέχει το RIS αναλογικά πάντα με το *individual improvement* του κάθε χρήστη. Ο περιορισμός αυτός προτείνουμε να είναι

$$constraint^{(i)} = 0.5 \cdot (\textit{individual improvement})^{(i)}$$

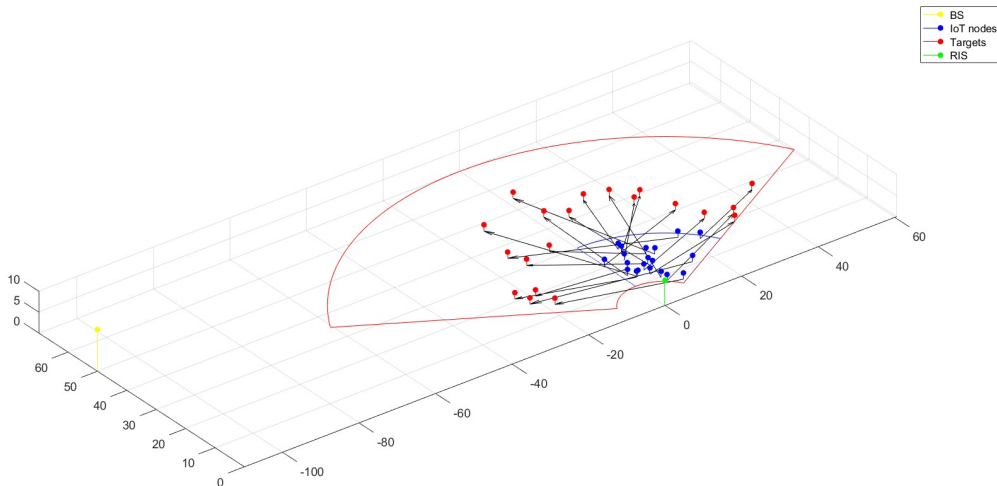
δηλαδή η βελτίωση με χρήση του πίνακα *Omega* να είναι τουλάχιστον το 50% της βελτίωσης με χρήση του πίνακα *Omega*⁽ⁿ⁾ (μέγιστη δυνατή βελτίωση).

Συνεπώς το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να γραφτεί ως ακολούθως

$$\begin{aligned} \max_{\vec{w}} \quad & \sum_{n=1}^N (\textit{total improvement})^{(n)} \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq w_n \leq 1 \quad \forall n \in \{1, \dots, N\} \\ & \sum_{n=1}^N w_n = 1 \\ & 0.5 \cdot (\textit{individual improvement})^{(n)} \leq (\textit{total improvement})^{(n)} \end{aligned} \tag{4.24}$$

4.3.2 Μελέτη τομεοποίησης στην περιοχή κάλυψης του RIS

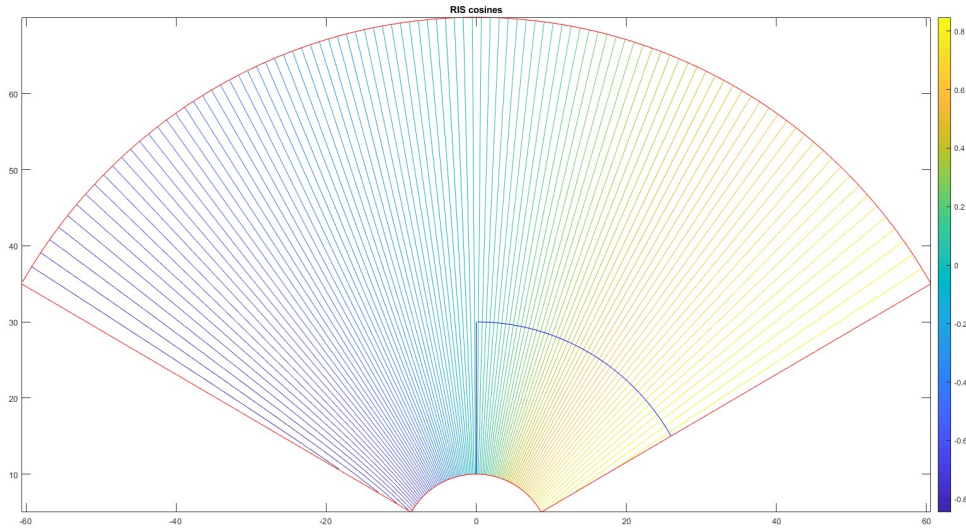
Από τα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας (4.1.2, 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3) έχουμε καταλήξει σε ορισμένα συμπεράσματα σχετικά με τα χαρακτηριστικά της υποψήφιας τοπολογίας που θα χρησιμοποιηθεί στις προσομοιώσεις που θα ακολουθήσουν. Αυτά αφορούν την απόσταση από το RIS, η οποία πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 10m (συμπέρασμα μέρους 4.2.3) και όσο γίνεται μικρότερη σε σχέση με την απόσταση UE-Object (συμπέρασμα μέρους 4.1.2) και το γωνιακό εύρος κάλυψης, το οποίο πρέπει να είναι το δυνατόν μικρότερο και να μην ξεπερνά την προδιαγραφή λειτουργίας $[\pi/6, 5\pi/6]$ σε οριζόντιο επίπεδο. Ακόμα, εφόσον UE, RIS, Object διαμορφώνουν ένα τρίγωνο, τα είδη τριγώνου με την καλύτερη παρεχόμενη βελτίωση είναι κατά σειρά το αμβλυγώνιο με την αμβλεία γωνία να είναι απέναντι από την πλευρά UE-Object, ακολουθεί το ορθογώνιο με την ορθή



Σχήμα 4.28: Προτεινόμενη τοπολογία. Εντός του μπλε πλαισίου σημειώνεται η περιοχή κάλυψης του RIS, εντός κόκκινου πλαισίου η περιοχή στην οποία μπορεί να βρίσκονται τα Targets, με πράσινο χρώμα σημειώνεται η θέση του RIS και με κίτρινο χρώμα η θέση του Base Station.

γωνία να είναι απέναντι από την πλευρά UE-Object και τέλος το ορθογώνιο με την ορθή γωνία απέναντι από την πλευρά RIS-Object (με λίγα λόγια η γωνία μεταξύ των UE-Object και UE-RIS πρέπει να είναι όσο μικρότερη γίνεται και όχι αμβλεία). Επομένως, έχοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω προτείνουμε για αρχή μια τοπολογία ενός RIS στη θέση $(0,0,6)$, το Base Station στη θέση $(-100,50,10)$ και οι χρήστες εντός την περιοχής που ορίζεται ως εξής : $10m \leq ((\text{απόσταση από RIS})) \leq 30m$ και $\pi/6 \leq (\text{αζιμουθιακή γωνία ως προς RIS}) \leq \pi/2$. Έχοντας υπόψιν όμως την μεγάλη ευαισθησία του συστήματος ως προς την σχετική γωνιακή τοποθέτηση τόσο των χρηστών όσο και των συσχετισμένων Objects με αυτά ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας, εισάγουμε την έννοια της τομεοποίησης της αρχικής περιοχής κάλυψης των χρηστών. Ως εκ τούτου θα μελετήσουμε την πρόταση αυτή ως ακολούθως : χωρίζουμε το αρχικό αζιμουθιακό εύρος κάλυψης σε 6 γωνίες αναφοράς $\theta = 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$, για κάθε μια από αυτές ορίζουμε 5 πιθανά γωνιακά εύρη κάλυψης $\text{angle} = \{[\theta, \theta+2^\circ], [\theta, \theta+4^\circ], [\theta, \theta+6^\circ], [\theta, \theta+8^\circ], [\theta, \theta+10^\circ]\}$ και τέσσερις πιθανές αποστάσεις από το RIS $\text{radius} = \{10m, 20m, 30m, 40m\}$. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, δημιουργούμε τέσσερα είδη προσομοιώσεων :

- Για σταθερό θ και σταθερό angle μεταβάλλεται το radius (Σχήμα 4.30 - 4.33) : με βάση τα χαρακτηριστικά αυτά δημιουργείται ένα κυκλικό τόξο, του οποίου το μήκος αυξάνει με την αύξηση του radius , επί του οποίου κατανομούνται ομοιόμορφα οι χρήστες. Σκοπός της προσομοίωσης είναι να διαπιστώσουμε ότι παρόλο που αυξάνεται το χωρικό εύρος κάλυψης (μήκος τόξου) δεν υπάρχει ουσιαστική αλλαγή στην σχετική βελτίωση που παρέχεται μεταξύ των χρηστών, καθώς δεν έχει αλλάξει το αζιμουθιακό εύρος κάλυψης.
- Για σταθερό radius και σταθερό angle μεταβάλλεται το θ (Σχήμα 4.34 - 4.37) : Με βάση τα χαρακτηριστικά, προκύπτει η σάρωση ενός κυκλικού τομέα από $\pi/6$ έως $\pi/2$ ανά $\pi/18$. Σκοπός της προσομοίωσης είναι να μελετήσουμε την επίδραση της μεταβολής του $\cos(\theta)$ λόγω χωρικής μετατόπισης. Με άλλα λόγια θέλουμε να γίνει εμφανής η σημασία της παρατήρησης του Κεφάλαιο 4.2.3 σχετικά με την γραμμική και μη γραμμική περιοχή του $\cos(\theta)$. Στις γραφικές παραστάσεις βλέπουμε ότι με αύξηση του θ παρατηρείται μια σταδιακή χειροτέρευση στην σχετική βελτίωση που παρέχεται μεταξύ των χρηστών χωρίς όμως να είναι τόσο έντονη καθώς είμαστε σε απόσταση από το RIS που εξασφαλίζει παρόμοια συμπεριφορά μεταξύ δισδιάστατης και τρισδιάστατης γωνίας ως προς τον γεωμετρικό τόπο σταθερού συνημίτονου.

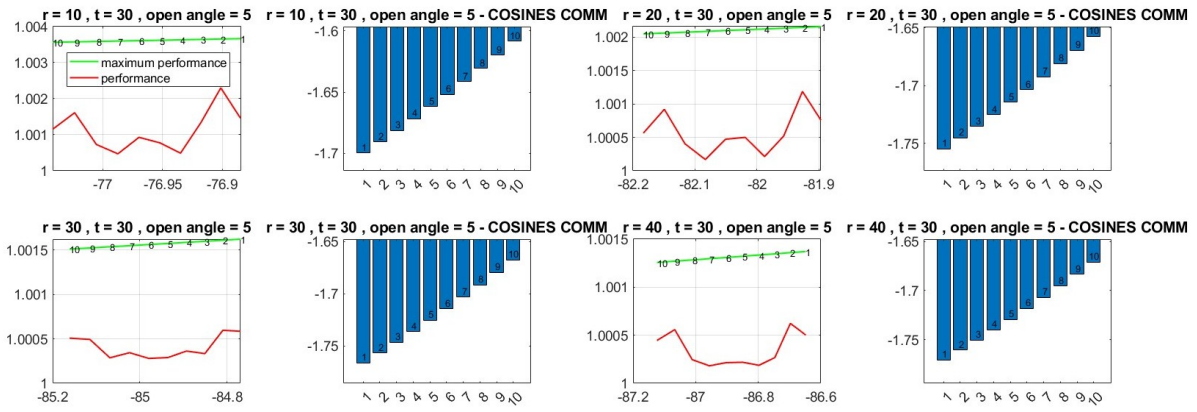


Σχήμα 4.29: Συνημίτονο γωνίας εισόδου στο RIS (χρήση δυναμικών γραμμών)

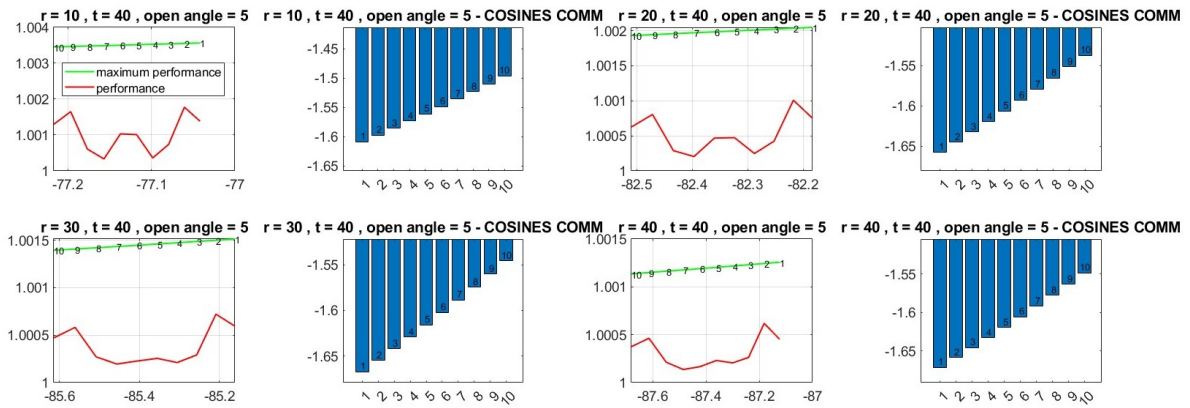
- Για σταθερό *radius* και σταθερό *theta* μεταβάλλεται το *angle* (Σχήμα 4.38 - 4.41) : Σκοπός της παρούσας προσομοίωσης είναι να διαπιστώσουμε πως ακόμα και για την καλύτερη επιλογή του *theta* (όσο πιο κοντά στην περιοχή σταθεροποίησης) υπάρχει κάποια σχετική διαφοροποίηση στην σχετική βελτίωση μεταξύ των χρηστών ακόμα και για μικρά ανοίγματα κάλυψης.
- Για σταθερό μήκος τόξου μεταβολή καταλλήλως της ακτίνας και του *angle* για σταθερή γωνία αναφοράς (Σχήμα 4.42 - 4.45): Σκοπός της παρούσας προσομοίωσης είναι να διαπιστώσουμε ότι αν έχουμε σταθερή γωνία αναφοράς το ίδιο μήκος τόξου όσο απομακρύνεται από το RIS αντιστοιχεί σε μικρότερο *angle* (οπότε καλύτερη προσέγγιση της μέγιστης δυνατής βελτίωσης για κάθε χρήστη) αλλά με επακόλουθο trade off της μείωσης της μέγιστης δυνατής βελτίωσης.

Στα Σχήματα 35-46 παρουσιάζουμε στα αριστερά την *individual* (πράσινη γραμμή) και *totalimprovement* (κόκκινη γραμμή) για κάθε χρήστη συναρτήσει της παραμέτρου $(Path Loss direct)(dB) - (Path Loss reflect)(dB)$ και στα δεξιά το $\cos(\gamma_{out}) - \cos(\gamma_{in})$ για κάθε χρήστη με τη μορφή ραβδοδιαγράμματος.

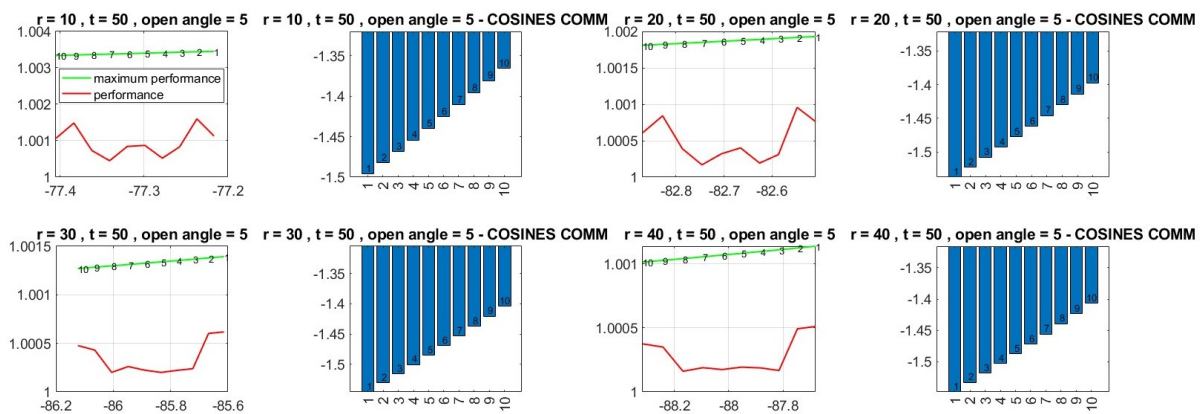
Συγκεντρωτικά μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι υπάρχουν δύο κριτήρια που προσδιορίζουν την βελτίωση με χρήση RIS : καταρχάς το πρώτο έχει έντονο ατομοκεντρικό χαρακτήρα και αφορά τη μέγιστη δυνατή βελτίωση, η οποία εξαρτάται αποκλειστικά από τον χρήστη και την συνεπαγόμενη θέση του ως προς το RIS και το Object. Το δεύτερο κριτήριο έχει ομαδικό χαρακτήρα και αφορά την επιτυχία επίτευξης της μέγιστης δυνατής βελτίωσης , η οποία εξαρτάται από τα σχετικά εύρη γωνιών εισόδου/εξόδου στο RIS που καθορίζονται από την σχετική αζιμουθιακή θέση των χρηστών και των συσχετισμένων με αυτά Objects ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας των χρηστών.



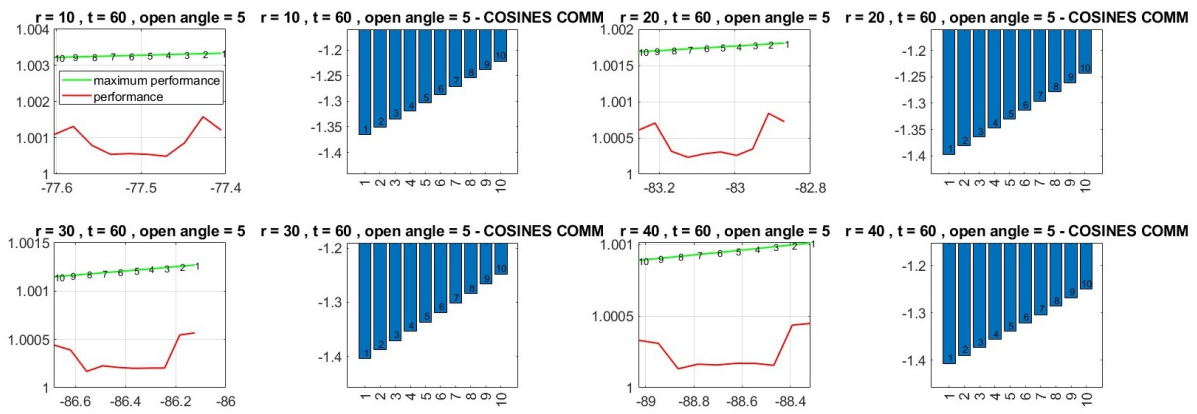
Σχήμα 4.30: Μεταβολή ακτίνας για γωνία αναφορά $\pi/6$ rad και γωνιακό εύρος κάλυψης $\pi/18$ rad



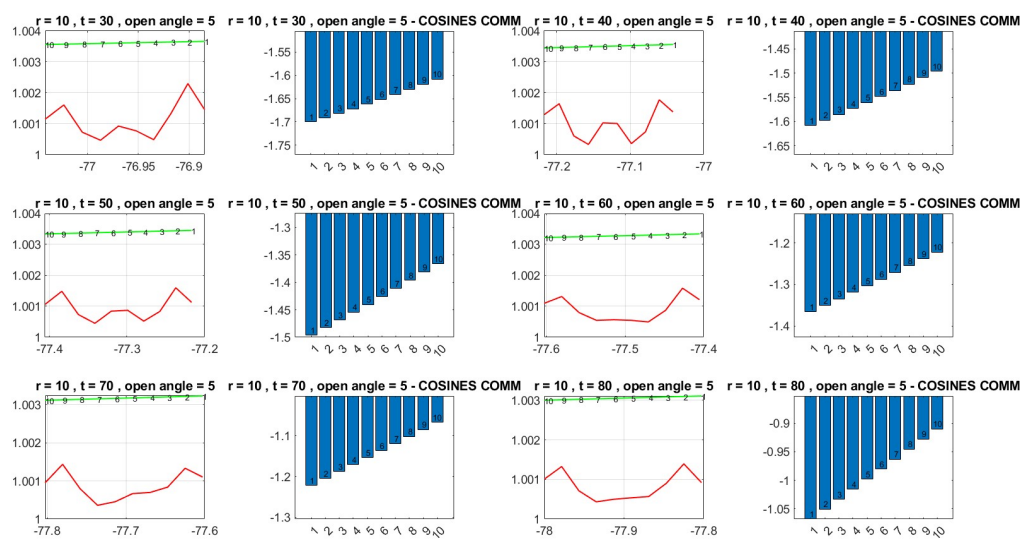
Σχήμα 4.31: Μεταβολή ακτίνας για γωνία αναφορά $2\pi/9$ rad και γωνιακό εύρος κάλυψης $\pi/18$ rad



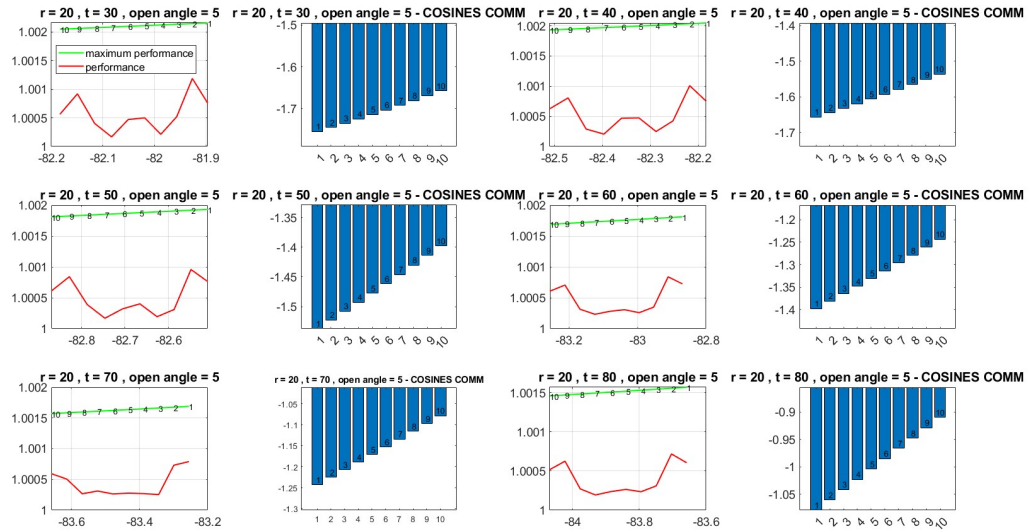
Σχήμα 4.32: Μεταβολή ακτίνας για γωνία αναφορά $5\pi/18$ rad και γωνιακό εύρος κάλυψης $\pi/18$ rad



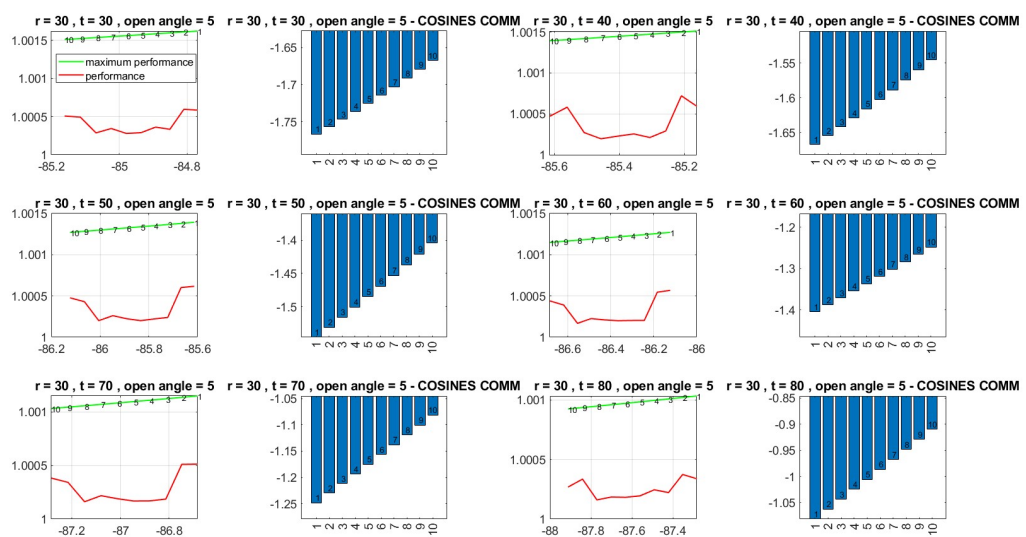
Σχήμα 4.33: Μεταβολή ακτίνας για γωνία αναφορά $\pi/3$ rad και γωνιακό εύρος κάλυψης $\pi/18$ rad



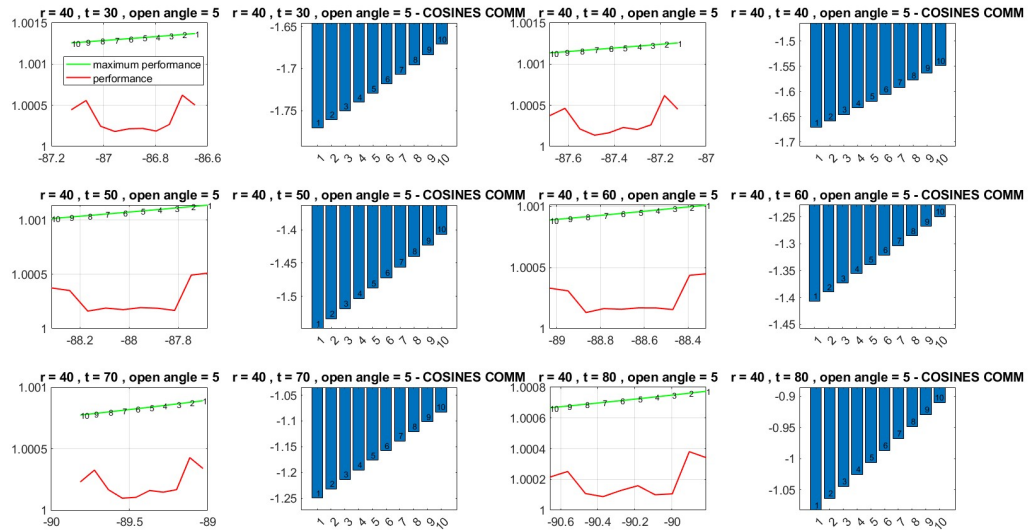
Σχήμα 4.34: Μεταβολή της γωνίας αναφοράς για σταθερή ακτίνα 10m και γωνιακό εύρος κάλυψης $\pi/18$ rad



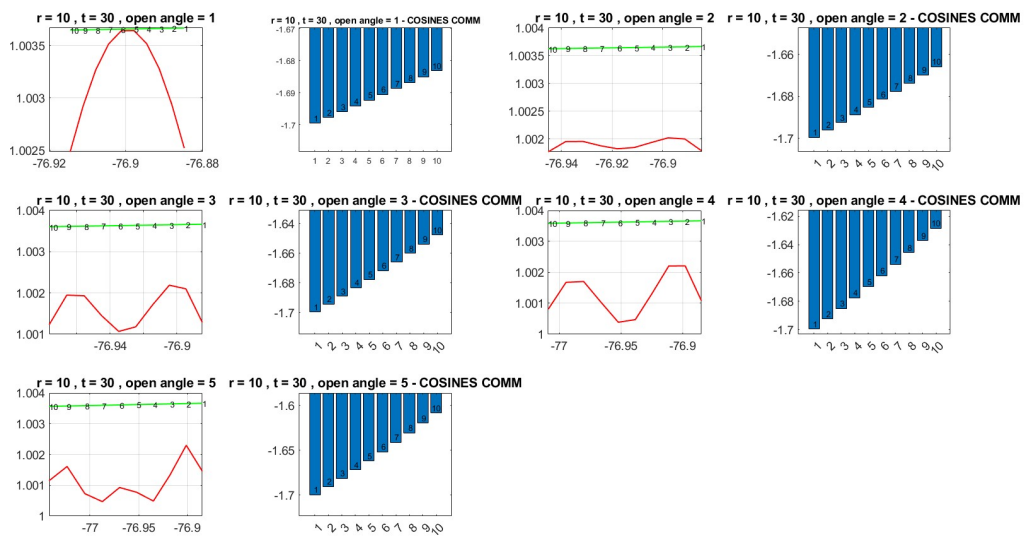
Σχήμα 4.35: εταβολή της γωνίας αναφοράς για σταθερή ακτίνα 20m και γωνιακό εύρος κάλυψης $\pi/18$ rad



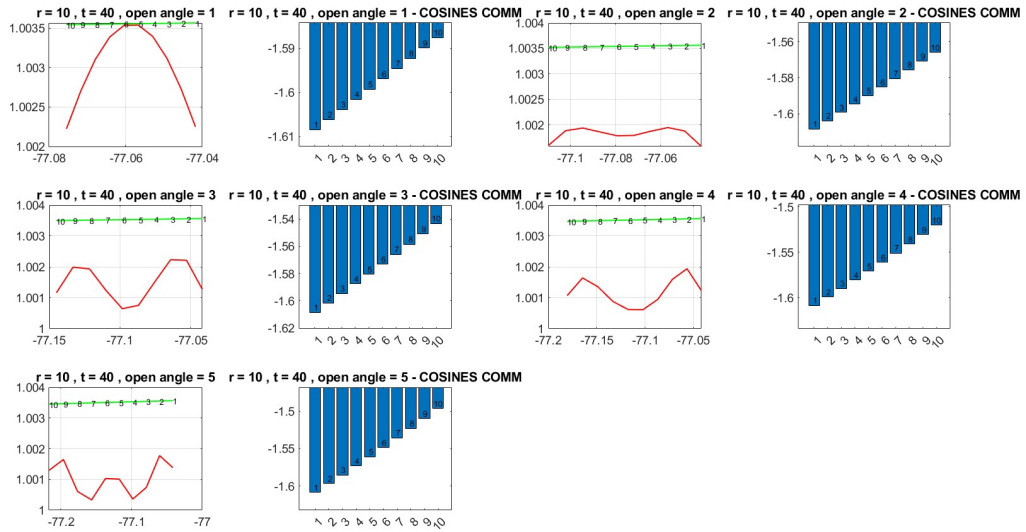
Σχήμα 4.36: εταβολή της γωνίας αναφοράς για σταθερή ακτίνα 30m και γωνιακό εύρος κάλυψης $\pi/18$ rad



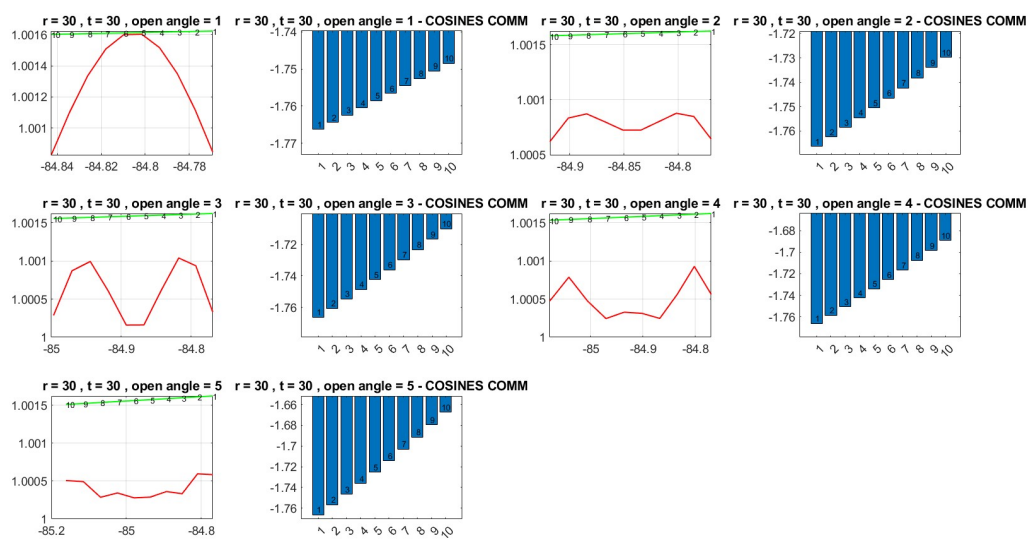
Σχήμα 4.37: εταβολή της γωνίας αναφοράς για σταθερή ακτίνα 40m και γωνιακό εύρος κάλυψης $\pi/18$ rad



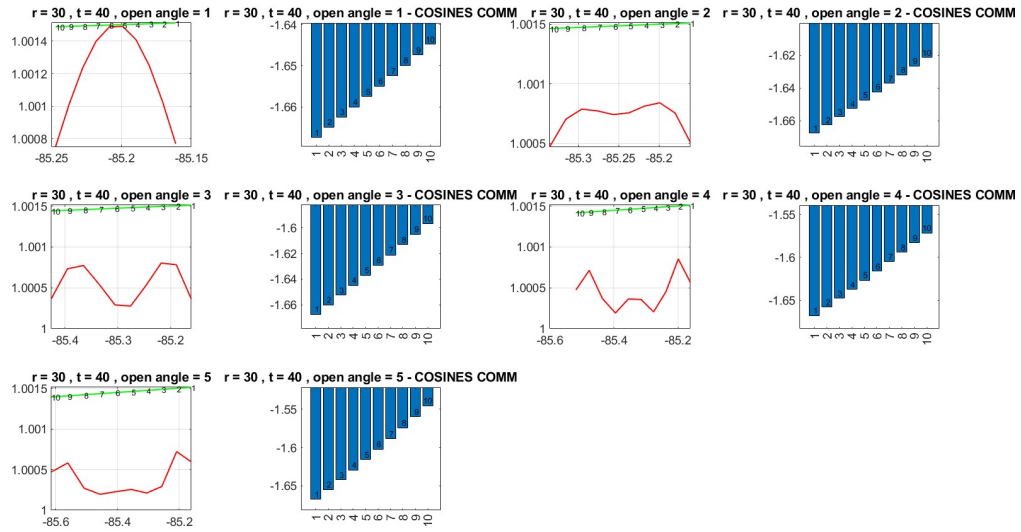
Σχήμα 4.38: Μεταβολή του γωνιακού εύρους κάλυψης για σταθερή ακτίνα 10m και γωνία αναφοράς $\pi/6$ rad



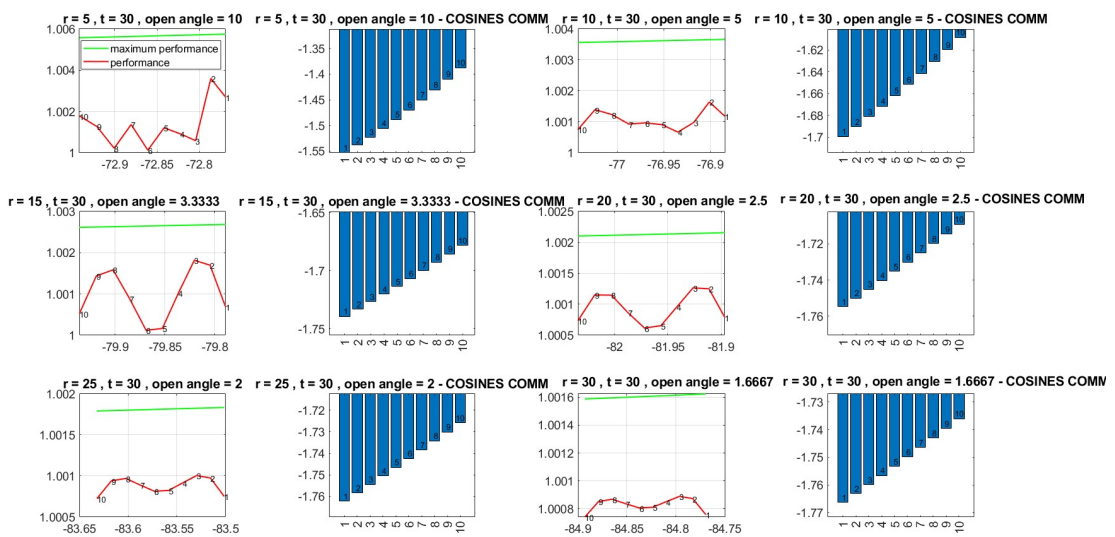
Σχήμα 4.39: Μεταβολή του γωνιακού εύρους κάλυψης για σταθερή ακτίνα 10m και γωνία αναφοράς $2\pi/9 \text{ rad}$



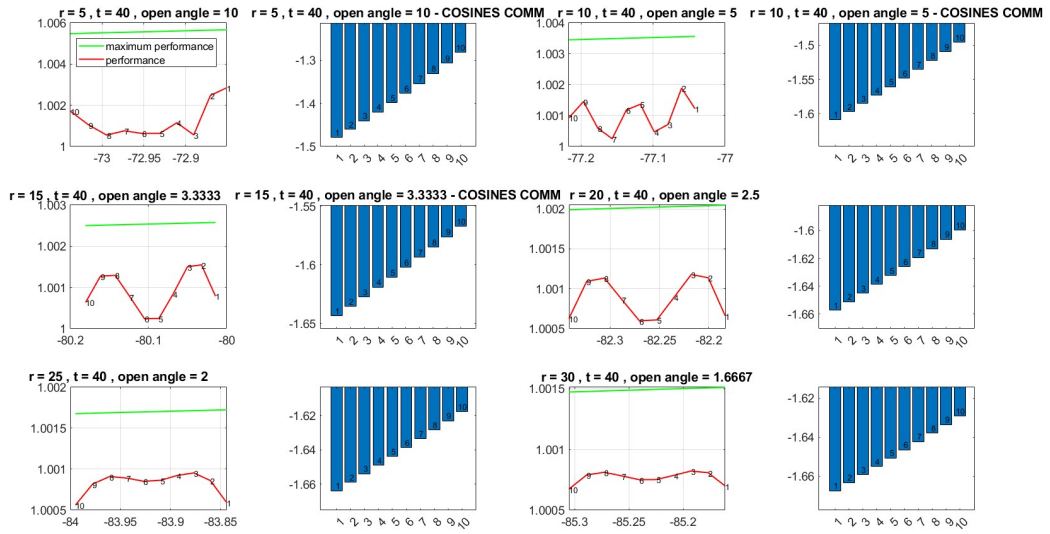
Σχήμα 4.40: Μεταβολή του γωνιακού εύρους κάλυψης για σταθερή ακτίνα 30m και γωνία αναφοράς $\pi/6 \text{ rad}$



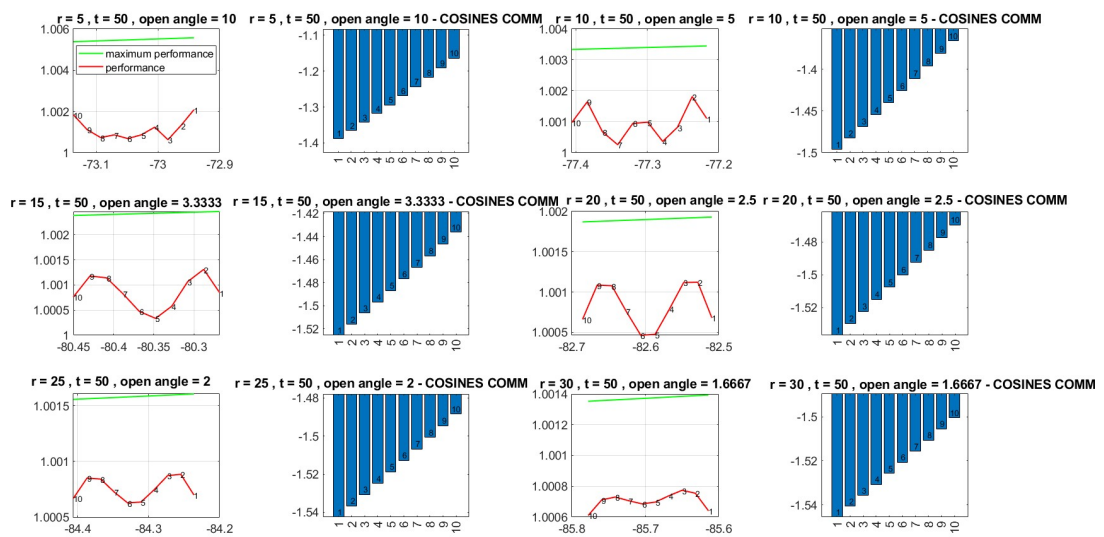
Σχήμα 4.41: Μεταβολή του γωνιακού εύρους κάλυψης για σταθερή ακτίνα 30m και γωνία αναφοράς $2\pi/9$ rad



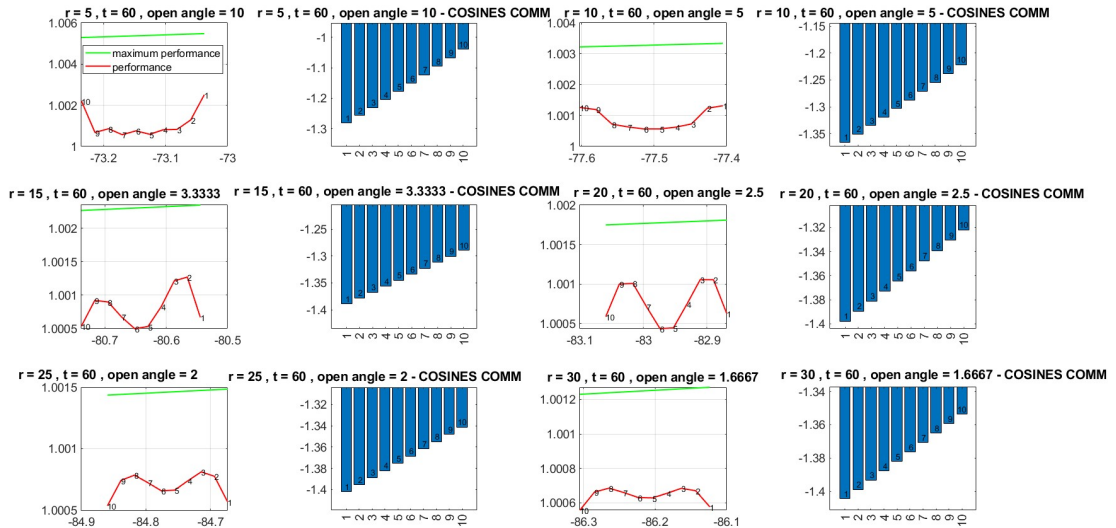
Σχήμα 4.42: Σταθερό μήκος τόξου $10\pi/9$ m για γωνία αναφοράς $\pi/6$ rad



Σχήμα 4.43: Σταθερό μήκος τόξου $10\pi/9m$ για γωνία αναφοράς $2\pi/9 \text{ rad}$



Σχήμα 4.44: Σταθερό μήκος τόξου $10\pi/9m$ για γωνία αναφοράς $5\pi/18 \text{ rad}$



Σχήμα 4.45: Σταθερό μήκος τόξου $10\pi/9m$ για γωνία αναφοράς $\pi/3 rad$

4.4 Προσομοίωση συστήματος με λόγο συσχέτισης χρηστών με RIS 1:N

Έχοντας περιγράψει το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορούμε να προχωρήσουμε σε μια σειρά προσομοιώσεων που χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες : η πρώτη αφορά χρήστες με ίδιο *individual improvement* αλλά διαφορετικές γωνίες εισόδου/εξόδου από το RIS με στόχο την μελέτη της επίδρασης των γωνιών αυτών στην βελτιστοποίηση και στην τελική βελτίωση που λαμβάνουν οι χρήστες. Η δεύτερη τώρα αφορά χρήστες με διαφορετικό *individual improvement* αλλά ίδιες γωνίες εισόδου/εξόδου από το RIS. Η περίπτωση αυτή είναι ισοδύναμη του Κεφάλαιο 4.1, καθώς ο πίνακας $\Omega^{(n)}$ είναι κοινός για όλους τους χρήστες, και έχει συνεπώς μελετηθεί. Τέλος, η τρίτη περίπτωση αφορά χρήστες που έχουν διαφορετικό *individual improvement* και ταυτόχρονα διαφορετικές γωνίες εισόδου/εξόδου από το RIS και αποτελεί την πλέον ρεαλιστική περίπτωση. Χρησιμοποιώντας την καλύτερη δυνατή τοπολογία βάση των αποτελεσμάτων του Κεφάλαιο 4.3.2, θα επιλέξουμε συνθήκες Path Loss και την ακόλουθη τοπολογία: RIS με συντεταγμένες (0,0,6) και άξονα παράλληλο στον Ox , Base Station με συντεταγμένες (-100,50,10), $N = 10$ χρήστες σε communication mode με ομοιόμορφη κατανομή στον κυκλικό τομέα με $10m \leq (\text{ακτίνα κάλυψης}) \leq 30m$ και $\pi/6 \leq (\text{αζιμουθιακή γωνία}) \leq 2\pi/9$ και ύψος χρήστη $1.5m$.

Στα Σχήματα 4.46-4.49 και 4.50-4.53 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης δύο διαφορετικών τοπολογιών που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία (ίδιο *individual improvement* αλλά διαφορετικές γωνίες εισόδου/εξόδου από το RIS). Να σημειώσουμε ότι όπως θα δούμε στο παρών κεφάλαιο, η τοπολογία που επιλέξαμε είναι από τις πλέον καλές ρεαλιστικές περιπτώσεις. Στα Σχήματα 4.46,4.50 παρουσιάζουμε στα αριστερά την *individual* και *total improvement* για κάθε χρήστη και στα δεξιά το $\cos(\gamma_{out}) - \cos(\gamma_{in})$ για κάθε χρήστη. Εδώ παρατηρούμε ότι παρόλο που εκ κατασκευής της τοπολογίας έχουμε εύρος τιμών $\cos(\gamma_{out}) - \cos(\gamma_{in})$ ίσο με 0.1 είναι ικανό να προκαλέσει από μόνο του σημαντικές μεταβολές στην βελτίωση, που παρέχεται στον κάθε χρήστη, μεταξύ των χρηστών και σημαντική απόκλιση από την μέγιστη δυνατή βελτίωση ανά χρήστη. Στα Σχήματα 4.47,4.51 παρουσιάζουμε ένα ιδιόμορφο διάγραμμα ακτινοβολίας που παρουσιάζει την βελτίωση αν χρησιμοποιήσουμε ως μετρική το Mutual Information (υποθετικό σενάριο σενσιנג μοδε έχοντας ως δεδομένα τα $\cos(\gamma_{out}) - \cos(\gamma_{in})$ και το Path Loss χωρίς να έχουμε υπόψιν την τοπολογία) συναρτήσε του $\cos(\gamma_{out}) - \cos(\gamma_{in})$. Στα Σχήματα 4.48,4.52 παρουσιάζουμε ένα ιδιόμορφο

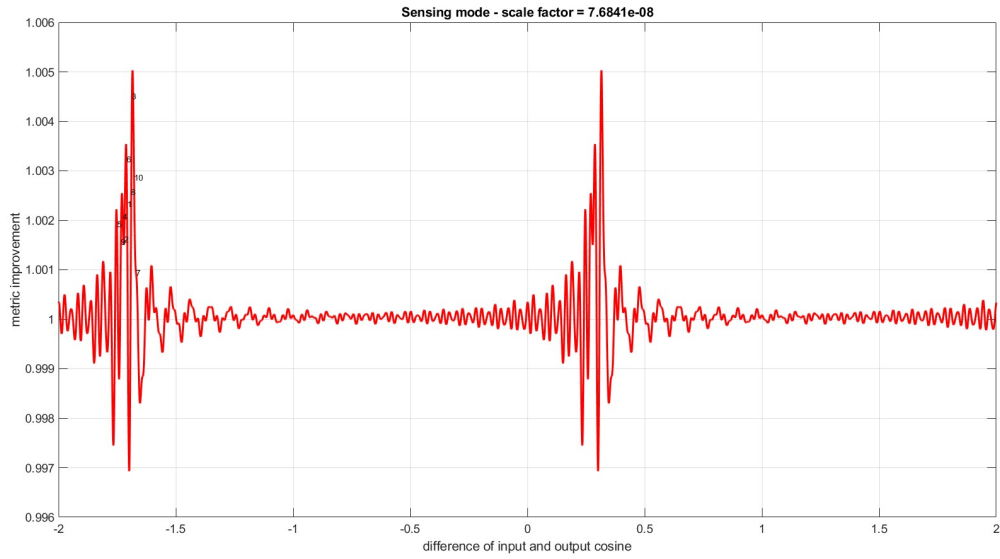
διάγραμμα ακτινοβολίας που παρουσιάζει την βελτίωση αν χρησιμοποιήσουμε ως μετρική το Bit Rate (που αντιστοιχεί ρεαλιστικά στην προσομοίωση) συναρτήσεως του $\cos(\gamma_{out}) - \cos(\gamma_{in})$. Όπως μπορούμε να δούμε στα Σχήματα 4.47,4.48,4.51,4.52 διαπιστώνουμε

- την δημιουργία των δεσμών (beams) αυξημένης βελτίωσης, οι οποίες έχουν μικρότερο εύρος σε σχέση με τους κύριους λοβούς στα Σχήματα 4.13,4.14 (προσαρμογή στα σημεία ενδιαφέροντος),
- έντονες μεταβολές στην βελτίωση για σημεία με κοντινές τιμές $\cos(\gamma_{out}) - \cos(\gamma_{in})$ και
- τον αμφίδρομο χαρακτήρα της βελτίωσης : δηλαδή η βελτίωση είναι ίδια τόσο για $\cos(\gamma_{out}) - \cos(\gamma_{in})$ ($UE \rightarrow Object$) όσο και για $\cos(\gamma_{out}) - \cos(\gamma_{in})$ ($Object \rightarrow UE$).

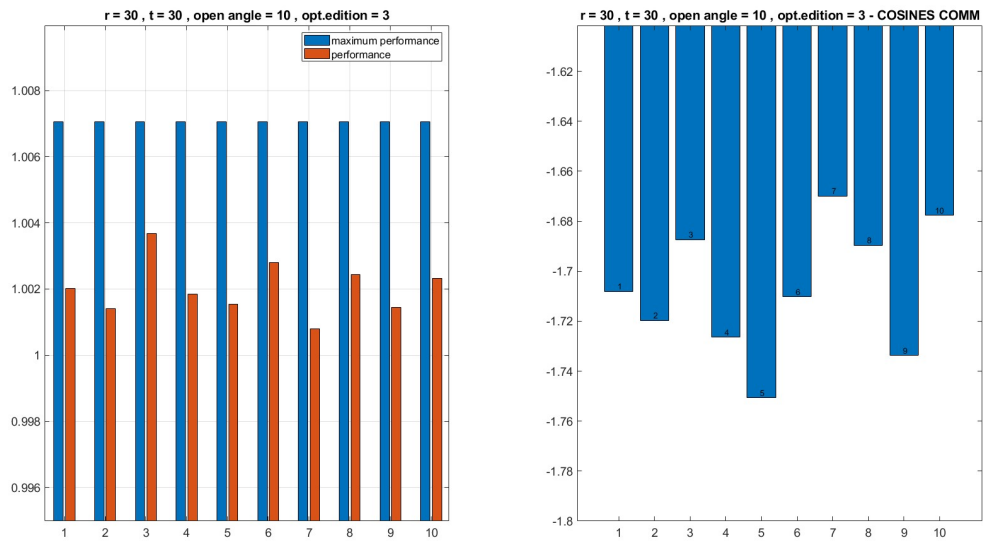
Τέλος, στα Σχήματα 4.49,4.53 παρουσιάζονται οι διαφορές βελτίωσης μεταξύ των δύο καταστάσεων λειτουργίας συναρτήσεως του $\cos(\gamma_{out}) - \cos(\gamma_{in})$. Αξίζει να παρατηρήσουμε σε συνδυασμό με το Σχήμα 4.15 ότι ακόμα για ίδιες τιμές Path Loss μεταξύ των καναλιών ίδιας ποιότητας, όσο μειώνονται οι τιμές αυτές τόσο μικρότερες είναι οι διαφορές μεταξύ των βελτιώσεων των καταστάσεων λειτουργίας.

Στα Σχήματα 4.54-4.55 και 4.56-4.57 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης δύο διαφορετικών τοπολογιών που ανήκουν στην τρίτη κατηγορία (διαφορετικό *individual improvement* και διαφορετικές γωνίες εισόδου/εξόδου από το RIS). Στα Σχήματα 4.54,4.56 παρουσιάζουμε στα αριστερά την *individual* και *total improvement* για κάθε χρήστη συναρτήσεως της παραμέτρου $(Path Loss direct)(dB) - (Path Loss reflect)(dB)$ και στα δεξιά το $\cos(\gamma_{out}) - \cos(\gamma_{in})$ για κάθε χρήστη. Αν αναλύσουμε έναστος σχήμα μπορούμε να μελετήσουμε ακριβώς τον τρόπο που λειτουργεί η βελτιστοποίηση : προσπαθεί να βρει την ομάδα χρηστών που έχουν μικρές διαφορές $\cos(\gamma_{out}) - \cos(\gamma_{in})$ ανά μεταξύ τους και ταυτόχρονα το άθροισμα των βελτιώσεων τους είναι μεγαλύτερο από οποιαδήποτε άλλη ομάδα χρηστών, που κάθε ομάδα έχει στοιχεία με μικρές διαφορές ανά μεταξύ τους. Όσο μεγαλύτερος ο πληθυσμός της επικρατούσας ομάδας τόσο καλύτερο το συνολικό αποτέλεσμα. Επιπλέον, στα Σχήματα 4.55,4.57 παρουσιάζουμε ξανά την *individual* και *total improvement* για κάθε χρήστη συναρτήσεως της παραμέτρου $(Path Loss direct)(dB) - (Path Loss reflect)(dB)$ αυτή τη φορά όμως συγκριτικά με το constraint (μαύρο) που θέσαμε στην διαδικασία βελτιστοποίησης. Στις ίδιες γραφικές παρουσιάζεται με γαλάζιο χρώμα ένα υποψήφιο constraint που δοκιμάσαμε χωρίς επιτυχία σιγμοειδής μορφή όπως αυτό που προτάθηκε για τις υποψήφιες συναρτήσεις βελτιστοποίησης f_1, f_2 . Παρατηρούμε ότι παρόλο που θέσαμε τον περιορισμό δεν επιτεύχθηκε για όλους τους χρήστες και σε αρκετές περιπτώσεις απείχαμε αρκετά από την μέγιστη δυνατή βελτίωση ,γεγονός που δείχνει πόσο δύσκολο είναι να βελτιστοποιήσεις τις δέσμες αυξημένης βελτίωσης μιας εντόνως κατευθυντικής στοιχειοκεραίας όπως το RIS ακόμα και για αζιμουθιακό άνοιγμα δέκα μοιρών.

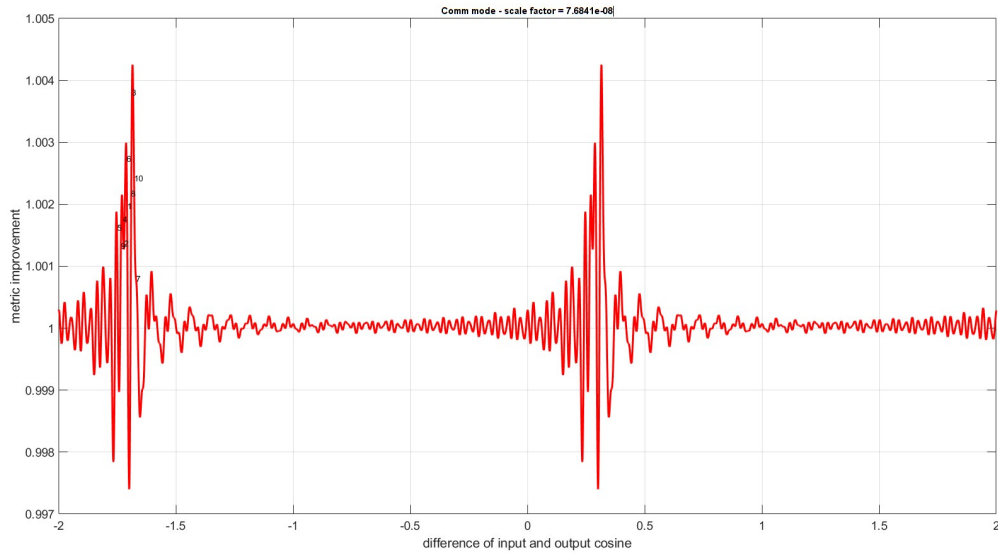
Ολοκληρώνοντας το παρόν μέρος αξίζει να επισημάνουμε για πιο λόγο χρησιμοποιήσαμε αποκλειστικά χρήστες σε communication mode. Αρχικά, η χρήση της μετρικής Mutual Information δεν έγινε προς προσομοίωση του sensing mode αλλά προς μελέτη της διαφορετικής συμπεριφοράς των δύο μετρικών προς ίσιο όρισμα. Στην περίπτωση του communication mode είχαμε κοινό γ_{out} για όλους τους χρήστες και γ_{in} εντός καθορισμένων τιμών. Στην περίπτωση προσομοίωσης χρηστών σε sensing mode αποκλειστικά ή και σε συνδυασμό των δύο καταστάσεων λειτουργίας τότε το γ_{out} θα μπορούσε να λάβει οποιαδήποτε τιμή εντός του ορίου προδιαγραφής λειτουργίας του RIS και συνεπώς το εύρος τιμών του $\cos(\gamma_{out}) - \cos(\gamma_{in})$ δύναται να είναι το μέγιστο δυνατό αναίρωντας επομένως τον περιορισμό που πέτυχαμε μέσω τομεοποίησης.



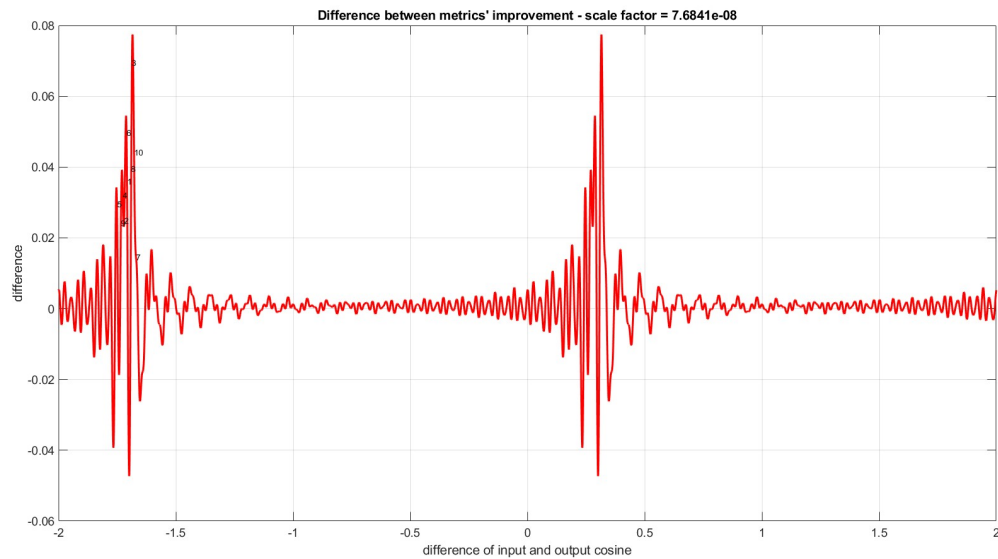
Σχήμα 4.47: Διάγραμμα βελτίωσης για μετρική Mutual Information συναρτήσει της διαφορά γωνιών εισόδου/εξόδου από το RIS (προσομοίωση ίδιου *individual improvement A/A 1*)



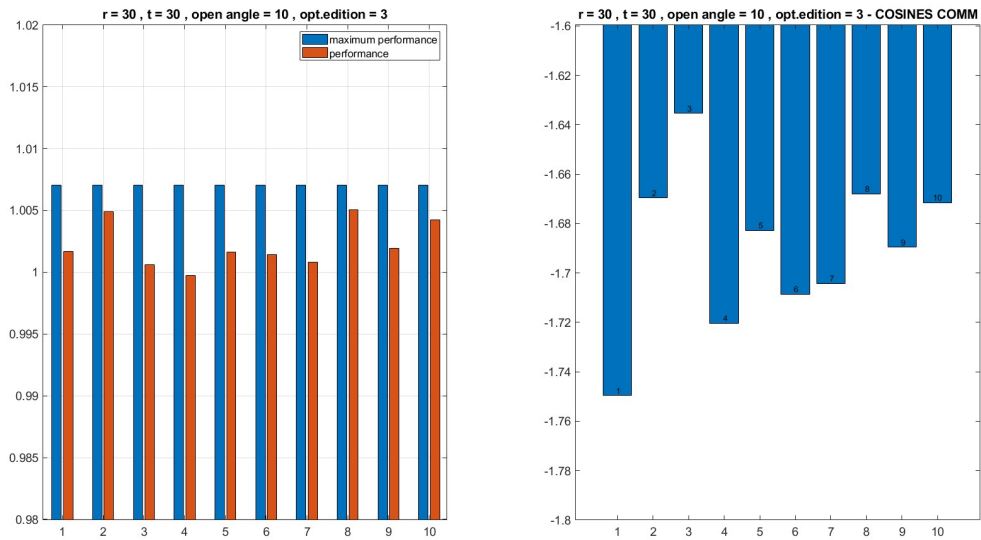
Σχήμα 4.46: Σύγκριση *individual* και *total* βελτίωσης καθώς και διαφορά γωνιών εισόδου/εξόδου από το RIS για κάθε χρήστη (προσομοίωση ίδιου *individual improvement A/A 1*)



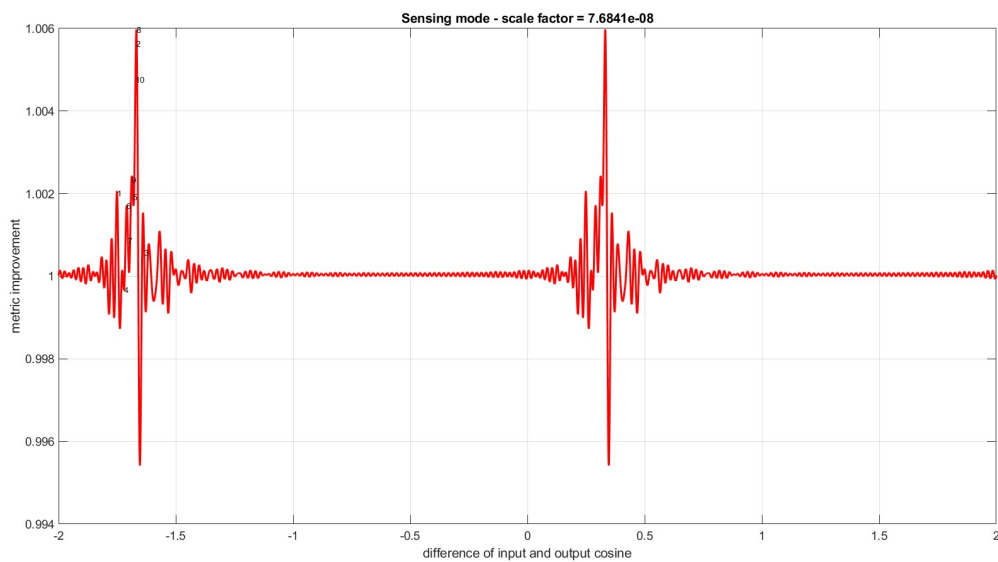
Σχήμα 4.48: Διάγραμμα βελτίωσης για μετρική Bit Rate συναρτήσει της διαφορά γωνιών εισόδου/εξόδου από το RIS (προσομοίωση ίδιου *individual improvement A/A 1*)



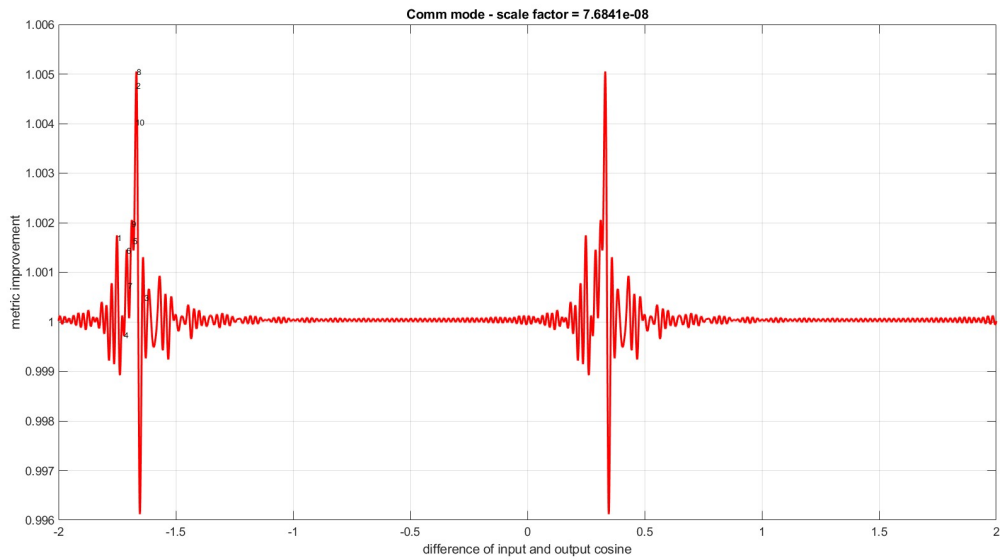
Σχήμα 4.49: Διάγραμμα διαφοράς βελτιώσεων (%) για χρήση των δύο διαφορετικών μετρικών συναρτήσει της διαφοράς γωνιών εισόδου/εξόδου από το RIS (προσομοίωση ίδιου *individual improvement A/A 1*)



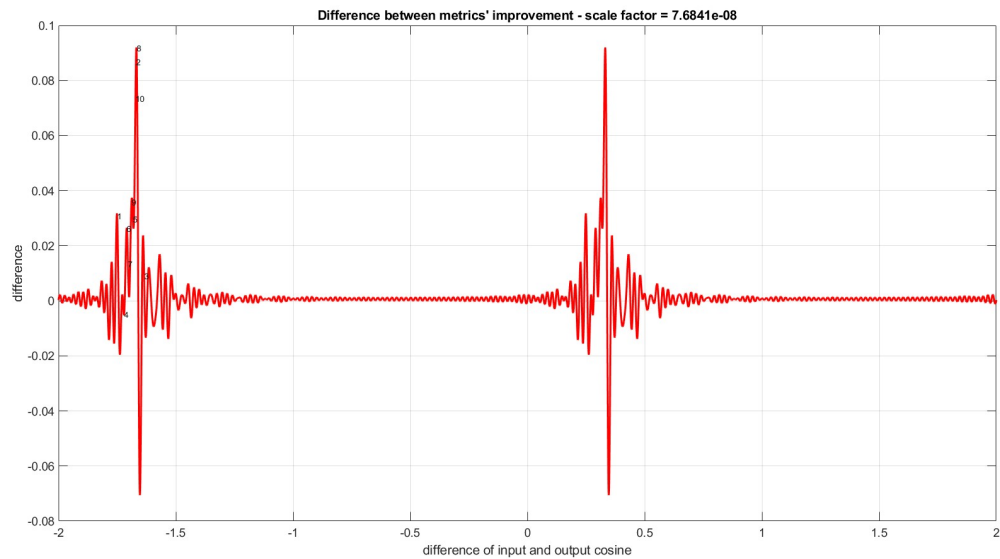
Σχήμα 4.50: Σύγκριση *individual* και *total* βελτίωσης καθώς και διαφορά γωνιών εισόδου/εξόδου από το RIS για κάθε χρήστη (προσομοίωση ίδιου *individual improvement A/A 2*)



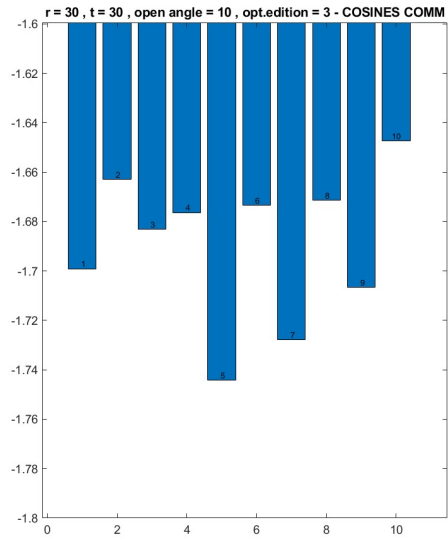
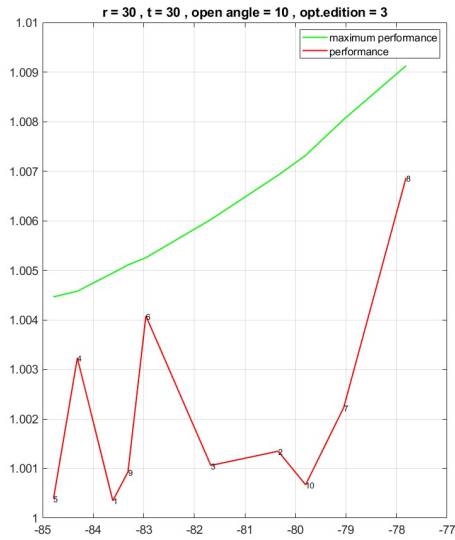
Σχήμα 4.51: Διάγραμμα βελτίωσης για μετρική Mutual Information συναρτήσει της διαφοράς γωνιών εισόδου/εξόδου από το RIS (προσομοίωση ίδιου *individual improvement A/A 2*)



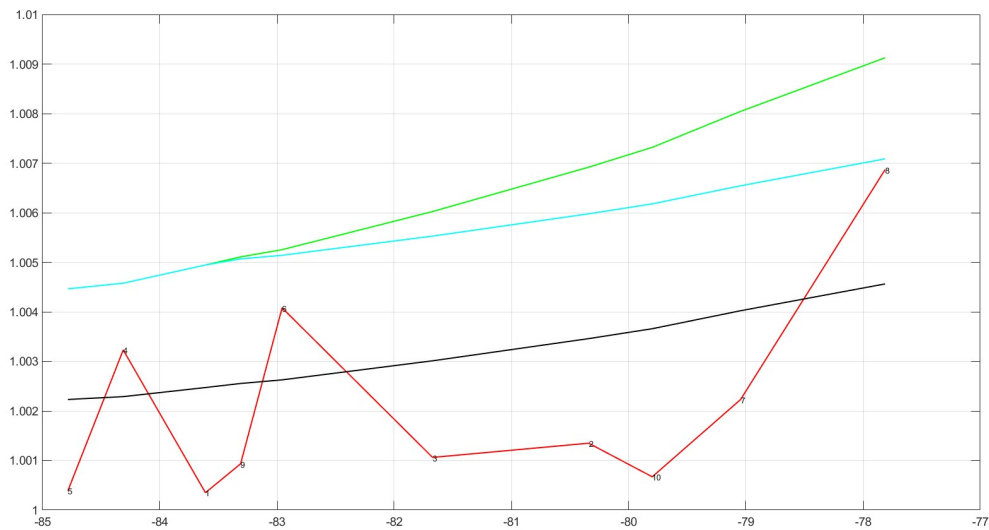
Σχήμα 4.52: Διάγραμμα βελτίωσης για μετρική Bit Rate συναρτήσει της διαφορά γωνιών εισόδου/εξόδου από το RIS (προσομοίωση ίδιου *individual improvement A/A 2*)



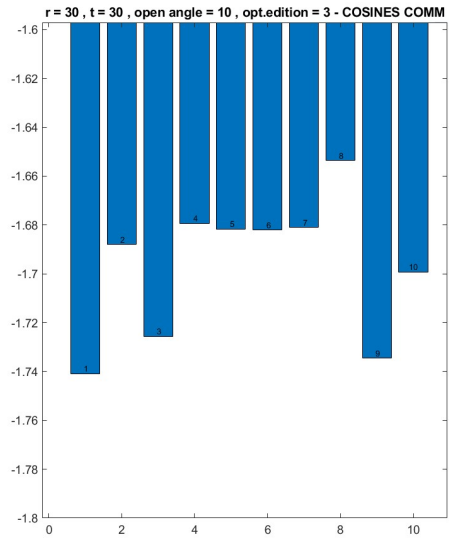
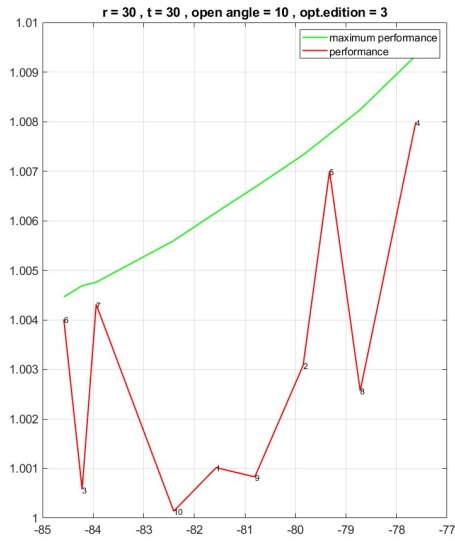
Σχήμα 4.53: Διάγραμμα διαφοράς βελτιώσεων (%) για χρήση των δύο διαφορετικών μετρικών συναρτήσει της διαφοράς γωνιών εισόδου/εξόδου από το RIS (προσομοίωση ίδιου *individual improvement A/A 2*)



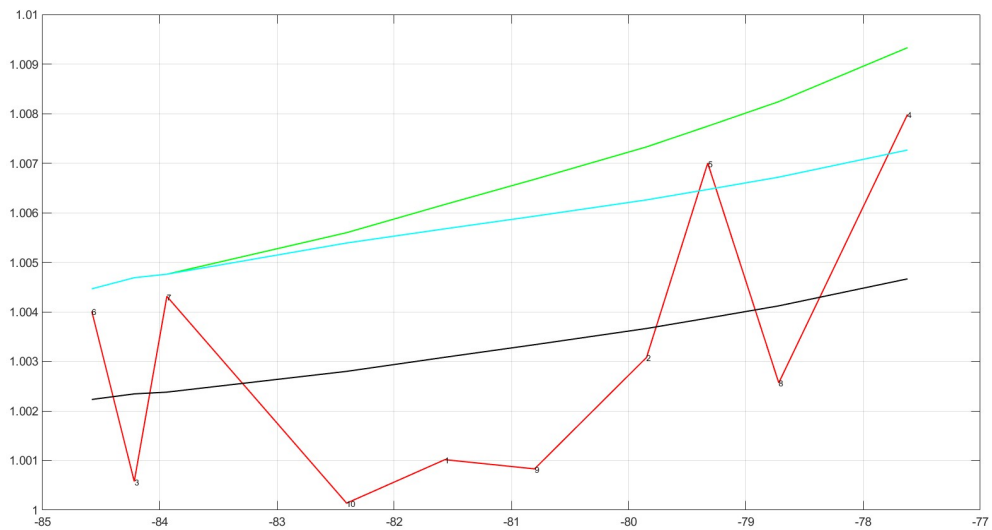
Σχήμα 4.54: Σύγκριση *individual* και *total* βελτίωσης καθώς και διαφοράς γωνιών εισόδου/εξόδου από το RIS για κάθε χρήστη (προσομοίωση διαφορετικού *individual improvement* A/A 1)



Σχήμα 4.55: Σύγκριση *individual* και *total* βελτίωσης και παρουσίαση της τιμής του constraint για κάθε χρήστη (προσομοίωση διαφορετικού *individual improvement* A/A 1)



Σχήμα 4.56: Σύγκριση *individual* και *total* βελτίωσης καθώς και διαφοράς γωνιών εισόδου/εξόδου από το RIS για κάθε χρήστη (προσομοίωση διαφορετικού *individual improvement* A/A 2)



Σχήμα 4.57: Σύγκριση *individual* και *total* βελτίωσης και παρουσίαση της τιμής του constraint για κάθε χρήστη (προσομοίωση διαφορετικού *individual improvement* A/A 2)

4.5 Βελτιστοποίηση τοπολογίας των RIS βάσει προδιαγραφών

Όπως μελετήσαμε στο Κεφάλαιο 4.3.2 οι σχετικές αποστάσεις μεταξύ UE, RIS και Object επηρεάζουν κομβικά την μέγιστη δυνατή βελτίωση που μπορεί να παρασχεθεί με χρήση RIS. Ταυτόχρονα οι σχετικές αζιμουθιακές αποστάσεις ως προς το RIS μεταξύ των χρηστών και μεταξύ των συσχετισμένων Οβθετς καθορίζουν το πόσο καλά θα προσεγγιστεί αυτή η μέγιστη βελτίωση. Με βάση τα παραπάνω είναι εμφανές ότι η επιλογή του συνολικού αριθμού των RIS, η τοποθέτηση των RIS εντός της περιοχής κάλυψης και ο ταυτόχρονος προσδιορισμός των πεδίων κάλυψης τους είναι κρίσιμος για την συνολική απόδοση του συστήματος. Ως εκ τούτου κρίνεται αναγκαίος ο σχεδιασμός ενός αλγορίθμου εύρεσης της βέλτιστης τοποθέτησης RIS ώστε να επιτευχθεί το απαιτούμενο ποσοστό κάλυψης της επιθυμητής περιοχής.

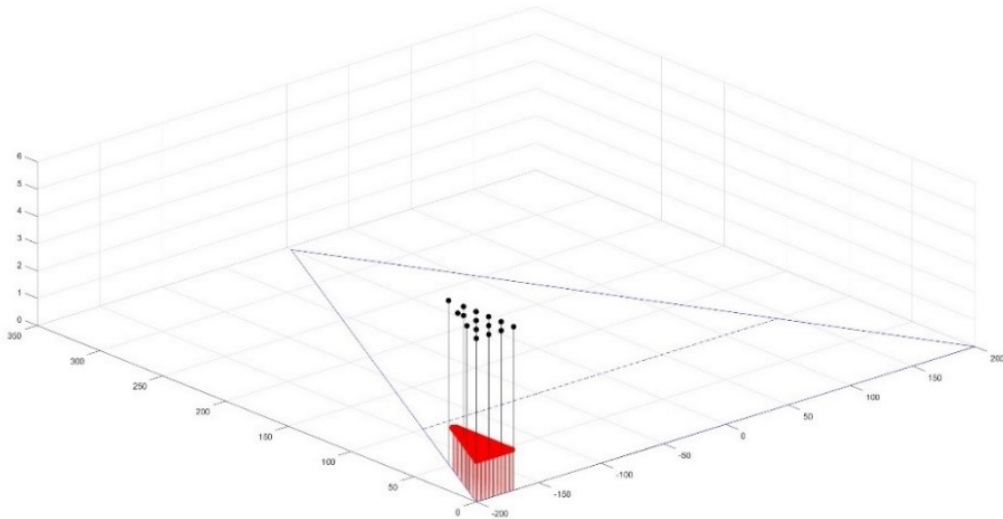
Καταρχάς, ο αλγόριθμος λαμβάνει ως είσοδο το μέγιστο πλήθος RIS, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, την επιθυμητή περιοχή κάλυψης, την θέση του Base Station και τις θέσεις, στις οποίες δύναται να τοποθετηθούν RIS. Με τον όρο θέσεις αναφερόμαστε τόσο στις τοπολογικές συντεταγμένες όσο και στις πιθανές κατευθύνσεις του άξονα του RIS και στο μέγιστο αζιμουθιακό εύρος κάλυψης τους. Έτσι, προκύπτει ένας πίνακας με όνομα (*RIS possible topology*) στον οποίο περιλαμβάνεται για κάθε επιτρεπτή θέση RIS όλα τα χαρακτηριστικά της. Στη συνέχεια, θα ελέγχει ποιες πιθανές θέσεις για τοποθέτηση RIS «βλέπουν» το Base Station εντός του κατασκευαστικά προδιαγραφόμενου αζιμουθιακού εύρους. Έπειτα, ορίζουμε την πυκνότητα χρηστών ανά m^2 και με βάση αυτή χωρίζουμε την περιοχή κάλυψης σε μικρότερα ισοεμβαδικά τμήματα (θεωρούμε ομοιόμορφη κατανομή χρηστών εντός της περιοχής κάλυψης) ώστε εντός ενός εξ αυτών να βρίσκεται ένα υποθετικός UE. Οι συντεταγμένες των θέσεων των UE ορίζονται στον πίνακα (*UE topology*). Έπειτα, ορίζουμε ένα πίνακα (*coverage area*) όπου κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε κάθε επιτρεπτή θέση RIS και κάθε στήλη σε κάθε μια θέση UE. Ο πίνακας αυτός είναι δυαδικός και στην θέση (i, j) του πίνακα έχει την τιμή 1 αν η θέση UE με A/A j βρίσκεται εντός των προδιαγραφών κάλυψης του RIS με A/A i . Εν συνεχεία ορίζουμε για κάθε RIS με A/A i έναν δυαδικό συντελεστή (βάρος) w_i , ο οποίος δείχνει αν πρόκειται το i -οστό RIS να χρησιμοποιηθεί. Τέλος ορίζουμε το βασικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο ανήκει στην κατηγορία των Ακεραίων Γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης (Integer Linear Programming).

$$\begin{aligned} \max_{\bar{w}} \quad & \text{nonzeros} \left(\sum_{i=1}^R w_i \cdot (\text{coverage area})^{(i)} \right) \\ \text{s.t.} \quad & \bar{w}(i, 1) = w_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \{1, \dots, R\} \\ & \sum_{i=1}^R w_i \leq R_{max} \end{aligned} \quad (4.25)$$

όπου R το πλήθος των επιτρεπτών θέσεων των RIS, R_{max} το μέγιστο πλήθος RIS που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, $(\text{coverage area})^{(i)}$ η i -οστή γραμμή του πίνακα (*coverage area*) και με *nonzeros* συμβολίζουμε την συνάρτηση που επιστρέφει το πλήθος των μη μηδενικών στοιχείων του πίνακα που δέχεται ως όρισμα, το οποίο αντικατοπτρίζει το πλήθος των θέσεων των UE που βρίσκονται στην περιοχή κάλυψης ενός τουλάχιστον RIS. Όπως αναφέραμε και παραπάνω η άνωθεν διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης στοχεύει στην εύρεση των θέσεων κάλυψης για δεδομένο πλήθος RIS που καλύπτουν μεγαλύτερο εύρος κάλυψης. Αν θέλουμε δεδομένο ποσοστό κάλυψης μπορούμε να εισάγουμε τον επιπλέον περιορισμό :

$$\text{ones}_{1 \times N} \cdot (\text{coverage area})^T \cdot \bar{w} \geq (\text{percentage of coverage}) \quad (4.26)$$

όπου $\text{ones}_{1 \times N}$ πίνακας διαστάσεων $1 \times N$ με όλα τα στοιχεία του ίσα με 1, $(\text{coverage area})^T$ ο ανάστροφος πίνακας (*coverage area*) και \bar{w} ο πίνακας με τα δυαδικά βάρη που έχουμε θέσει.

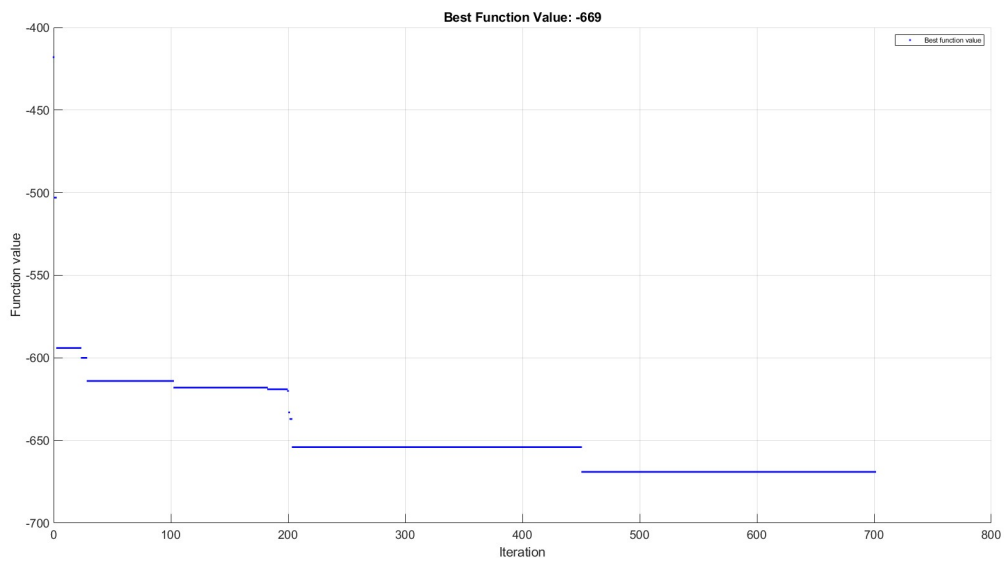


Σχήμα 4.58: Περιοχή προς βέλτιστη τοποθέτηση RIS. Τομέας κυψέλης προς μελέτη (μπλε), περιοχή κάλυψης (κόκκινο), πιθανές θέσεις RIS (μαύρο)

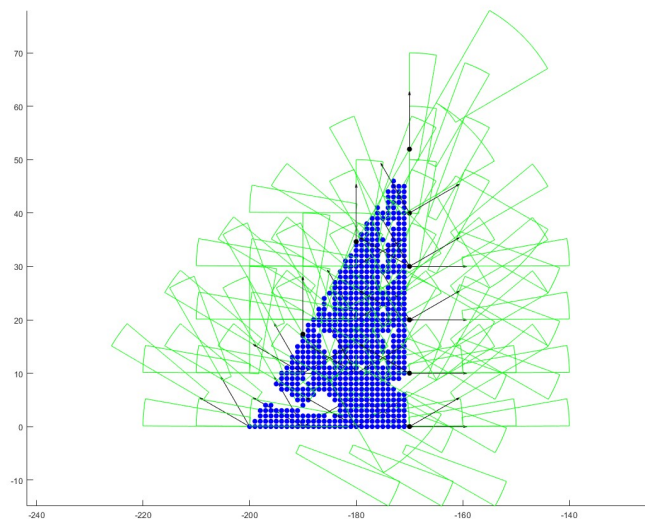
Κινούμενοι σε ίδια τοπολογία προσομοίωσης με το Κεφάλαιο 4.1.2 , επιλέγουμε να βελτιστοποιήσουμε την περιοχή κάλυψης ενός από τους 6 τομείς μιας μικρο-κυψέλης ακτίνας $400m$, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 63. Η περιοχή αυτή βρίσκεται στην μεγαλύτερη απόσταση από τον Base Station και επομένως θέλουμε να βελτιώσουμε την απόδοση των εκεί χρηστών. Ακόμα, θεωρούμε πυκνότητα χρηστών $1 UE/m^2$, η οποία αντιστοιχεί στην προβλεπόμενη πυκνότητα χρηστών στο 5G, και πιθανές θέσεις RIS ως εξής :

- Ανά $10m$ (ενδεικτικό μήκος ενός κτηρίου ή απόστασης μεταξύ στύλων φωτισμού) στον οριζόντιο άξονα και στον κατακόρυφο εντός κυψέλες μπορούμε να τοποθετήσουμε RIS με πιθανές θέσεις άξονα, που περιγράφονται από την αζιμουθιακή γωνία με την ημιευθεία Ox σε ωρολογιακή φορά, $\{0, \pi/3, \pi/2, 2\pi/3\}$, εύρος κάλυψης είτε $[\pi/6, 2\pi/9]$ είτε $[7\pi/9, 5\pi/6]$, και ακτίνα κάλυψης $[10m, 30m]$
- Στα όρια της κυψέλης (ευθεία μεταξύ σημείων $(-200, 0)$ και $(0, 346.41)$ στο οριζόντιο επίπεδο στο Σχήμα 63) ανά $10m$ οριζόντια απόσταση μπορούμε να τοποθετήσουμε RIS με άξονα κάθετο στην ημιευθεία Ox σε γωνία $3\pi/2$ ως προς αυτή με ωρολογιακή φορά, εύρος κάλυψης είτε $[\pi//6, \pi//3]$ είτε $[2\pi//3, 5\pi//6]$, και ακτίνα κάλυψης $[10m, 30m]$

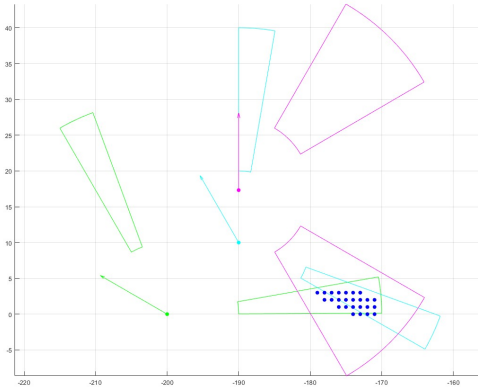
Στην πρώτη ομάδα RIS δώσαμε το πλεονέκτημα του μικρού αζιμουθιακού εύρους κάλυψης σε σχέση με την δεύτερη ομάδα όμως από την άλλη η δεύτερη ομάδα έχει εξασφαλισμένη την τοπολογία καλύτερου τριγώνου UE-RIS-Object όπως αναφέραμε στο Κεφάλαιο 4.3.2 σε σχέση με την πρώτη ομάδα που δεν εξασφαλίζει απαραίτητα το βέλτιστο τρίγωνο. Συνολικά, υπάρχουν 771 πιθανές θέσεις χρηστών εντός της επιθυμητής περιοχής κάλυψης και με συνολικά 50 RIS επιτυγχάνουμε ποσοστό κάλυψης 86,77% (Σχήμα 64-65). Να επισημάνουμε πως στην διαδικασία βελτιστοποίησης επιλέξαμε την βασική εκδοχή του προβλήματος χωρίς την προσθήκη επιπλέον περιορισμών. Επιπλέον, με γνώμονα το Κεφάλαιο 4.6, στο οποίο θέλουμε να μελετήσουμε αλγόριθμο ανάθεσης χρηστών σε RIS, βρίσκουμε ένα μέρος της τοπολογίας που ένα πλήθος RIS καλύπτουν ταυτόχρονα την ίδια περιοχή (Σχήμα 66). Ειδικότερα, έχουμε ένα RIS της δεύτερης κατηγορίας (ροζ χρώμα) και 2 RISs της πρώτης κατηγορίας (γαλάζιο και πράσινο χρώμα) καθώς και 25 χρήστες που βρίσκονται στην περιοχή κάλυψης και των τριών RISs.



Σχήμα 4.59: Διαδικασία επίλυσης προβλήματος αέρας γραμμικής βελτιστοποίησης για βέλτιστη τοποθέτηση RIS



Σχήμα 4.60: Βέλτιστη επιλογή θέσεων RIS για κάλυψη της περιοχής μελέτης



Σχήμα 4.61: Περιοχή προς μελέτη στο Κεφάλαιο 4.6. Με βέλη παρουσιάζονται οι θέσεις των RIS, οι κατευθύνσεις των αξόνων τους και με ίδιο χρωματικό κώδικα (πράσινο, γαλάζιο, ροζ) οι περιοχές κάλυψης. Με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι χρήστες.

4.6 Μελέτη αλγορίθμου Automata Learning για σύστημα συσχέτιση χρηστών με RIS R:N

Στο παρόν μέρος πρόκειται να κατασκευάσουμε έναν automata learning αλγόριθμο για συσχέτιση χρηστών με RIS. Όπως αναφέραμε και στο Κεφάλαιο 4.5 έχουμε καταλήξει σε μια ενδεικτική τοπολογία, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4.61 και αποτελείται από $N = 25$ χρήστες, $R = 3$ RISs και λαμβάνουμε υπόψιν μόνο Path Loss φαινόμενα. Καθένας χρήστης μπορεί να βρίσκεται είτε σε communication είτε σε sensing mode (για την προσομοίωση η επιλογή έγινε με τυχαίο τρόπο). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με χρήση automata learning πρόκειται να συγκριθούν με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από συσχέτιση χρηστών με RIS βάσει επιλογής καλύτερου σηματοθυροβικού λόγου (SNR). Πιο συγκεκριμένα, επιλογή βάσει SNR σημαίνει ότι, ο χρήστης επιλέγει το RIS, το οποίο του δίνει καλύτερο SNR στο μονοπάτι από ανάκλαση με συνθήκες διαλείψεων μεγάλης κλίμακας. Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε η παραπάνω διαδικασία επιλογής στοχεύει στην ικανοποίηση του πρώτου κριτηρίου όπως διατυπώθηκε στο Κεφάλαιο 4.3.2, δηλαδή στην μέγιστη τιμή της μέγιστης επιτεύξιμης βελτίωσης της απόδοσης ενός χρήστη δεδομένης της τοπολογίας των RISs. Με την εφαρμογή του αλγορίθμου automata learning στοχεύουμε σε μια βέλτιστη από κοινού ικανοποίηση τόσο του προαναφερθέντος κριτηρίου όσο και του κριτηρίου ομαδικού χαρακτήρα που αφορά το εύρος τιμών της διαφοράς γωνιών εξόδου / εισόδου από το RIS και επηρεάζει καθοριστικά την επίτευξη της μέγιστης επιτεύξιμης τιμής.

Τα Σχήματα 4.62-4.66 αφορούν στην απόδοση του συστήματος με συσχέτιση βάση SNR : στο Σχήμα 4.62 παρουσιάζουμε στα αριστερά την *individual* και *totalimprovement* για κάθε χρήστη συναρτήσει της παραμέτρου $(Path Loss direct)(dB) - (Path Loss reflect)(dB)$ βάσει του RIS με το οποίο έχει συσχετιστεί, στο Σχήμα 4.63 παρουσιάζουμε το $\cos(\gamma_{out}) - \cos(\gamma_{in})$ για κάθε χρήστη βάσει του RIS με το οποίο έχει συσχετιστεί και στα Σχήματα 4.64-4.66 οπτικοποιούμε επί της τοπολογίας βάσει της συσχέτισης με το RIS την κατάσταση λειτουργίας του κάθε χρήστη και την συσχέτισή του με το αντίστοιχο Object (Target για sensing και Base Station για communication). Όσον αφορά την τελευταία ομάδα σχημάτων με συνεχόμενη γραμμή παρουσιάζονται τα μονοπάτια από το RIS προς το Object ενώ με διακεκομμένη γραμμή τα απευθείας μονοπάτια από το χρήστη προς το Object (απευθείας μονοπάτι).

Περνώντας τώρα στην εφαρμογή του αλγορίθμου automata learning, θα επιλέξουμε ένα σχήμα Single State – Multiple Agents με χαμηλό ρυθμό μάθησης ίσο με 0.3 και αμερόληπτη αρχικοποίηση

του διανύσματος των πιθανοτήτων (δηλαδή ισοπίθανη). Όσον αφορά τη συνάρτηση κέρδους, θα χρησιμοποιήσουμε δύο συναρτήσεις με διαφορετικές φιλοσοφίες κατασκευής και θα τις συγκρίνουμε μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη συνάρτηση κέρδους θα έχει καθαρά συλλογικό χαρακτήρα χωρίς να λαμβάνει υπόψιν την βελτίωση που παρέχεται σε κάθε χρήστη ξεχωριστά, θα είναι κοινό για όλους τους χρήστες και θα ισούται με

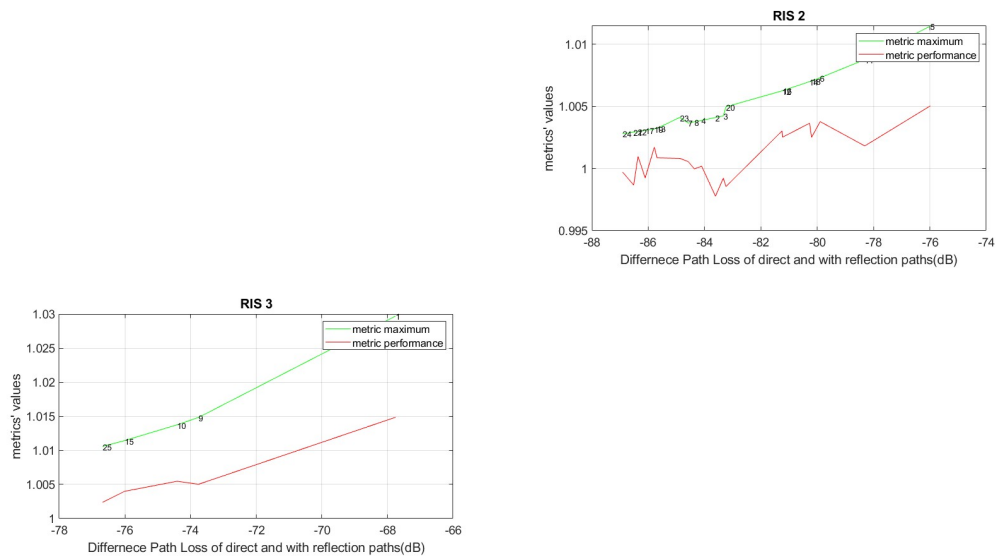
$$\sum_{i=1}^N (total\ improvement)_{LA\ association}^{(i-th\ user)} / \sum_{i=1}^N (individual\ improvement)_{SNR\ association}^{(i-th\ user)} \quad (4.27)$$

όπου με $(individual\ improvement)_{SNR\ association}^{(i-th\ user)}$ συμβολίζεται η μέγιστη επιτεύξιμη βελτίωση με επιλογή RIS βάσει καλύτερου SNR (και επομένως είναι συνολικά η μέγιστη επιτεύξιμη βελτίωση που μπορεί να δοθεί βάσει τοπολογίας). Η δεύτερη συνάρτηση κέρδους θα λαμβάνει υπόψιν της και την συνολική βελτίωση που παρουσιάζει το σύστημα και θα αποτελείται από δύο παράγοντες: ο πρώτος θα είναι αυτούσιο το προηγούμενο *reward* και ο δεύτερος θα έχει τη μορφή βάρους επί του πρώτου και θα αφορά την βελτίωση του κάθε χρήστη ξεχωριστά και συνολικά το *reward* θα ισούται με

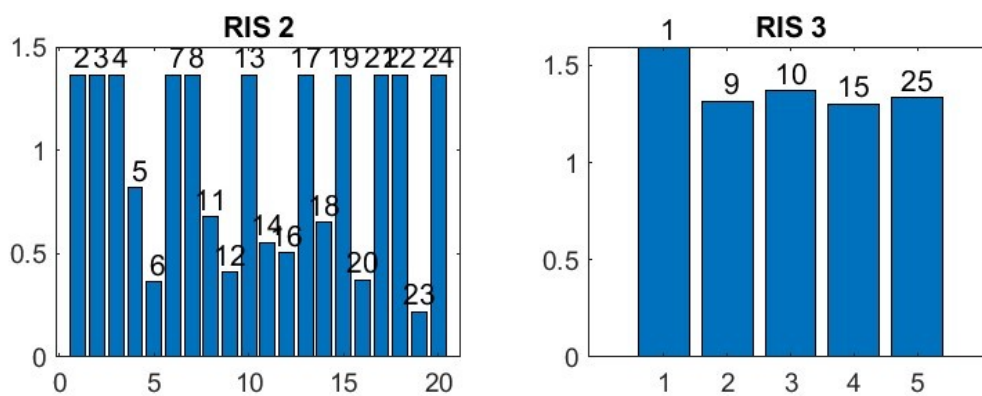
$$(reward)^{(n-th\ user)} = \frac{(total\ improvement)^{(n-th\ user)}}{(individual\ improvement)_{SNR\ association}^{(n-th\ user)}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N (total\ improvement)_{LA\ association}^{(i-th\ user)}}{\sum_{i=1}^N (individual\ improvement)_{SNR\ association}^{(i-th\ user)}} \quad (4.28)$$

Τα Σχήματα 4.67-4.68 αφορούν την απόδοση του συστήματος με συσχέτιση βάση automata learning με χρήση του πρώτου *reward* (καθαρά συλλογικό): στο Σχήμα 4.67 παρουσιάζουμε στα αριστερά την *individual* (για το συγκεκριμένο RIS) και *totalimprovement* για κάθε χρήστη συναρτήσει της παραμέτρου $(Path\ Loss\ direct)(dB) - (Path\ Loss\ reflect)(dB)$ βάσει του RIS με το οποίο έχει συσχετιστεί και στο Σχήμα 4.68 παρουσιάζεται για κάθε χρήστη συγκριτικά το *totalimprovement* με χρήση συσχετισμού SNR και παρόντος αλγορίθμου automata learning. Τα σχήματα 4.69-4.74 αφορούν την απόδοση του συστήματος με συσχέτιση βάση automata learning με χρήση του δεύτερου *reward* (συλλογικό με ατομοκεντρικό βάρος για κάθε χρήστη): στο Σχήμα 4.69 παρουσιάζουμε στα αριστερά την *individual* (για το συγκεκριμένο RIS) και *totalimprovement* για κάθε χρήστη συναρτήσει της παραμέτρου $(Path\ Loss\ direct)(dB) - (Path\ Loss\ reflect)(dB)$ βάσει του RIS με το οποίο έχει συσχετιστεί, στο Σχήμα 4.70 παρουσιάζεται για κάθε χρήστη συγκριτικά το *totalimprovement* με χρήση συσχετισμού SNR και παρόντος αλγορίθμου automata learning, στο Σχήμα 4.71 παρουσιάζουμε το $\cos(\gamma_{out}) - \cos(\gamma_{in})$ για κάθε χρήστη βάσει του RIS με το οποίο έχει συσχετιστεί και στα Σχήματα 4.72-4.74 (ίδιος χρωματικός συμβολισμός με Σχήματα 4.64-4.66) οπτικοποιούμε επί της τοπολογίας βάσει της συσχέτισης με το RIS την κατάσταση λειτουργίας του κάθε χρήστη και την συσχέτισή του με το αντίστοιχο Object (Target για sensing και Base Station για communication).

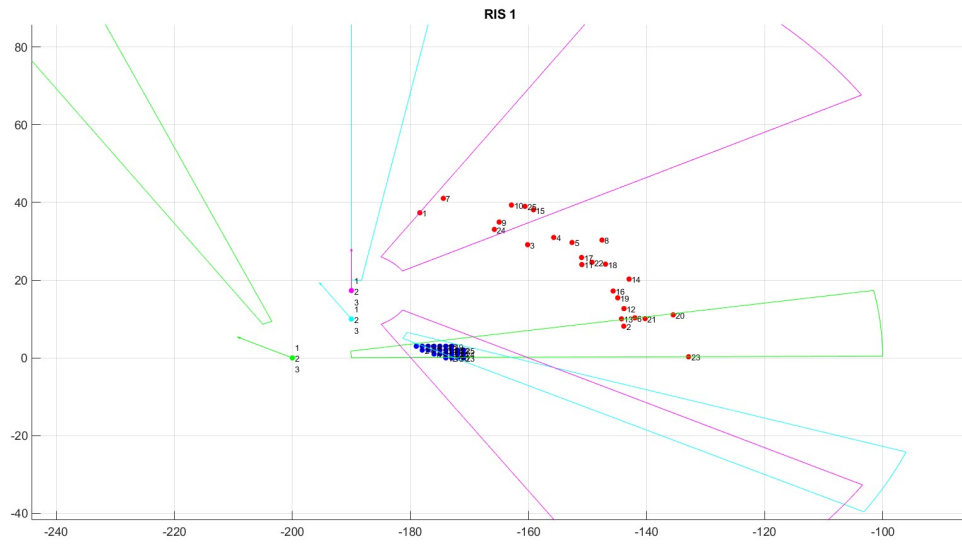
Με βάση τις γραφικές παραστάσεις που εξήγαμε μπορούμε να προβούμε σε μια σύγκριση μεταξύ τόσο των δύο αλγορίθμων automata learning όσο και με τη συσχέτιση βάσει SNR. Καταρχάς με χρήση automata learning αποκλειστικά συλλογικού κέρδους έχουμε βελτίωση 32% σε σχέση με τη συσχέτιση βάσει SNR και τερματισμό στις 364 επαναλήψεις, ενώ αντίστοιχα με χρήση συλλογικού κέρδους με ατομικά βάρη έχουμε βελτίωση 48% και τερματισμό σε 487 επαναλήψεις. Άρα έχουμε ένα εμφανές trade off μεταξύ προσέγγισης βέλτιστης λύσης και αριθμού επαναλήψεων. Επιπλέον, για συσχέτιση βάσει SNR έχουμε αρκετούς χρήστες που δεν επιτυγχάνουν βελτίωση, ο αριθμός αυτός μειώνεται με χρήση LA αποκλειστικά συλλογικού κέρδους και εκμηδενίζεται με χρήση LA συλλογικού κέρδους με ατομικά βάρη. Όμως μεταξύ των δύο τελευταίων παρουσιάζεται ένα trade off που αφορά το γεγονός ότι η αύξηση της βελτίωσης για τους υπολειπόμενους χρήστες της περίπτωσης χρήσης αποκλειστικά συλλογικού κέρδους στην περίπτωση χρήσης συλλογικού κέρδους με ατομικά βάρη συνεπάγεται μείωση ορισμένων βελτιώσεων άλλων χρηστών.



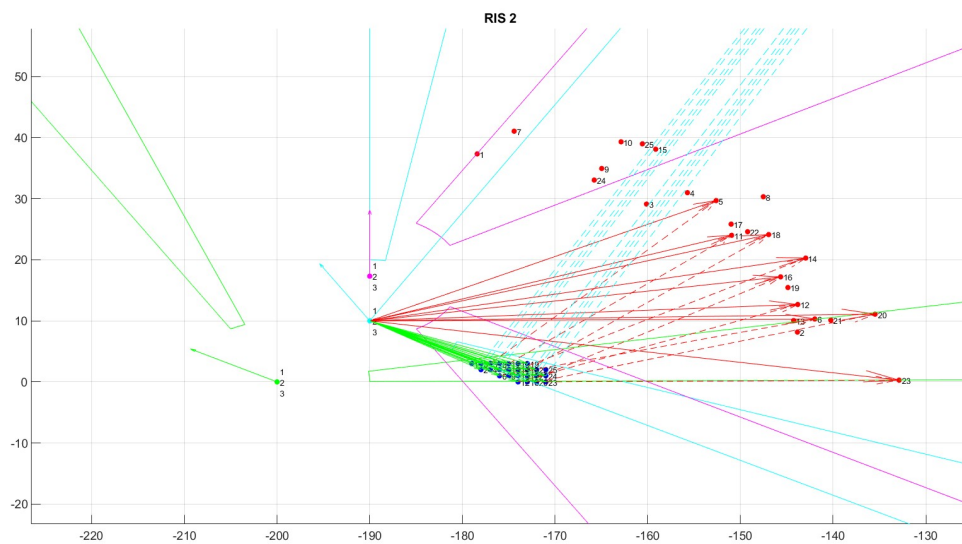
Σχήμα 4.62: Παρουσίαση *individual* και *total improvement* για κάθε χρήστη ανάλογα με το RIS που έχει συσχετιστεί με συσχετισμό χρήστη-RIS βάσει καλύτερου SNR



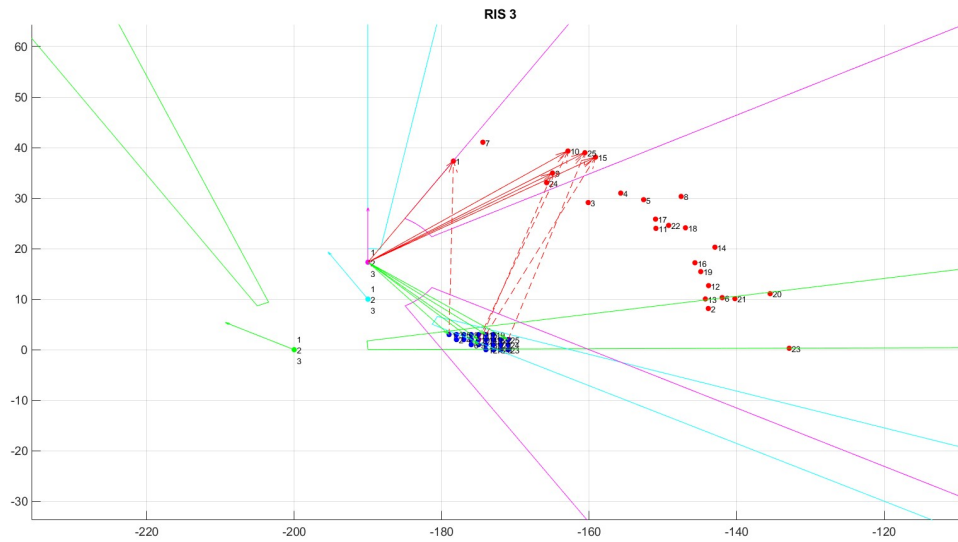
Σχήμα 4.63: Παρουσίαση διαφοράς γωνιών εισόδου/εξόδου από RIS για κάθε χρήστη με συσχετισμό χρήστη-RIS βάσει καλύτερου SNR



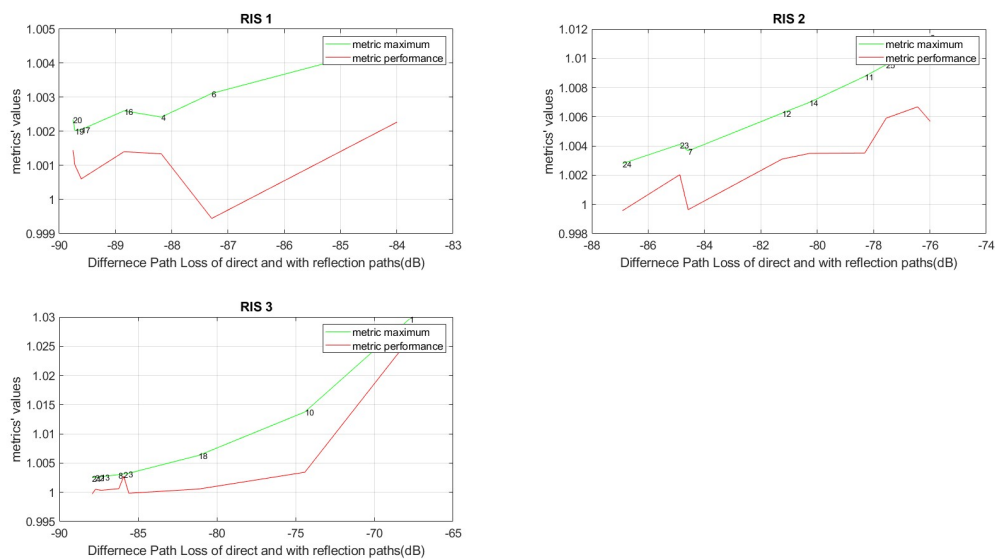
Σχήμα 4.64: Παρουσίαση συσχετισμών UE – RIS (για RIS A/A 1), UE-Object βάση κατάστασης λειτουργίας με συσχετισμό χρήστη-RIS βάσει καλύτερου SNR



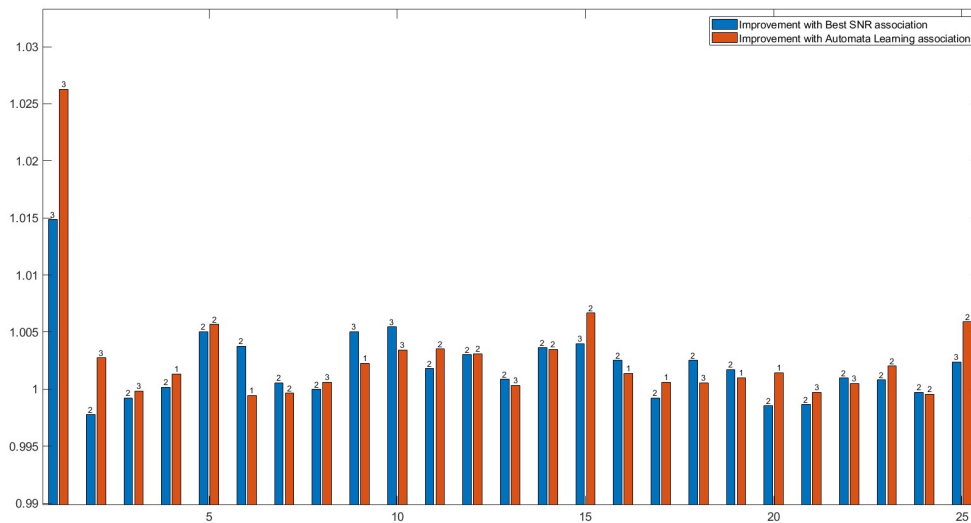
Σχήμα 4.65: Παρουσίαση συσχετισμών UE – RIS (για RIS A/A 2), UE-Object βάση κατάστασης λειτουργίας με συσχετισμό χρήστη-RIS βάσει καλύτερου SNR



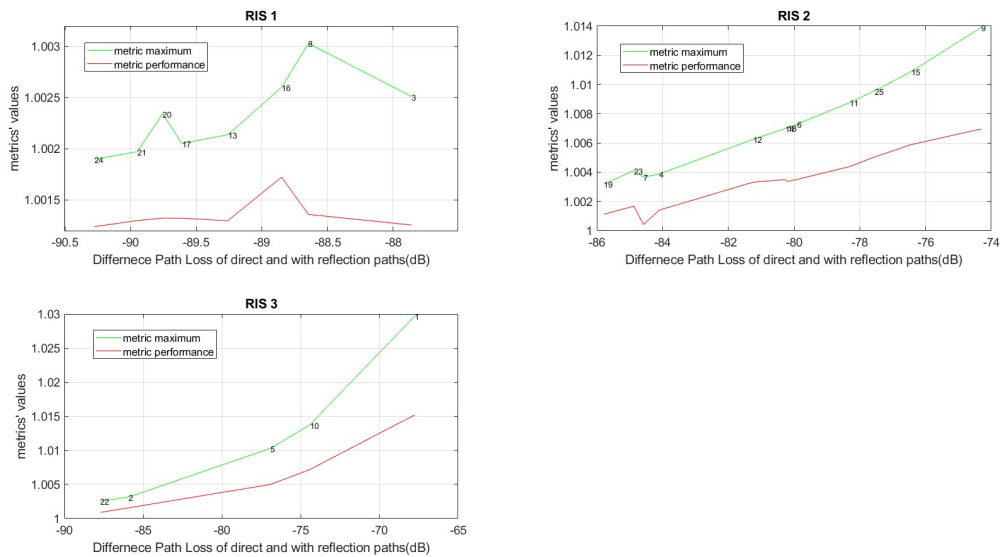
Σχήμα 4.66: Παρουσίαση συσχετισμών UE – RIS (για RIS A/A 3), UE-Object βάση κατάστασης λειτουργίας με συσχετισμό χρήστη-RIS βάσει καλύτερου SNR



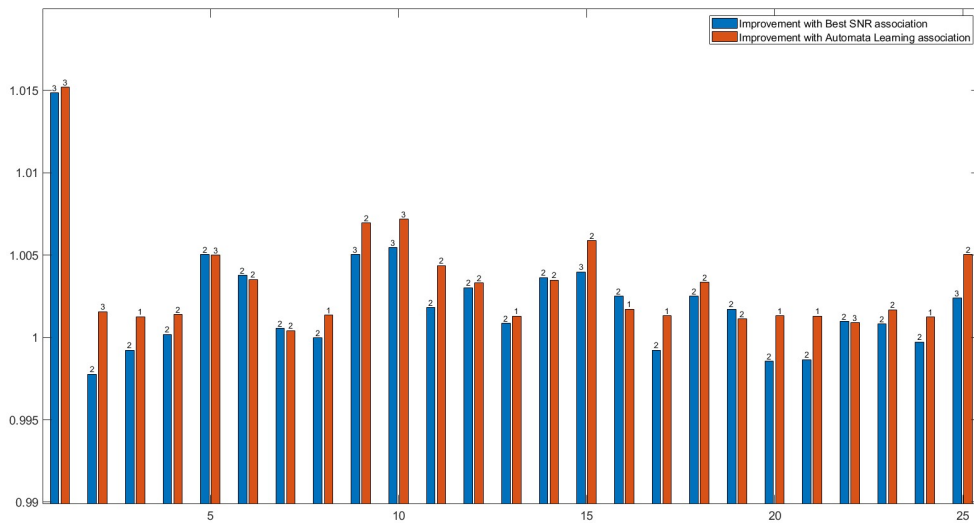
Σχήμα 4.67: Παρουσίαση *individual* και *total improvement* για κάθε χρήστη ανάλογα με το RIS που έχει συσχετιστεί ύστερα από εφαρμογή αλγορίθμου Automata Learning με συλλογικό κέρδος



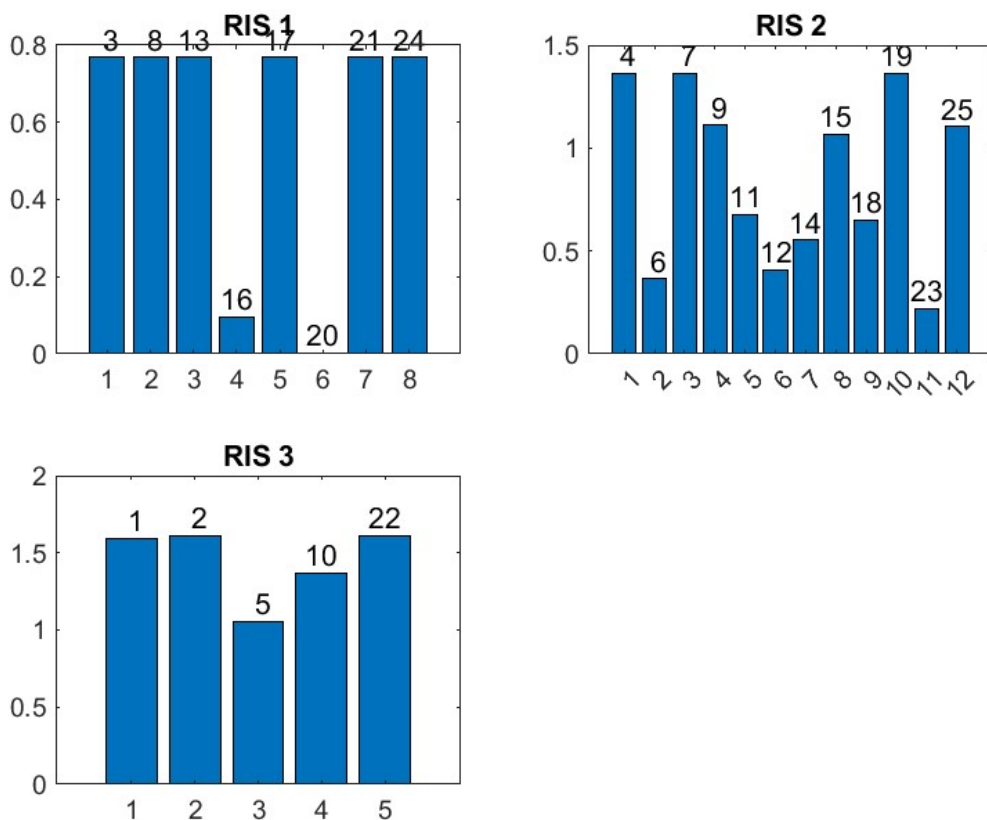
Σχήμα 4.68: Συγκριτική παρουσίαση *individual* και *total improvement* για όλους τους χρήστες με συσχέτιση χρήστη-RIS βάσει αλγορίθμου Automata Learning με συλλογικό κέρδος



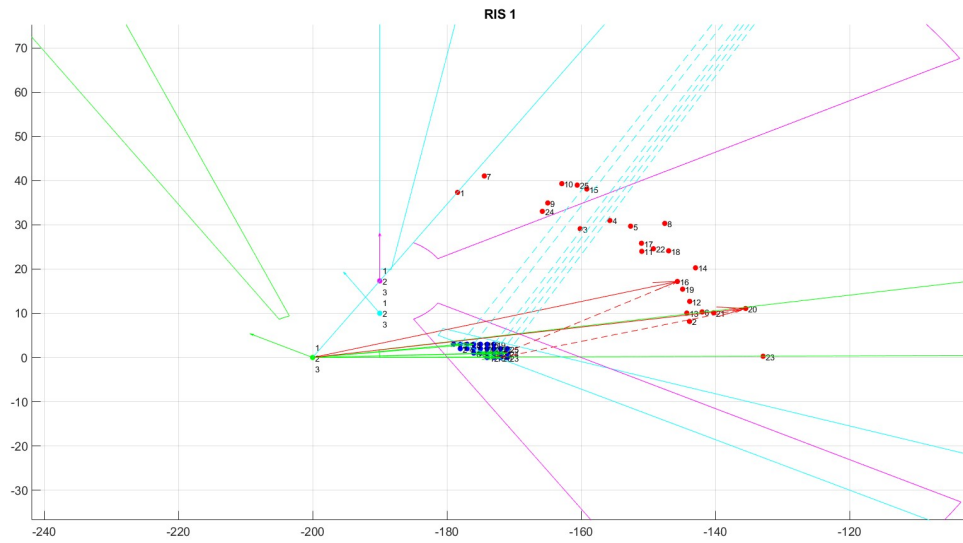
Σχήμα 4.69: Παρουσίαση *individual* και *total improvement* για κάθε χρήστη ανάλογα με το RIS που έχει συσχετιστεί ύστερα από εφαρμογή αλγορίθμου Automata Learning με συνδυασμό ατομικού και ομαδικού κέρδους



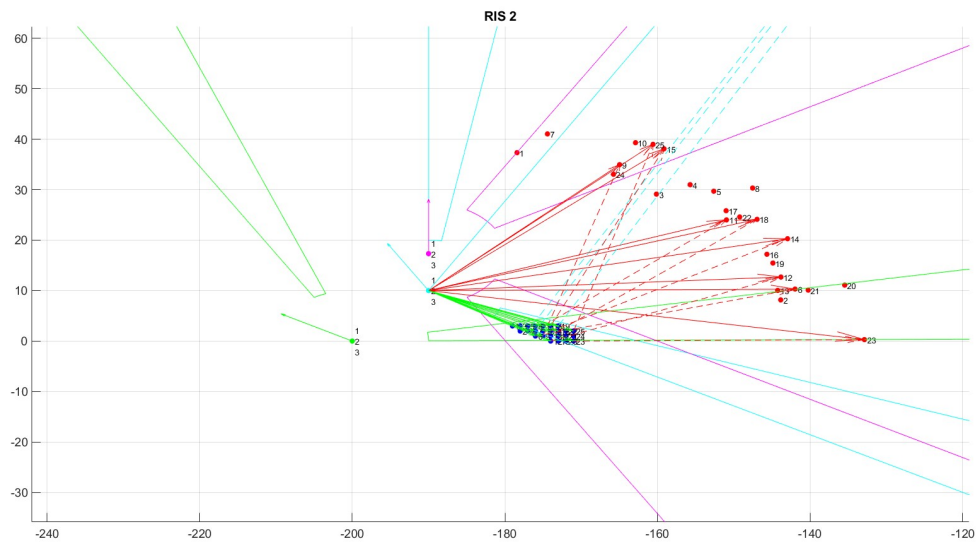
Σχήμα 4.70: Συγκριτική παρουσίαση *individual* και *total improvement* για όλους τους χρήστες με συσχετισμό χρήστη-RIS βάσει αλγορίθμου Automata Learning με συνδυασμό ατομικού και ομαδικού κέρδους



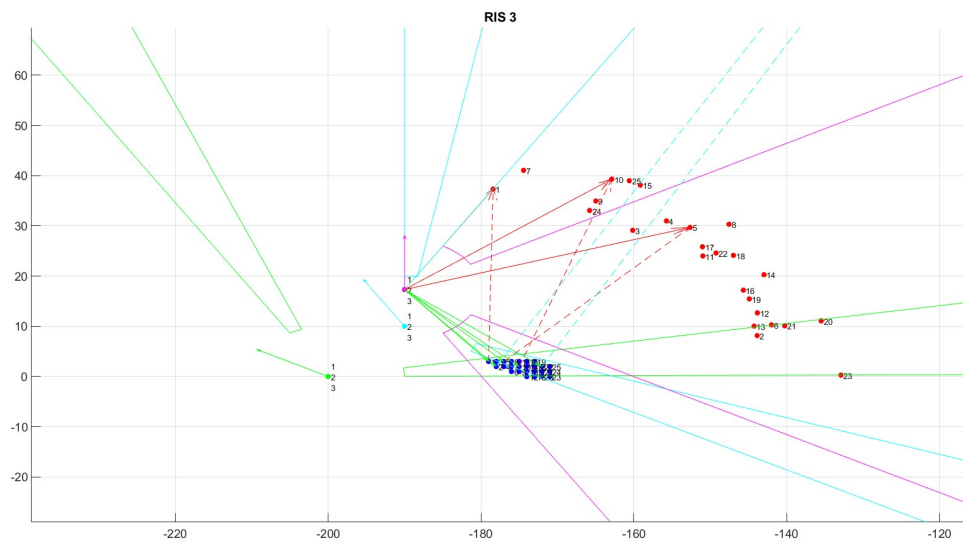
Σχήμα 4.71: Παρουσίαση διαφοράς γωνιών εισόδου/εξόδου από RIS για κάθε χρήστη με συσχετισμό χρήστη-RIS βάσει αλγορίθμου Automata Learning με συνδυασμό ατομικού και ομαδικού κέρδους



Σχήμα 4.72: Παρουσίαση συσχετισμών UE – RIS (για RIS A/A 1), UE-Object βάση κατάστασης λειτουργίας με συσχετισμό χρήστη-RIS βάσει αλγορίθμου Automata Learning με συνδυασμό ατομικού και ομαδικού κέρδους



Σχήμα 4.73: Παρουσίαση συσχετισμών UE – RIS (για RIS A/A 2), UE-Object βάση κατάστασης λειτουργίας με συσχετισμό χρήστη-RIS βάσει αλγορίθμου Automata Learning με συνδυασμό ατομικού και ομαδικού κέρδους



Σχήμα 4.74: Παρουσίαση συσχετισμών UE – RIS (για RIS A/A 3), UE-Object βάση κατάστασης λειτουργίας με συσχετισμό χρήστη-RIS βάσει αλγορίθμου Automata Learning με συνδυασμό ατομικού και ομαδικού κέρδους

Κεφάλαιο 5

Σύνοψη

Τα τελευταία χρόνια μεγάλο μέρος της ακαδημαϊκής κοινότητας έχει εστιάσει το ερευνητικό ενδιαφέρον του στις Επαναδιαμορφώσιμες Ανακλαστικές Επιφάνειες (RISs) ως κρίσιμη τεχνολογία στα πλαίσια των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων 6^{ης} γενιάς. Από το μεγάλο πλήθος προτεινόμενων εφαρμογών της τεχνολογίας των RISs, στην παρούσα διπλωματική αποφασίσαμε να ασχοληθούμε με την χρήση των RISs σε συστήματα ISAC μελετώντας παράλληλα όμως βασικά θέματα λειτουργίας του RIS όταν αυτό προσπευλάνεται από πολλούς χρήστες. Από την συνολική μας έρευνα προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

- Υπό συνθήκες απωλειών διάδοσης (path loss) η βελτίωση που μπορεί να παρέχει η χρήση RISs είναι αρκετά μικρή λόγω της μεγάλης εξασθένισης του εξ ανάκλασης μονοπατιού όπως υποδεικνύεται από την υπάρχουσα μοντελοποίηση του συντελεστή καναλιού με χρήση RIS. Ακόμα, η επίδραση του φαινομένου της σκίασης είναι καθοριστικής σημασίας, διότι οδηγεί σε έντονες διακυμάνσεις της βελτίωσης απόδοσης που παρέχεται με χρήση RIS. Τέλος, η βελτίωση της απόδοσης εξαρτάται στο τετράγωνο από το πλήθος των στοιχείων του RIS.
- Το RIS συμπεριφέρεται ως μια παθητική στοιχειοκεραία της οποίας η κατευθυντικότητα εξαρτάται από το πλήθος των στοιχείων της. Όσο μεγαλύτερο το πλήθος τόσο πιο κατευθυντική γίνεται η στοιχειοκεραία. Στην περίπτωση συσχετισμού 1:1 η βελτίωση της απόδοσης συναρτήσει της διαφοράς γωνιών εισόδου-εξόδου από το RIS έχει την μορφή διαγράμματος ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας με κεντρικό λοβό μικρού εύρους ζώνης και ιδιαίτερα κατευθυντικό.
- Όταν το RIS προσπευλάνεται από πολλούς χρήστες, η διαφορά επιθυμητής γωνίας προσαρμογής και υπάρχουσας γωνίας προσαρμογής για κάθε στοιχείο του RIS είναι τυχαία μεταβλητή. Όσο απομακρύνεται η μέση τιμή από την βέλτιστη τιμή της (το μηδέν) και αυξάνεται η διασπορά της τυχαίας μεταβλητής τόσο μειώνεται η βελτίωση που παρέχεται και αυξάνεται το εύρος πιθανών τιμών που μπορεί να λάβει. Ακόμα, τα φαινόμενα διακύμανσης γίνονται εντονότερα όσο καλύτερο γίνεται το εξ ανακλάσεως μονοπάτι.
- Υπάρχουν δύο κριτήρια που προσδιορίζουν την βελτίωση με χρήση RIS : καταρχάς το πρώτο έχει έντονο ατομοκεντρικό χαρακτήρα και αφορά τη μέγιστη δυνατή βελτίωση, η οποία εξαρτάται αποκλειστικά από τον χρήστη και την συνεπαγόμενη θέση του ως προς το RIS και το Object. Το δεύτερο κριτήριο έχει ομαδικό χαρακτήρα και αφορά την επιτυχία επίτευξης της μέγιστης δυνατής βελτίωσης , η οποία εξαρτάται από τα σχετικά εύρη γωνιών εισόδου/εξόδου στο RIS που καθορίζονται από την σχετική αξιμουθιακή θέση των χρηστών και των συσχετισμένων με αυτά Objects ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας των χρηστών.
- Η χρήση αλγορίθμου Learning Automata για την συσχέτιση χρηστών με RISs μπορεί να προσφέρει 50% καλύτερη απόδοση στο σύστημα σε σχέση με την συσχέτιση βάσει καλύτερου SNR. Ακόμα, η συνάρτηση ρεωαρό πρέπει να περιλαμβάνει τόσο συλλογικό παράγοντα, που θα δείχνει την συνολική απόδοση του συστήματος, όσο και ατομικό, που ο θα έχει τη μορφή βάρους επί του πρώτου και θα αφορά την βελτίωση του κάθε χρήστη ξεχωριστά.

Είναι προφανές λοιπόν, ότι σε συστήματα πολλαπλών χρηστών, στα οποία έκαστο RIS πρόκειται να προσπελαστεί από πολλούς χρήστες, τόσο η βελτίωση που παρέχεται από συλλογική βελτιστοποίηση όσο και η μέγιστη επιτεύξιμη βελτίωση που μπορεί να δοθεί σε κάθε χρήστη αν έχουμε λόγο συσχέτισης 1:1 είναι αρκετά μικρή. Συνεπώς, παραμένει ακόμα ανοιχτό και χρήζει διερεύνησης σε ποιες περιπτώσεις πρόκειται να φανεί ουσιαστική η βελτίωση που μπορεί να δώσει η χρήση των RISs.

Bibliography

- [1] Y. Zhao and J. He, “RISTA - Reconfigurable Intelligent Surface Technology White Paper (2023),” Tech. Rep., 03 2023.
- [2] A. Liu, Z. Huang, M. Li, Y. Wan, W. Li, T. X. Han, C. Liu, R. Du, D. K. P. Tan, J. Lu, Y. Shen, F. Colone, and K. Chetty, “A Survey on Fundamental Limits of Integrated Sensing and Communication,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 24, no. 2, pp. 994–1034, 2022.
- [3] M. Di Renzo, K. Ntontin, J. Song, F. H. Danufane, X. Qian, F. Lazarakis, J. De Rosny, D.-T. Phan-Huy, O. Simeone, R. Zhang, M. Debbah, G. Lerosey, M. Fink, S. Tretyakov, and S. Shamai, “Reconfigurable Intelligent Surfaces vs. Relaying: Differences, Similarities, and Performance Comparison,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 798–807, 2020.
- [4] Q. Gu, D. Wu, X. Su, J. Jin, Y. Yuan, and J. Wang, “Performance comparison between reconfigurable intelligent surface and relays: Theoretical methods and a perspective from operator,” 2021.
- [5] Z. Zhang, L. Dai, X. Chen, C. Liu, F. Yang, R. Schober, and H. V. Poor, “Active RIS vs. Passive RIS: Which Will Prevail in 6G?” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 71, no. 3, pp. 1707–1725, mar 2023.
- [6] X. Mu, Z. Wang, and Y. Liu, “NOMA for Integrating Sensing and Communications towards 6G: A Multiple Access Perspective,” 2022.
- [7] Z. Wang, Y. Liu, X. Mu, Z. Ding, and O. A. Dobre, “NOMA Empowered Integrated Sensing and Communication,” *IEEE Communications Letters*, vol. 26, no. 3, pp. 677–681, 2022.
- [8] R. Wang, F. Xia, J. Huang, X. Wang, and Z. Fei, “Cap-net: A deep learning-based angle prediction approach for isac-enabled ris-assisted v2i communications,” in *2022 IEEE 22nd International Conference on Communication Technology (ICCT)*, 2022, pp. 1255–1259.
- [9] Z. Shao, X. Yuan, W. Zhang, and M. Di Renzo, “Joint localization and information transfer for ris aided full-duplex systems,” in *GLOBECOM 2022 - 2022 IEEE Global Communications Conference*, 2022, pp. 3253–3258.
- [10] R. Liu, M. Li, and A. L. Swindlehurst, “Joint beamforming and reflection design for RIS-assisted ISAC systems,” in *2022 30th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. IEEE, aug 2022.
- [11] Z. Xing, R. Wang, and X. Yuan, “Joint active and passive beamforming design for reconfigurable intelligent surface enabled integrated sensing and communication,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 71, no. 4, pp. 2457–2474, 2023.
- [12] X. Meng, F. Liu, S. Lu, S. P. Chepuri, and C. Masouros, “PRIS-assisted Integrated Sensing and Communications: A Subspace Rotation Approach,” 2022.

- [13] S. Yan, S. Cai, W. Xia, J. Zhang, and S. Xia, "A reconfigurable intelligent surface aided dual-function radar and communication system," in *2022 2nd IEEE International Symposium on Joint Communications and Sensing*, 2022, pp. 1–6.
- [14] H. Zhang, "Joint waveform and phase shift design for ris-assisted integrated sensing and communication based on mutual information," *IEEE Communications Letters*, vol. 26, no. 10, pp. 2317–2321, 2022.
- [15] N. Mensi and D. B. Rawat, "Reconfigurable intelligent surface selection for wireless vehicular communications," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 11, no. 8, pp. 1743–1747, 2022.
- [16] E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, M. Debbah, M.-S. Alouini, and R. Zhang, "Wireless Communications Through Reconfigurable Intelligent Surfaces," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116 753–116 773, 2019.
- [17] Y. Liu, X. Liu, X. Mu, T. Hou, J. Xu, M. Di Renzo, and N. Al-Dhahir, "Reconfigurable Intelligent Surfaces: Principles and Opportunities," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 23, no. 3, pp. 1546–1577, 2021.
- [18] J. C. Liang, Q. Cheng, Y. Gao, C. Xiao, S. Gao, L. Zhang, S. Jin, and T. J. Cui, "An Angle-Insensitive 3-Bit Reconfigurable Intelligent Surface," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 10, pp. 8798–8808, 2022.
- [19] G. C. Trichopoulos, P. Theofanopoulos, B. Kashyap, A. Shekhawat, A. Modi, T. Osman, S. Kumar, A. Sengar, A. Chang, and A. Alkhateeb, "Design and Evaluation of Reconfigurable Intelligent Surfaces in Real-World Environment," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 3, pp. 462–474, 2022.
- [20] S. Gong, X. Lu, D. T. Hoang, D. Niyato, L. Shu, D. I. Kim, and Y.-C. Liang, "Toward Smart Wireless Communications via Intelligent Reflecting Surfaces: A Contemporary Survey," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 22, no. 4, pp. 2283–2314, 2020.
- [21] M. A. ElMossallamy, H. Zhang, L. Song, K. G. Seddik, Z. Han, and G. Y. Li, "Reconfigurable intelligent surfaces for wireless communications: Principles, challenges, and opportunities," *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 6, no. 3, pp. 990–1002, 2020.
- [22] C. Liaskos, S. Nie, A. Tsiolaridou, A. Pitsillides, S. Ioannidis, and I. Akyildiz, "A New Wireless Communication Paradigm through Software-Controlled Metasurfaces," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 9, pp. 162–169, 2018.
- [23] C. Pan, H. Ren, K. Wang, J. F. Kolb, M. ElKashlan, M. Chen, M. Di Renzo, Y. Hao, J. Wang, A. L. Swindlehurst, X. You, and L. Hanzo, "Reconfigurable Intelligent Surfaces for 6G Systems: Principles, Applications, and Research Directions," *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 6, pp. 14–20, 2021.
- [24] S. Jia, X. Yuan, and Y.-C. Liang, "Reconfigurable Intelligent Surfaces for Energy Efficiency in D2D Communication Network," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 3, pp. 683–687, 2021.
- [25] Q. Zhang, W. Saad, and M. Bennis, "Reflections in the Sky: Millimeter Wave Communication with UAV-Carried Intelligent Reflectors," in *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2019, pp. 1–6.

- [26] T. Van Chien, H. Q. Ngo, S. Chatzinotas, M. Di Renzo, and B. Ottersten, "Reconfigurable Intelligent Surface-Assisted Cell-Free Massive MIMO Systems Over Spatially-Correlated Channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 7, pp. 5106–5128, 2022.
- [27] M. Diamanti, P. Charatsaris, E. E. Tsiropoulou, and S. Papavassiliou, "The Prospect of Reconfigurable Intelligent Surfaces in Integrated Access and Backhaul Networks," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 6, no. 2, pp. 859–872, 2022.
- [28] R. Liu, M. Li, and A. L. Swindlehurst, "Joint Beamforming and Reflection Design for RIS-assisted ISAC Systems," in *2022 30th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. IEEE, aug 2022.
- [29] T. Bai, C. Pan, C. Han, and L. Hanzo, "Reconfigurable Intelligent Surface Aided Mobile Edge Computing," *IEEE Wireless Communications*, vol. 28, no. 6, pp. 80–86, 2021.
- [30] S. Mao, L. Liu, N. Zhang, M. Dong, J. Zhao, J. Wu, and V. C. M. Leung, "Reconfigurable Intelligent Surface-Assisted Secure Mobile Edge Computing Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 6, pp. 6647–6660, 2022.
- [31] B. C. Nguyen, T. M. Hoang, L. T. Dung, and T. Kim, "On Performance of Two-Way Full-Duplex Communication System With Reconfigurable Intelligent Surface," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 81 274–81 285, 2021.
- [32] P. Zetterberg and B. Ottersten, "The spectrum efficiency of a base station antenna array system for spatially selective transmission," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 44, no. 3, pp. 651–660, 1995.
- [33] N. Dawod, R. Hafez, and I. Marsland, "A Multiuser Zeroforcing System with Reduced Near-Far Problem and MIMO Channel Correlations," in *2006 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2006, pp. 936–939.
- [34] G. Levin and S. Loyka, "On the outage capacity distribution of correlated keyhole MIMO channels," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006.*, vol. 2, 2006, pp. 745–750.
- [35] M. Tangemann, "Near-far effects in adaptive SDMA systems," in *Proceedings of 6th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 3, 1995, pp. 1293–.
- [36] T. F. Maciel and A. Klein, "On the Performance, Complexity, and Fairness of Suboptimal Resource Allocation for Multiuser MIMO-OFDMA Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 1, pp. 406–419, 2010.
- [37] A. Lozano and A. Tulino, "Capacity of multiple-transmit multiple-receive antenna architectures," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 48, no. 12, pp. 3117–3128, 2002.
- [38] M. Jiang, J. Akhtman, and L. Hanzo, "Iterative Joint Channel Estimation and Multi-User Detection for Multiple-Antenna Aided OFDM Systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 8, pp. 2904–2914, 2007.
- [39] A. Benjebbour, Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Li, A. Harada, and T. Nakamura, "Concept and practical considerations of non-orthogonal multiple access (NOMA) for future radio access," in *2013 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, 2013, pp. 770–774.

- [40] A. Nowé, K. Verbeeck, and M. Peeters, “Learning Automata as a Basis for Multi Agent Reinforcement Learning,” in *Learning and Adaption in Multi-Agent Systems*, K. Tuyls, P. J. Hoen, K. Verbeeck, and S. Sen, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 71–85.
- [41] K. S. Narendra and R. M. Wheeler, “An N-player sequential stochastic game with identical payoffs,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-13, no. 6, pp. 1154–1158, 1983.
- [42] “5G/NR, Physical channels and modulation (3GPP TS 38.211 version 15.2.0 Release 15),” ETSI TS 138 211 V15.2.0 (2018-07), Tech. Rep., 2018.
- [43] “5G, study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 Version 16.1.0 Release 16),” ETSI TR 138 901 v16.1.0 (2020-11), Tech. Rep., 2020.
- [44] C. Zhang, W. Yi, Y. Liu, and L. Hanzo, “Semi-Integrated-Sensing-and-Communication (Semi-ISaC): From OMA to NOMA,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 71, no. 4, pp. 1878–1893, 2023.
- [45] Y. Liu, G. Liao, J. Xu, Z. Yang, and Y. Zhang, “Adaptive OFDM Integrated Radar and Communications Waveform Design Based on Information Theory,” *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 10, pp. 2174–2177, 2017.
- [46] M. Bell, “Information theory and radar waveform design,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 39, no. 5, pp. 1578–1597, 1993.
- [47] B. Zheng, Q. Wu, and R. Zhang, “Intelligent Reflecting Surface-Assisted Multiple Access With User Pairing: NOMA or OMA?” *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 4, pp. 753–757, 2020.
- [48] S. Li, B. Duo, X. Yuan, Y.-C. Liang, and M. Di Renzo, “Reconfigurable Intelligent Surface Assisted UAV Communication: Joint Trajectory Design and Passive Beamforming,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 5, pp. 716–720, 2020.