



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ: ΕΥΦΥΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΝΕΑΣ ΓΕΝΙΑΣ

**Integrated Sensing and Communications using
Reconfigurable Intelligent Surfaces in 6G Networks**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Σοφίας Αναγνώστου

Επιβλέπων : Κ. Μαλιάτσος, Επίκουρος Καθηγητής

Μέλη εξεταστικής επιτροπής: Δ. Σκούτας, Δ. Βουγιούκας

Σάμος, Μάρτιος 2025

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πρόλογος και ευχαριστίες

Πρόλογος και ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί ένα σημαντικό σταθμό στην ακαδημαϊκή μου πορεία. Μέσα από αυτή την ερευνητική προσπάθεια, είχα την ευκαιρία να εμβαθύνω στο επιστημονικό πεδίο που με ενδιαφέρει και να αναπτύξω δεξιότητες που θα με συνοδεύουν στη συνέχιση των ακαδημαϊκών μου στόχων και στη μετέπειτα επαγγελματική μου σταδιοδρομία.

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στην πραγματοποίησή της. Πρωτίστως, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επιβλέποντα καθηγητή μου, Κωνσταντίνο Μαλιάτσο, για την πολύτιμη καθοδήγηση, την αμέριστη υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Οι γνώσεις του, η επιστημονική του κατάρτιση και οι εύστοχες παρατηρήσεις του αποτέλεσαν πυξίδα στην ερευνητική μου πορεία.

Θα ήταν παράλειψη να μην εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον σύντροφό μου, για την αμέριστη συμπαράσταση, υπομονή και ενθάρρυνση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της απαιτητικής διαδρομής. Η αγάπη, η κατανόηση και η συναισθηματική του στήριξη υπήρξαν καθοριστικές για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας μου.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ ανήκει στους γονείς και την αδερφή μου, για την αδιάκοπη στήριξη, την κατανόηση και την αγάπη που μου προσέφεραν όχι μόνο κατά τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας, αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Χωρίς τη συμπαράστασή τους, η ολοκλήρωση αυτού του έργου δε θα ήταν εφικτή.

*Αφιερώνω αυτή την εργασία στην οικογένειά μου,
για την αστείρευτη αγάπη, την ακλόνητη πίστη και την αδιάκοπη υποστήριξή τους.
Κάθε βήμα μου οφείλεται σε εσάς.*

©2025

της

Σοφίας Αναγνώστου

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή	1
1.1	Η Εξέλιξη των Ασύρματων Δικτύων και οι Προκλήσεις της 6ης Γενιάς	1
1.2	Αντικείμενο διπλωματικής.....	1
1.2.1	Στόχοι και συνεισφορά	2
1.3	Μεθοδολογία.....	2
1.4	Δομή της διπλωματικής	3
2	Δίκτυα 6G και τεχνολογίες Cell-free.....	4
2.1	Δίκτυα 6G: Προκλήσεις και απαιτήσεις	4
2.1.1	Χαρακτηριστικά και στόχοι Δικτύων 6G	4
2.1.2	Καινοτόμες τεχνολογίες και αρχιτεκτονικές.....	5
2.2	Δίκτυα δίχως κυψέλες (Cell-free)	6
2.2.1	Αρχιτεκτονική και βασικές αρχές.....	6
2.2.2	Πλεονεκτήματα και προκλήσεις.....	8
2.3	Συστήματα MIMO σε περιβάλλοντα δίχως κυψέλες	10
2.3.1	Βασικές αρχές MIMO.....	10
2.3.2	Cell-free Massive MIMO	12
2.3.3	Εφαρμογές και περιορισμοί	14
3	Ολοκλήρωση Επικοινωνίας και Τηλεπισκόπησης	17
3.1	Βασικές αρχές ISAC	17
3.1.1	Θεωρητικό Υπόβαθρο	17
3.1.2	Πλεονεκτήματα ενοποίησης Επικοινωνίας και Ανίχνευσης	19
3.2	Τεχνικές Υλοποίησης ISAC.....	21
3.2.1	Διαμόρφωση σήματος διττής χρήσης	21
3.2.2	Κοινή χρήση φάσματος και πόρων	23
3.2.3	Συνεργατική επεξεργασία σήματος	25
3.3	Εφαρμογές ISAC σε δίκτυα 6G	27
3.3.1	Εξυπνα συστήματα μεταφορών και αυτόνομα οχήματα.....	27
3.3.2	Εξυπνες πόλεις και Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT).....	28
3.3.3	Εφαρμογές εκτεταμένης πραγματικότητας (XR).....	28
3.3.4	Εφαρμογές στην υγειονομική περίθαλψη	29
3.3.5	Βιομηχανικές εφαρμογές και Βιομηχανία 4.0	29
3.3.6	Προκλήσεις υλοποίησης και μελλοντικές κατευθύνσεις	30

4	Επαναδιαμορφώσιμες Ευφυείς Επιφάνειες.....	31
4.1	Λειτουργίες και χαρακτηριστικά RIS	31
4.1.1	Αρχιτεκτονική και φυσικές αρχές.....	31
4.1.2	Πλεονεκτήματα και περιορισμοί.....	32
4.2	RIS σε δίκτυα Cell-free.....	34
4.2.1	Ενίσχυση κάλυψης & ποιότητας σήματος.....	34
4.2.2	Διαχείριση παρεμβολών & επαναχρησιμοποίηση πόρων.....	35
4.3	Συνεισφορά RIS στο ISAC	36
4.3.1	Βελτίωση Λειτουργιών Επικοινωνίας & Ανίχνευσης.....	36
4.3.2	Προηγμένες τεχνικές ελέγχου & βελτιστοποίησης.....	38
5	Μοντελοποίηση & Προσομοίωση RIS-assisted MIMO ISAC συστήματος.....	40
5.1	Αρχιτεκτονική συστήματος και μοντέλο καναλιού	40
5.1.1	Cell-free τοπολογία.....	40
5.1.2	Ενσωμάτωση RIS & MIMO στοιχείων.....	41
5.1.3	Υλοποίηση λειτουργιών ISAC.....	42
5.2	Ανάπτυξη προσομοίωσης & μεθοδολογία.....	44
5.2.1	Περιγραφή υλοποίησης & αλγορίθμων.....	44
5.2.2	Τεχνικές Βελτιστοποίησης φάσεων RIS.....	49
6	Αποτελέσματα & ανάλυση επιδόσεων.....	53
6.1	Επιδόσεις του προτεινόμενου συστήματος.....	53
6.1.1	Ανάλυση επιδόσεων επικοινωνίας.....	53
6.1.2	Ακρίβεια εντοπισμού & ανίχνευσης.....	56
6.2	Συγκριτική αξιολόγηση.....	58
6.2.1	Σύγκριση με συμβατικά Συστήματα	58
6.2.2	Επίδραση των παραμέτρων RIS.....	59
6.3	Βελτιστοποίηση & ανάλυση ευαισθησίας	60
6.3.1	Επίδραση θέσης & αριθμού στοιχείων RIS.....	60
6.3.2	Αποτελέσματα Τεχνικών Βελτιστοποίησης.....	61
7	Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα	63
7.1	Σύνοψη αποτελεσμάτων	63
7.1.1	Επιδόσεις επικοινωνίας.....	63
7.1.2	Επιδόσεις ανίχνευσης.....	63
7.1.3	Επίδραση παραμέτρων RIS.....	64
7.1.4	Πρακτικές πτυχές και περιορισμοί.....	64
7.2	Συμπεράσματα	65

7.3	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	66
Βιβλιογραφία.....		67
Παράρτημα I [Παραμετροποίηση RIS]		70

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1: Διαφορές δικτύων χωρίς κυψέλες & με κυψέλες.....	7
Σχήμα 2: Τοπολογία MIMO περιβάλλοντος	10
Σχήμα 3: Τοπολογία Cell-free Massive MIMO	13
Σχήμα 4: Διττή λειτουργία από κοινού επικοινωνίας & τηλεπισκόπισης	18
Σχήμα 5: Σενάρια εφαρμογής & περιπτώσεις χρήσης του ISAC	20
Σχήμα 6: Δομή RIS.....	32
Σχήμα 7: RIS-assisted Cell-free Massive MIMO.....	34
Σχήμα 8: RIS-assisted ISAC	37
Σχήμα 9: Τοπολογία προτεινόμενου συστήματος	41
Σχήμα 10: Σύγκριση SNR με και χωρίς RIS	54
Σχήμα 11: Σύγκριση χωρητικότητας με και χωρίς RIS.....	55
Σχήμα 12: Αποτίμηση SNR & χωρητικότητας πριν και μετά την βελτιστοποίηση	55
Σχήμα 13: Σύγκριση συνολικού sum rate πριν & μετά την βελτιστοποίηση	56
Σχήμα 14: Σύγκριση αποτελεσμάτων CRB πριν & μετά την βελτιστοποίηση	57

Ακρωνύμια

ISAC	Integrated Sensing and Communications
RIS	Reconfigurable Intelligent Surfaces
MIMO	Multiple Input Multiple Output
SNR	Signal-to-Noise-Ratio
CRB	Cramér-Rao Bound
LOS	Line of Sight
NLOS	Non-Line of Sight
UE	User Equipment
AoA	Angle of Arrival
AoD	Angle of Departure
AP	Access Point
CPU	Central Processing Unit
mmWave	Millimeter Wave
IoT	Internet of Things
THz	Terahertz
SQP	Sequential Quadratic Programming
XR	Extended Reality
AR	Augmented Reality
VR	Virtual Reality
MR	Mixed Reality
ULA	Uniform Linear Array
RCS	Radar Cross Section
TDD	Time Division Duplex

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά και αναλύει την ενσωμάτωση Επαναδιαμορφώσιμων Ευφών Επιφανειών (Reconfigurable Intelligent Surfaces - RIS) σε συστήματα Ολοκληρωμένης/Ενοποιημένης Επικοινωνίας και Τηλεπισκόπησης (Integrated Sensing and Communications - ISAC) σε περιβάλλοντα δικτύων 6G. Αναπτύσσεται ένα λεπτομερές μοντέλο προσομοίωσης RIS-assisted MIMO ISAC συστήματος σε αρχιτεκτονική δικτύου χωρίς κυψέλες (cell-free), που επιτρέπει την αξιολόγηση των επιδόσεων τόσο στις λειτουργίες επικοινωνίας όσο και στις λειτουργίες τηλεπισκόπησης. Υλοποιούνται και αξιολογούνται αλγόριθμοι βελτιστοποίησης των φάσεων του RIS με στόχους τη μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης και την ελαχιστοποίηση του ορίου Cramér-Rao για βελτίωση της ακρίβειας εντοπισμού.

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν σημαντική βελτίωση του SNR κατά μέσο όρο 17.39 dB και διπλασιασμό της χωρητικότητας με τη χρήση RIS, με περαιτέρω βελτίωση έως 70.65% μετά τη βελτιστοποίηση των φάσεων. Διερευνάται επίσης ο συμβιβασμός μεταξύ επιδόσεων επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης, καθώς και η επίδραση παραμέτρων όπως ο αριθμός των στοιχείων RIS, η ανάλυση φάσης και η θέση τοποθέτησης. Συνολικά, η έρευνα επιβεβαιώνει το σημαντικό δυναμικό των RIS-assisted MIMO ISAC συστημάτων για την αντιμετώπιση των προκλήσεων των μελλοντικών ασύρματων δικτύων.

Λέξεις Κλειδιά: Επαναδιαμορφώσιμες Ευφείς Επιφάνειες, Ολοκληρωμένη Επικοινωνία και Τηλεπισκόπηση, Δίκτυα 6G, Συστήματα MIMO, Δίκτυα χωρίς κυψέλες, Βελτιστοποίηση φάσεων, Προσομοίωση καναλιού.

Abstract

This thesis investigates and analyzes the integration of Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) in Integrated Sensing and Communications (ISAC) systems within 6G network environments. A detailed simulation model for RIS-assisted MIMO ISAC systems in a cell-free network architecture is developed, enabling the evaluation of performance for both communication and sensing functions. Optimization algorithms for RIS phase configurations are implemented and evaluated, aiming to maximize the sum data rate and minimize the Cramér-Rao Bound for improved localization accuracy.

The results demonstrate significant improvement in SNR by an average of 17.39 dB and a doubling of channel capacity with the use of RIS, with further enhancement of up to 70.65% after phase optimization. The trade-off between communication and sensing performance is also investigated, along with the impact of parameters such as the number of RIS elements, phase resolution, and deployment position. Overall, the research confirms the significant potential of RIS-assisted MIMO ISAC systems in addressing the challenges of future wireless networks.

Keywords: *Reconfigurable Intelligent Surfaces, Integrated Sensing and Communications, 6G Networks, MIMO Systems, Cell-free Networks, Phase Optimization, Channel Simulation.*

1

Εισαγωγή

1.1 Η Εξέλιξη των Ασύρματων Δικτύων και οι Προκλήσεις της 6ης Γενιάς

Η ραγδαία ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιακών συστημάτων έχει μεταμορφώσει ριζικά τον τρόπο επικοινωνίας και αλληλεπίδρασης στον σύγχρονο κόσμο [13]. Από τα πρώιμα συστήματα επικοινωνίας μέχρι τα σημερινά δίκτυα 5G, κάθε γενιά έχει φέρει επαναστατικές καινοτομίες που διευρύνουν τις δυνατότητες της ασύρματης επικοινωνίας.

Στο επίκεντρο αυτής της τεχνολογικής εξέλιξης βρίσκονται οι τεχνικές Multiple Input Multiple Output (MIMO), οι οποίες έχουν επαναπροσδιορίσει τις δυνατότητες της πολυ-επίπεδης επικοινωνίας [8]. Οι MIMO τεχνολογίες επιτρέπουν την ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη πολλαπλών ροών δεδομένων μέσω πολλαπλών κεραιών, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα σε όρους χωρητικότητας, αξιοπιστίας και απόδοσης.

Με την επικείμενη έλευση των δικτύων 6ης γενιάς (6G), οι απαιτήσεις για επικοινωνιακά συστήματα γίνονται όλο και πιο απαιτητικές. Οι στόχοι περιλαμβάνουν ρυθμούς μετάδοσης που θα φτάνουν το 1 Tbps, καθυστερήσεις κάτω από 0.1 ms και υποστήριξη έως και 10^7 συσκευών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο. Παράλληλα, τα συστήματα 6G στοχεύουν στην ενοποίηση των λειτουργιών επικοινωνίας και αντίχνευσης/επισκόπησης (Integrated Sensing and Communications - ISAC), δημιουργώντας έτσι συστήματα ικανά να επικοινωνούν και να αντιλαμβάνονται το περιβάλλον ταυτόχρονα.

Επιπλέον, μια από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες για τα δίκτυα 6G είναι οι Επαναδιαμορφώσιμες Ευφυείς Επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces - RIS), οι οποίες προσφέρουν τη δυνατότητα δυναμικής διαμόρφωσης του ασύρματου περιβάλλοντος διάδοσης, επιτρέποντας την ενίσχυση του σήματος, τη μείωση των παρεμβολών και τη βελτίωση της κάλυψης με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο.

1.2 Αντικείμενο διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη και ανάλυση προηγμένων ασύρματων συστημάτων μέσω προσομοίωσης, με έμφαση στην ενοποίηση τριών καινοτόμων τεχνολογιών: των

συστημάτων MIMO, της ολοκληρωμένης επικοινωνίας και ανίχνευσης (ISAC), και των Επαναδιαμορφώσιμων Ευφών Επιφανειών (RIS).

Συγκεκριμένα, η εργασία αναπτύσσει ένα λεπτομερές μοντέλο προσομοίωσης για RIS-assisted MIMO ISAC κανάλια, επιτρέποντας τη διερεύνηση των επιδόσεων και των ιδιοτήτων αυτών των συστημάτων σε διάφορα σενάρια. Το μοντέλο ενσωματώνει τις επιδράσεις της πολυδιαδρομικής διάδοσης, των σκεδαστών, και των δυναμικών μεταβολών του ασύρματου καναλιού, ενώ παράλληλα αναδεικνύει τις δυνατότητες βελτιστοποίησης που προσφέρουν οι RIS.

Η προσέγγιση αυτή αναγνωρίζει τη συμπληρωματικότητα των τριών τεχνολογιών: τα MIMO συστήματα παρέχουν αυξημένη χωρητικότητα και αξιοπιστία, τα ISAC συστήματα επιτρέπουν την αποδοτική χρήση των πόρων μέσω της ενοποίησης λειτουργιών, ενώ οι RIS προσφέρουν δυναμική διαμόρφωση του περιβάλλοντος διάδοσης, βελτιστοποιώντας τη λειτουργία των MIMO και ISAC συστημάτων.

1.2.1 Στόχοι και συνεισφορά

Οι ερευνητικοί στόχοι της διπλωματικής είναι:

1. Η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου μοντέλου προσομοίωσης για RIS-assisted MIMO ISAC κανάλια, που επιτρέπει τη λεπτομερή μελέτη των χαρακτηριστικών και των επιδόσεων αυτών των συστημάτων.
2. Η διερεύνηση της επίδρασης διαφόρων παραμέτρων στη λειτουργία του συστήματος, όπως ο αριθμός των στοιχείων RIS, η θέση τους, οι ιδιότητες των σκεδαστών, και οι συνθήκες του καναλιού.
3. Η αξιολόγηση των επιδόσεων επικοινωνίας και ανίχνευσης στο προτεινόμενο σύστημα, εξετάζοντας μετρικές όπως η χωρητικότητα καναλιού, ο ρυθμός σφαλμάτων, και η ακρίβεια εντοπισμού.
4. Η πρόταση και αξιολόγηση τεχνικών βελτιστοποίησης για τη διαμόρφωση των φάσεων των στοιχείων RIS, με στόχο τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος.

Η συνεισφορά της εργασίας περιλαμβάνει:

1. Την ανάπτυξη ενός ευέλικτου και επεκτάσιμου μοντέλου προσομοίωσης για RIS-assisted MIMO ISAC συστήματα, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για περαιτέρω έρευνα.
2. Την ποσοτική ανάλυση των επιδόσεων αυτών των συστημάτων σε διάφορα σενάρια, παρέχοντας χρήσιμες πληροφορίες για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίησή τους.
3. Την ανάδειξη του δυναμικού των RIS για την ενίσχυση των λειτουργιών ISAC, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με δυσμενείς συνθήκες διάδοσης.

1.3 Μεθοδολογία

Η ερευνητική μεθοδολογία της παρούσας διπλωματικής βασίζεται στην ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός λεπτομερούς μοντέλου προσομοίωσης για τα RIS-assisted MIMO ISAC συστήματα. Αρχικά, πραγματοποιείται εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση για την κατανόηση των βασικών αρχών και των τελευταίων εξελίξεων στις τεχνολογίες MIMO, ISAC και RIS.

Στη συνέχεια, αναπτύσσεται ένα μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά του καναλιού, συμπεριλαμβανομένων:

- Της μοντελοποίησης των MIMO καναλιών με πολλαπλές κεραίες εκπομπής και λήψης
- Της ενσωμάτωσης των επιδράσεων των RIS στη διάδοση του σήματος
- Της μοντελοποίησης των σκεδαστών και της πολυδιαδρομικής διάδοσης
- Της ενοποίησης των λειτουργιών επικοινωνίας και ανίχνευσης στο ίδιο σύστημα

Το μοντέλο υλοποιείται ως προσομοιωτής λογισμικού, επιτρέποντας τη συστηματική αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος υπό διάφορες συνθήκες και παραμέτρους. Μέσω εκτενών προσομοιώσεων, αναλύονται οι επιδόσεις του συστήματος και αξιολογούνται διάφορες στρατηγικές βελτιστοποίησης

1.4 Δομή της διπλωματικής

Η διάρθρωση της εργασίας ακολουθεί μια συστηματική ροή γνώσης. Το δεύτερο κεφάλαιο παρέχει το θεωρητικό υπόβαθρο, εξετάζοντας σε βάθος τα MIMO συστήματα, τις τεχνολογίες ISAC και τις Επαναδιαμορφώσιμες Ευφυείς Επιφάνειες (RIS). Αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας, τα χαρακτηριστικά και οι προκλήσεις κάθε τεχνολογίας.

Το τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζει τη μοντελοποίηση του RIS-assisted MIMO ISAC καναλιού, περιγράφοντας λεπτομερώς την αρχιτεκτονική του συστήματος, τη μαθηματική περιγραφή του καναλιού και τους αλγορίθμους βελτιστοποίησης. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η υλοποίηση της προσομοίωσης, συμπεριλαμβανομένων των εργαλείων, των παραμέτρων και των αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν.

Το πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, αναλύοντας τις επιδόσεις του συστήματος σε διάφορα σενάρια και συγκρίνοντάς τις με συμβατικά συστήματα. Το έκτο κεφάλαιο εμβαθύνει στην ανάλυση των παραμέτρων των RIS και την επίδρασή τους στις επιδόσεις του συστήματος, προτείνοντας τεχνικές βελτιστοποίησης. Τέλος, το έβδομο κεφάλαιο συνοψίζει τα κύρια συμπεράσματα, αποτιμά τη συνεισφορά της έρευνας και προτείνει κατευθύνσεις για μελλοντική περαιτέρω διερεύνηση.

2

Δίκτυα 6G και τεχνολογίες Cell-free

2.1 Δίκτυα 6G: Προκλήσεις και απαιτήσεις

2.1.1 Χαρακτηριστικά και στόχοι Δικτύων 6G

Η ραγδαία ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιακών συστημάτων έχει μεταμορφώσει τον τρόπο επικοινωνίας και αλληλεπίδρασης στον σύγχρονο κόσμο. Κάθε γενιά ασύρματων δικτύων έχει φέρει επαναστατικές καινοτομίες που διευρύνουν τις δυνατότητες της ασύρματης επικοινωνίας, από τα πρώιμα αναλογικά συστήματα πρώτης γενιάς (1G) μέχρι τα σημερινά δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G).

Τα δίκτυα 6G αναμένεται να υποστηρίξουν εξαιρετικά απαιτητικές προδιαγραφές, σημαντικά υψηλότερες από αυτές των δικτύων 5G. Συγκεκριμένα, τα βασικά χαρακτηριστικά και στόχοι των δικτύων 6G περιλαμβάνουν:

- **Ρυθμούς μετάδοσης:** Έως 1 Tbps, δηλαδή 50 φορές υψηλότερους από το 5G, επιτρέποντας εφαρμογές εξαιρετικά υψηλού εύρους ζώνης όπως εικονική πραγματικότητα χωρίς καθυστέρηση.
- **Καθυστερήση (latency):** Μικρότερη από 0.1 ms, σε σύγκριση με το 1 ms του 5G, καθιστώντας δυνατές εφαρμογές που απαιτούν απόκριση σε σχεδόν πραγματικό χρόνο.
- **Πυκνότητα συνδέσεων:** Έως 10^7 συσκευές/km², με αυτό να σημαίνει δεκαπλάσια από το 5G, υποστηρίζοντας το διαρκώς αυξανόμενο πλήθος συνδεδεμένων συσκευών στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT).
- **Αξιοπιστία:** Της τάξης του 99.99999% για κρίσιμες εφαρμογές, εξασφαλίζοντας αδιάλειπτη λειτουργία σε περιπτώσεις όπως αυτόνομα οχήματα ή απομακρυσμένη χειρουργική.
- **Φασματική απόδοση:** 3-4 φορές υψηλότερη από το 5G, βελτιστοποιώντας τη χρήση του περιορισμένου φάσματος ραδιοσυχνοτήτων.
- **Κάλυψη τρισδιάστατου χώρου:** Συμπεριλαμβάνοντας επίγειες, εναέριες και δορυφορικές επικοινωνίες, επεκτείνοντας τη συνδεσιμότητα σε περιοχές που παραδοσιακά είναι δύσκολο να καλυφθούν.
- **Ενεργειακή απόδοση:** 10-100 φορές καλύτερη από το 5G, συμβάλλοντας στη βιωσιμότητα και μειώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των τηλεπικοινωνιακών δικτύων.

- **Υποστήριξη κινητικότητας:** Έως 1000 km/h για εφαρμογές σε οχήματα υψηλής ταχύτητας, όπως τρένα και αεροσκάφη, εξασφαλίζοντας αδιάλειπτη συνδεσιμότητα.

Αυτά τα χαρακτηριστικά και οι στόχοι δεν είναι παρά νέες απαιτήσεις, οι οποίες καθιστούν απαραίτητη την ανάπτυξη νέων αρχιτεκτονικών δικτύων που ξεπερνούν τους περιορισμούς των παραδοσιακών κυψελωτών συστημάτων, καθώς η ύπαρξη σταθερών ορίων μεταξύ των κυψελών οδηγεί σε προβλήματα παρεμβολών στα όριά τους, ενώ η στατική ανάθεση χρηστών σε συγκεκριμένους σταθμούς βάσης περιορίζει την αποδοτική χρήση των πόρων του δικτύου.

Επιπλέον, στα δίκτυα 6G, η ανάγκη για ακριβή εντοπισμό θέσης και ανίχνευση αντικειμένων στο χώρο καθίσταται ολοένα και πιο σημαντική για πολλές εφαρμογές. Παραδοσιακά, αυτές οι λειτουργίες εκτελούνται από εξειδικευμένα συστήματα που λειτουργούν παράλληλα με τα συστήματα επικοινωνίας, οδηγώντας σε μη αποδοτική χρήση του περιορισμένου φάσματος συχνοτήτων.

2.1.2 Καινοτόμες τεχνολογίες και αρχιτεκτονικές

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων των δικτύων 6^{ης} γενιάς που έχουν τεθεί αλλά και την αντιμετώπιση των όποιων προκλήσεων προκύψουν, αναπτύσσονται συνεχώς νέες καινοτόμες τεχνολογίες και αρχιτεκτονικές. Οι κυριότερες από αυτές είναι:

- **Χρήση Κυμάτων THz και mmWave:** Η αξιοποίηση των συχνοτήτων στις ζώνες κυμάτων χιλιοστών (mmWave, 30-300 GHz) και τεραχέρτζ (THz, .1-10 THz) προσφέρει τεράστιο εύρος ζώνης, επιτρέποντας ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των Tbps [5,24]. Ωστόσο, αυτές οι συχνότητες αντιμετωπίζουν προκλήσεις όπως υψηλή εξασθένηση και ευαισθησία σε εμπόδια, απαιτώντας προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης και πυκνή ανάπτυξη κόμβων.
- **Massive MIMO και Cell-free Massive MIMO:** Η τεχνολογία Massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) επεκτείνεται περαιτέρω στα δίκτυα 6G, με εκατοντάδες ή χιλιάδες κεραιές σε κάθε σταθμό βάσης. Η εξέλιξη αυτής της προσέγγισης οδηγεί στο Cell-free Massive MIMO, όπου οι κατανεμημένες κεραιές συνεργάζονται για την εξυπηρέτηση των χρηστών, ξεπερνώντας τους περιορισμούς των παραδοσιακών κυψελωτών ορίων.
- **Ολοκληρωμένη Επικοινωνία και Τηλεπισκόπηση (ISAC):** Η συγχώνευση των λειτουργιών επικοινωνίας και ανίχνευσης/εντοπισμού σε ένα ενιαίο σύστημα επιτρέπει την αποδοτικότερη χρήση των πόρων, βελτιωμένη ακρίβεια εντοπισμού και νέες εφαρμογές που απαιτούν ταυτόχρονη ανταλλαγή δεδομένων και αντίληψη του περιβάλλοντος.
- **Επαναδιαμορφώσιμες Ευφυείς Επιφάνειες (RIS):** Αυτή η αναδυόμενη τεχνολογία επιτρέπει τον δυναμικό έλεγχο του ασύρματου περιβάλλοντος διάδοσης μέσω παθητικών, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας επιφανειών που μπορούν να αλλάζουν τις ιδιότητες ανάκλασης και διάθλασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.
- **Δίκτυα Ορισμένα από Λογισμικό και Εικονικοποίηση:** Η εικονικοποίηση των λειτουργιών δικτύου (Network Function Virtualization - NFV) και τα δίκτυα ορισμένα από λογισμικό (Software Defined Networking - SDN) επιτρέπουν ευέλικτη, προγραμματιζόμενη και δυναμική διαχείριση των πόρων δικτύου, προσαρμοζόμενη στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις.
- **Κβαντικές Επικοινωνίες και Υπολογιστική:** Η αξιοποίηση κβαντικών ιδιοτήτων όπως η διεμπλοκή (entanglement) και η υπέρθεση (superposition) για εξαιρετικά ασφαλείς

επικοινωνίες και υπολογιστική δύναμη που μπορεί να επιταχύνει τη διαχείριση πολύπλοκων λειτουργιών δικτύου.

- **Ενσωμάτωση Τεχνητής Νοημοσύνης και Μηχανικής Μάθησης:** Η TN και η MM ενσωματώνονται βαθύτερα στα δίκτυα 6G, επιτρέποντας έξυπνη διαχείριση πόρων, πρόβλεψη κίνησης, αυτονομία δικτύου και προσωποποιημένες υπηρεσίες.
- **Ολογραφικές Επικοινωνίες και Διεπαφές:** Οι τρισδιάστατες ολογραφικές επικοινωνίες και διεπαφές αναμένεται να αποτελέσουν μια καινοτόμο εφαρμογή των δικτύων 6G, απαιτώντας εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, χαμηλή καθυστέρηση και ακριβή συγχρονισμό.
- **Δίκτυα Μη Γήινων Πλατφορμών (NTN):** Η ενσωμάτωση δορυφορικών, στρατοσφαιρικών και εναέριων πλατφορμών επικοινωνίας με επίγεια δίκτυα για την επίτευξη πραγματικά καθολικής κάλυψης.

Ειδικότερα, το Cell-free Massive MIMO αναδεικνύεται ως μία από τις πιο υποσχόμενες αρχιτεκτονικές για τα δίκτυα 6G, καθώς προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά τη χωρητικότητα, την κάλυψη και την αξιοπιστία. Η προσέγγιση αυτή καταργεί τα παραδοσιακά κυψελωτά όρια, επιτρέποντας τη συνεργατική εξυπηρέτηση των χρηστών από πολλαπλά σημεία πρόσβασης, βελτιστοποιώντας έτσι την απόδοση του συστήματος και μειώνοντας τις παρεμβολές.

2.2 Δίκτυα δίχως κυψέλες (Cell-free)

2.2.1 Αρχιτεκτονική και βασικές αρχές

Τα δίκτυα δίχως κυψέλες (cell-free networks) αποτελούν μια καινοτόμο και πολλά υποσχόμενη αρχιτεκτονική για τα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα 6ης γενιάς (6G). Σε αντίθεση με την παραδοσιακή κυψελωτή αρχιτεκτονική, όπου κάθε χρήστης εξυπηρετείται από έναν σταθμό βάσης και η περιοχή κάλυψης χωρίζεται σε διακριτές κυψέλες, στα δίκτυα δίχως κυψέλες πολλαπλοί καταναμημένοι σταθμοί βάσης συνεργάζονται για να εξυπηρετήσουν ταυτόχρονα όλους τους χρήστες του δικτύου σε μια ενιαία περιοχή κάλυψης.

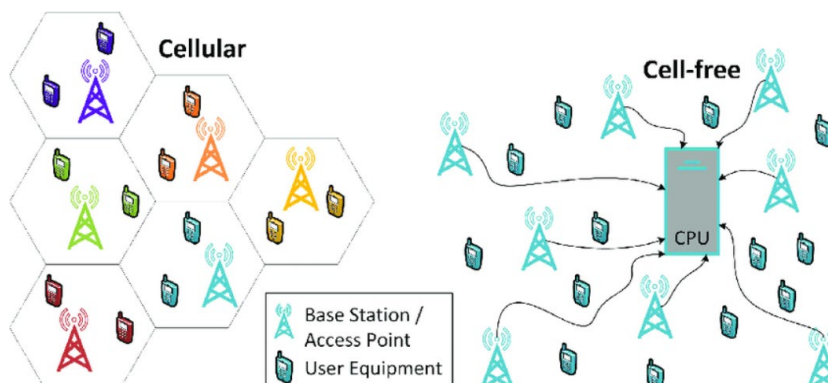
Η βασική αρχιτεκτονική των δικτύων δίχως κυψέλες περιλαμβάνει τα εξής κύρια στοιχεία:

1. **Σημεία Πρόσβασης (Access Points – APs, ή Radio Units – RUs στην ορολογία του Open RAN):** Πρόκειται για καταναμημένους σταθμούς βάσης που είναι τυπικά μικρότεροι, απλούστεροι και φθηνότεροι σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς σταθμούς βάσης κυψελωτών δικτύων. Τα APs είναι εξοπλισμένα με πολλαπλές κεραίες (massive MIMO) και κατανέμονται σε μια γεωγραφική περιοχή με πυκνό τρόπο, σχηματίζοντας ένα πλέγμα σημείων πρόσβασης.
2. **Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (Central Processing Unit – CPU ή Distributed Unit - DU):** Η CPU είναι υπεύθυνη για τον συντονισμό και τη διαχείριση των APs, καθώς και για την από κοινού επεξεργασία των σημάτων από και προς τους χρήστες. Συλλέγει τις πληροφορίες καναλιού και τα δεδομένα από όλα τα APs, εφαρμόζει αλγορίθμους για τη βέλτιστη κατανομή των ραδιοπόρων και τον έλεγχο παρεμβολών, και στέλνει τα προκύπτοντα σήματα πίσω στα APs για εκπομπή.
3. **Δίκτυο Οπισθόζευξης (Backhaul Network):** Το δίκτυο οπισθόζευξης συνδέει τα APs με την CPU μέσω οπτικών ινών ή ασύρματων ζεύξεων υψηλής χωρητικότητας και χαμηλής

καθυστερήσης. Η ποιότητα και η χωρητικότητα αυτού του δικτύου είναι κρίσιμης σημασίας για την απόδοση του συνολικού συστήματος, καθώς πρέπει να υποστηρίζει τη μετάδοση μεγάλων όγκων δεδομένων και πληροφοριών καναλιού με ελάχιστη καθυστέρηση.

Ακόμη, οι βασικές αρχές λειτουργίας των δικτύων δίχως κυψέλες περιλαμβάνουν:

1. **Συνεργατική Επεξεργασία Σήματος:** Πολλαπλά APs συνεργάζονται για την εξυπηρέτηση κάθε χρήστη, συνδυάζοντας τα σήματά τους και εφαρμόζοντας τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης για τη βελτιστοποίηση της ποιότητας σήματος και τη μείωση των παρεμβολών.
2. **Δυναμική Ανάθεση Πόρων:** Η κατανομή των ραδιοπόρων (συχνότητες, χρονοθυρίδες, κώδικες) στους χρήστες γίνεται δυναμικά, με βάση τις τρέχουσες συνθήκες καναλιού, τις απαιτήσεις κίνησης και τη θέση των χρηστών, μεγιστοποιώντας την συνολική απόδοση του συστήματος.
3. **Χωρίς Όρια Κυψέλων:** Δεν υπάρχουν προκαθορισμένα όρια που να χωρίζουν την περιοχή κάλυψης σε διακριτές κυψέλες. Αντίθετα, η περιοχή εξυπηρέτησης αποτελεί ένα συνεχές πεδίο όπου οι χρήστες μπορούν να μετακινούνται ελεύθερα χωρίς να απαιτείται η παραδοσιακή διαδικασία μεταπομπής (handover).
4. **Εξατομικευμένη Εξυπηρέτηση:** Κάθε χρήστης λαμβάνει εξατομικευμένη εξυπηρέτηση από ένα σύνολο APs που επιλέγονται με βάση τις συνθήκες καναλιού, τη θέση του και τις απαιτήσεις της υπηρεσίας του, σε αντίθεση με την παραδοσιακή προσέγγιση όπου ένας σταθμός βάσης εξυπηρετεί όλους τους χρήστες εντός της κυψέλης του.
5. **Κλιμακούμενη Αρχιτεκτονική:** Η αρχιτεκτονική των δικτύων δίχως κυψέλες επιτρέπει την εύκολη επέκταση της κάλυψης και της χωρητικότητας με την προσθήκη περισσότερων APs, χωρίς την ανάγκη για πολύπλοκο σχεδιασμό κυψελών και διαχείριση παρεμβολών μεταξύ κυψελών.



Σχήμα 1: Διαφορές δικτύων χωρίς κυψέλες & με κυψέλες

Αυτές οι αρχές καθιστούν τα δίκτυα δίχως κυψέλες ιδιαίτερα κατάλληλα για τα μελλοντικά συστήματα 6G, τα οποία θα αντιμετωπίσουν αυξημένες απαιτήσεις σε όρους χωρητικότητας, κάλυψης, αξιοπιστίας και υποστήριξης υπηρεσιών υψηλής ποιότητας για ένα τεράστιο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών.

2.2.2 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις

Τα δίκτυα δίχως κυψέλες προσφέρουν πολλά σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παραδοσιακά κυψελωτά δίκτυα. Ωστόσο, η υλοποίησή τους συνοδεύεται και από διάφορες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων τους.

2.2.2.1 Πλεονεκτήματα

1. **Βελτιωμένη Φασματική Απόδοση και Χωρητικότητα:** Η συνεργατική εξυπηρέτηση των χρηστών από πολλαπλά APs επιτρέπει την αποδοτικότερη χρήση των διαθέσιμων ραδιοπόρων και την εξάλειψη των παρεμβολών μεταξύ γειτονικών κυψελών. Με τον κατάλληλο συντονισμό και έλεγχο από την CPU, τα APs μπορούν να δημιουργήσουν εξατομικευμένες και κατευθυντικές ζεύξεις με κάθε χρήστη, μεγιστοποιώντας την επαναχρησιμοποίηση του φάσματος και ελαχιστοποιώντας τις αμοιβαίες παρεμβολές. Αυτό οδηγεί σε σημαντική αύξηση της συνολικής χωρητικότητας του δικτύου, με βελτιώσεις έως και 10 φορές σε σύγκριση με τα συμβατικά κυψελωτά συστήματα.
2. **Ομοιόμορφη Κάλυψη και Ποιότητα Υπηρεσίας:** Στα παραδοσιακά κυψελωτά δίκτυα, οι χρήστες που βρίσκονται στα άκρα των κυψελών συχνά αντιμετωπίζουν χαμηλότερη ποιότητα σήματος και υψηλότερα επίπεδα παρεμβολών, λόγω της μεγάλης απόστασης από τον εξυπηρετούμενο σταθμό βάσης και της επικάλυψης από γειτονικές κυψέλες. Αντίθετα, στα δίκτυα δίχως κυψέλες, η πυκνή κατανομή των APs και η συνεργατική εξυπηρέτηση εξασφαλίζουν ότι κάθε χρήστης, ανεξάρτητα από τη θέση του, λαμβάνει υψηλής ποιότητας υπηρεσία από πολλαπλά κοντινά APs ταυτόχρονα, οδηγώντας σε πιο ομοιόμορφη κατανομή του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων σε όλη την περιοχή κάλυψης.
3. **Αυξημένη Αξιοπιστία και Ανθεκτικότητα:** Η κατανεμημένη αρχιτεκτονική των δικτύων δίχως κυψέλες, με πολλαπλά APs να εξυπηρετούν κάθε χρήστη, παρέχει εγγενή πλεονασμό και προστασία από τυχόν βλάβες ή αστοχίες μεμονωμένων στοιχείων του δικτύου. Ακόμη και αν ένα AP τεθεί εκτός λειτουργίας, οι χρήστες μπορούν να συνεχίσουν να λαμβάνουν υπηρεσία από τα υπόλοιπα γειτονικά APs χωρίς διακοπή. Αυτή η ανθεκτικότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική για κρίσιμες εφαρμογές που απαιτούν υψηλή διαθεσιμότητα και αδιάλειπτη λειτουργία, όπως σε ιατρικές, βιομηχανικές ή επείγουσας ανάγκης επικοινωνίες.
4. **Ομαλή Υποστήριξη Κινητικότητας:** Στα παραδοσιακά κυψελωτά δίκτυα, όταν ένας χρήστης μετακινείται από μια κυψέλη σε άλλη, πρέπει να πραγματοποιηθεί μια διαδικασία μεταπομπής (handover) για τη μεταφορά της σύνδεσης στον νέο σταθμό βάσης. Αυτή η διαδικασία μπορεί να προκαλέσει προσωρινές διακοπές ή υποβάθμιση της ποιότητας υπηρεσίας. Αντίθετα, στα δίκτυα δίχως κυψέλες, καθώς ο χρήστης κινείται, το σύνολο των APs που τον εξυπηρετούν προσαρμόζεται δυναμικά και χωρίς διακοπές, διατηρώντας μια σταθερή και υψηλής ποιότητας σύνδεση σε όλη τη διάρκεια της κίνησης. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές που απαιτούν αδιάλειπτη συνδεσιμότητα, όπως η εικονική/επαυξημένη πραγματικότητα ή τα αυτόνομα οχήματα.
5. **Ενεργειακή Αποδοτικότητα:** Τα δίκτυα δίχως κυψέλες μπορούν να επιτύχουν υψηλότερη ενεργειακή απόδοση σε σύγκριση με τα παραδοσιακά κυψελωτά συστήματα. Η συνεργατική μετάδοση από πολλαπλά APs επιτρέπει τη μείωση της συνολικής εκπεμπόμενης ισχύος, καθώς το σήμα μπορεί να εστιαστεί προς συγκεκριμένους χρήστες με μεγαλύτερη ακρίβεια. Επιπλέον,

η δυνατότητα ενεργοποίησης και απενεργοποίησης APs με βάση τη ζήτηση και τις συνθήκες κίνησης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, συμβάλλοντας στη βιωσιμότητα και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των δικτύων 6G.

2.2.2.2 Προκλήσεις

1. **Αυξημένη Πολυπλοκότητα και Υπολογιστικός Φόρτος:** Μια από τις κύριες προκλήσεις των δικτύων δίχως κυψέλες είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα και ο υπολογιστικός φόρτος που απαιτούνται για τον συντονισμό των πολυάριθμων APs και την από κοινού επεξεργασία σήματος σε πραγματικό χρόνο. Η CPU πρέπει να είναι σε θέση να συλλέγει και να επεξεργάζεται τεράστιους όγκους δεδομένων από όλα τα APs με πολύ χαμηλή καθυστέρηση, και να εφαρμόζει πολύπλοκους αλγορίθμους βελτιστοποίησης για την κατανομή των ραδιοπόρων και τη διαμόρφωση των ζεύξεων. Αυτό απαιτεί προηγμένο υλικό και λογισμικό, καθώς και νέα πρότυπα και πρωτόκολλα επικοινωνίας για την αποδοτική ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των APs και της CPU.
2. **Ανάγκη για Απόλυτο Συγχρονισμό:** Για να επιτευχθεί η συνεργατική εξυπηρέτηση των χρηστών και ο ακριβής συνδυασμός των σημάτων από πολλαπλά APs, όλα τα στοιχεία του δικτύου πρέπει να λειτουργούν με πλήρη συγχρονισμό, τόσο σε επίπεδο συχνότητας όσο και σε επίπεδο χρόνου. Τυχόν αποκλίσεις ή καθυστερήσεις στη μετάδοση των σημάτων μπορεί να υποβαθμίσουν σημαντικά την απόδοση και την αξιοπιστία του δικτύου. Για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, απαιτούνται προηγμένες τεχνικές συγχρονισμού και ακριβείς μηχανισμοί εκτίμησης και διόρθωσης των καθυστερήσεων διάδοσης, ιδιαίτερα σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές.
3. **Απαιτήσεις Δικτύου Οπισθόζευξης:** Η λειτουργία των δικτύων δίχως κυψέλες απαιτεί ένα εξαιρετικά αποδοτικό δίκτυο οπισθόζευξης για τη σύνδεση των APs με την CPU. Το δίκτυο αυτό πρέπει να παρέχει υψηλή χωρητικότητα (της τάξης των Gbps ή Tbps), ελάχιστη καθυστέρηση (κάτω από 1 ms) και υψηλή αξιοπιστία για τη μεταφορά των δεδομένων καναλιού, των πληροφοριών ελέγχου και των δεδομένων χρήστη. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου δικτύου οπισθόζευξης, ειδικά σε αγροτικές ή απομακρυσμένες περιοχές, μπορεί να είναι τεχνικά και οικονομικά προκλητική.
4. **Κόστος και Πολυπλοκότητα Εγκατάστασης:** Η ανάπτυξη δικτύων δίχως κυψέλες εγείρει ζητήματα κόστους και πολυπλοκότητας εγκατάστασης. Για να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση και κάλυψη, απαιτείται η εγκατάσταση ενός πυκνού δικτύου από πολυάριθμα APs, b μέσω οπτικών ινών ή ασύρματων ζεύξεων υψηλής χωρητικότητας. Αυτό μπορεί να αποτελέσει σημαντική επένδυση για τους παρόχους δικτύου, τόσο όσον αφορά τον εξοπλισμό όσο και την εργασία εγκατάστασης και συντήρησης. Ωστόσο, η αυξανόμενη ζήτηση για συνδεσιμότητα υψηλής ποιότητας και οι νέες ευκαιρίες που προσφέρουν οι τεχνολογίες 5G και 6G αναμένεται να δικαιολογήσουν αυτές τις επενδύσεις μακροπρόθεσμα.
5. **Διαχείριση Παρεμβολών:** Παρά την εξάλειψη των παρεμβολών στα όρια των κυψελών, τα δίκτυα δίχως κυψέλες αντιμετωπίζουν νέες προκλήσεις στη διαχείριση παρεμβολών, ιδίως σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας χρηστών και APs. Η ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών από πολλαπλά APs απαιτεί προηγμένους αλγορίθμους ελέγχου παρεμβολών και

τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης για τη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος.

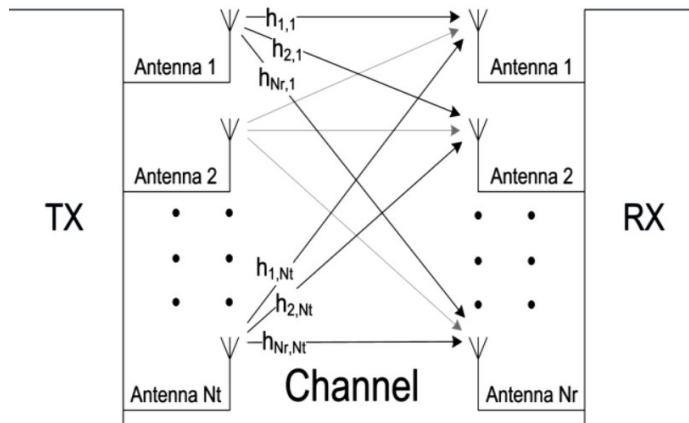
6. **Ζητήματα Ασφάλειας και Ιδιωτικότητας:** Η κατανομημένη φύση των δικτύων δίχως κυψέλες, με πολλαπλά APs να συλλέγουν και να ανταλλάσσουν δεδομένα για κάθε χρήστη, εγείρει νέες προκλήσεις στον τομέα της ασφάλειας και της προστασίας της ιδιωτικότητας. Απαιτούνται ισχυροί μηχανισμοί κρυπτογράφησης, αυθεντικοποίησης και ελέγχου πρόσβασης για την προστασία των δεδομένων και της ιδιωτικότητας των χρηστών σε αυτό το πιο σύνθετο περιβάλλον δικτύου.

Παρά τις προκλήσεις αυτές, οι συνεχείς ερευνητικές προσπάθειες και οι τεχνολογικές εξελίξεις αναμένεται να οδηγήσουν σε λύσεις που θα επιτρέψουν την ευρεία υιοθέτηση των δικτύων δίχως κυψέλες στα μελλοντικά συστήματα 6G, αξιοποιώντας πλήρως τα σημαντικά πλεονεκτήματά τους.

2.3 Συστήματα MIMO σε περιβάλλοντα δίχως κυψέλες

2.3.1 Βασικές αρχές MIMO

Τα συστήματα MIMO αποτελούν μια προηγμένη τεχνολογία ασύρματων επικοινωνιών που αξιοποιεί πολλαπλές κεραίες τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη για τη βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας των ασύρματων ζευξέων. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά συστήματα μονής κεραίας, τα MIMO εκμεταλλεύονται τη χωρική διάσταση του καναλιού, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα σε όρους χωρητικότητας, αξιοπιστίας και φασματικής απόδοσης.



Σχήμα 2: Τοπολογία MIMO περιβάλλοντος

2.3.1.1 Μαθηματική Περιγραφή MIMO

Στα συστήματα MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), η μαθηματική περιγραφή του καναλιού αποτελεί τη βάση για την κατανόηση της λειτουργίας τους. Ένα τυπικό σύστημα MIMO με N_t κεραίες εκπομπής και N_r κεραίες λήψης μπορεί να περιγραφεί από την εξής σχέση:

$$y = H \times x + n$$

όπου:

- $y \in \mathbb{C}^{(N_r \times 1)}$ είναι το διάνυσμα λαμβανόμενου σήματος

- $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{(N_t \times 1)}$ είναι το διάνυσμα εκπεμπόμενου σήματος
- $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{(N_r \times N_t)}$ είναι ο πίνακας καναλιού MIMO
- $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^{(N_r \times 1)}$ είναι το διάνυσμα πρόσθετου λευκού γκαουσιανού θορύβου (AWGN)

Ο πίνακας καναλιού $\mathbf{H}$ περιέχει τους συντελεστές $h_{(i,j)}$ που αντιπροσωπεύουν την απόκριση καναλιού μεταξύ της j -οστής κεραίας εκπομπής και της i -οστής κεραίας λήψης:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{(1,1)} & h_{(1,2)} & \dots & h_{(1,N_t)} \\ h_{(2,1)} & h_{(2,2)} & \dots & h_{(2,N_t)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{(N_r,1)} & h_{(N_r,2)} & \dots & h_{(N_r,N_t)} \end{bmatrix}$$

Επιπλέον, η χωρητικότητα του καναλιού MIMO, που εκφράζει το θεωρητικό άνω όριο του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, δίνεται από τη σχέση:

$$C = B \times \log_2 \left| I_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} \times \mathbf{H} \times \mathbf{H}^H \right|$$

όπου:

- B είναι το διαθέσιμο εύρος ζώνης (Hz)
- I_{N_r} είναι ο μοναδιαίος πίνακας διαστάσεων $N_r \times N_r$
- ρ είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR)
- $\mathbf{H}^H$ είναι ο αναστροφοςυζηγής πίνακας του $\mathbf{H}$

Για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης, εφαρμόζεται ανάλυση ιδιαζουσών τιμών (SVD) στον πίνακα καναλιού:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \times \mathbf{\Sigma} \times \mathbf{V}^H$$

όπου:

- $\mathbf{U} \in \mathbb{C}^{(N_r \times N_r)}$ και $\mathbf{V} \in \mathbb{C}^{(N_t \times N_t)}$ είναι ορθομοναδιαίοι πίνακες
- $\mathbf{\Sigma} \in \mathbb{R}^{(N_r \times N_t)}$ είναι διαγώνιος πίνακας που περιέχει τις ιδιάζουσες τιμές $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_{\min(N_t, N_r)} \geq 0$

Αυτή η ανάλυση επιτρέπει τη διάσπαση του καναλιού MIMO σε $\min(N_t, N_r)$ παράλληλα κανάλια με κέρδη $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_{\min(N_t, N_r)}^2$, επιτρέποντας την εφαρμογή τεχνικών χωρικής πολυπλεξίας και διαμόρφωσης δέσμης για τη μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης ή της αξιοπιστίας του συστήματος.

2.3.1.2 Βασικά Πλεονεκτήματα MIMO

Τα συστήματα MIMO προσφέρουν τέσσερα κύρια πλεονεκτήματα που αποτελούν τη βάση της ευρείας υιοθέτησής τους:

1. **Κέρδος Πολλαπλότητας (Multiplexing Gain):** Τα MIMO συστήματα επιτρέπουν την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών ανεξάρτητων ροών δεδομένων στο ίδιο κανάλι, αυξάνοντας τη φασματική απόδοση. Η χωρητικότητα ενός καναλιού MIMO μπορεί να προσεγγιστεί με τον τύπο που αναφέρθηκε παραπάνω. Σε ιδανικές συνθήκες, η χωρητικότητα αυξάνεται γραμμικά

ως και $\min(N_t, N_r)$ φορές, παρέχοντας σημαντική βελτίωση σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα μονής κεραίας.

2. **Κέρδος Διαφορισιμότητας (Diversity Gain):** Η χρήση πολλαπλών κεραιών επιτρέπει τη λήψη πολλαπλών εκδοχών του ίδιου σήματος μέσω διαφορετικών διαδρομών, μειώνοντας την πιθανότητα βαθιάς διάλειψης (deep fading). Το μέγιστο κέρδος διαφορισιμότητας ενός συστήματος MIMO είναι $N_t \times N_r$, το οποίο μεταφράζεται σε εκθετική μείωση της πιθανότητας διακοπής (outage probability).
3. **Κέρδος Συστοιχίας (Array Gain):** Η συνδυαστική επεξεργασία των σημάτων από πολλαπλές κεραίες επιτρέπει την αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR). Το κέρδος συστοιχίας είναι ανάλογο του αριθμού των κεραιών και μπορεί να προσεγγίσει την τιμή $10\log_{10}(N_t \times N_r)$ dB υπό ιδανικές συνθήκες.
4. **Μείωση Παρεμβολών (Interference Reduction):** Τα MIMO συστήματα μπορούν να αξιοποιήσουν τις χωρικές διαστάσεις για να διαχωρίσουν τα επιθυμητά σήματα από τις παρεμβολές, βελτιώνοντας την ποιότητα σήματος σε περιβάλλοντα με υψηλά επίπεδα παρεμβολών.

2.3.1.3 Τεχνικές MIMO

Για την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων των MIMO συστημάτων, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές επεξεργασίας σήματος:

1. **Χωρική Πολυπλεξία (Spatial Multiplexing):** Επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών ανεξάρτητων ροών δεδομένων στο ίδιο κανάλι, αυξάνοντας τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Απαιτεί καλές συνθήκες καναλιού και υψηλό SNR για αποτελεσματική λειτουργία.
2. **Διαμόρφωση Δέσμης (Beamforming):** Χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραίες για να κατευθύνει το σήμα προς συγκεκριμένες κατευθύνσεις, αυξάνοντας το κέρδος συστοιχίας και μειώνοντας τις παρεμβολές. Ιδιαίτερα αποτελεσματική σε καταστάσεις με χαμηλό SNR.
3. **Κωδικοποίηση Χώρου-Χρόνου (Space-Time Coding):** Εισάγει πλεονασμό μεταξύ των σημάτων που μεταδίδονται από διαφορετικές κεραίες και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, βελτιώνοντας την αξιοπιστία και το κέρδος διαφορισιμότητας.
4. **Προκωδικοποίηση (Precoding):** Εφαρμόζει προεπεξεργασία στο σήμα εκπομπής βάσει της γνώσης του καναλιού για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης μετάδοσης, είτε μεγιστοποιώντας τον ρυθμό δεδομένων είτε ελαχιστοποιώντας το ποσοστό σφαλμάτων.

Η εξέλιξη των MIMO συστημάτων έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη των Massive MIMO συστημάτων, που χρησιμοποιούν εκατοντάδες ή χιλιάδες κεραίες, και αποτελούν βασικό συστατικό των δικτύων 5G και 6G.

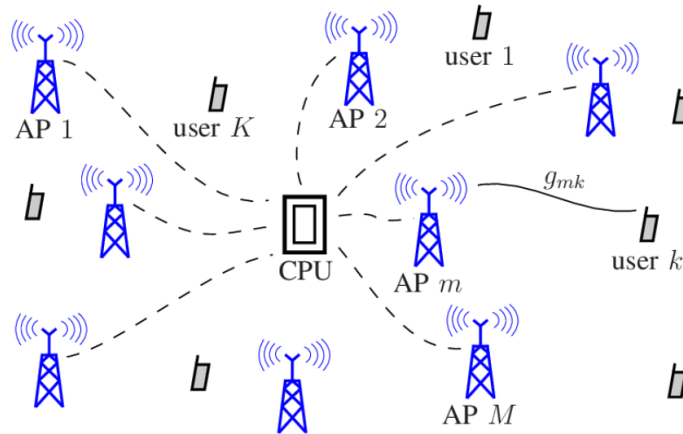
2.3.2 Cell-free Massive MIMO

Το Cell-free Massive MIMO αποτελεί μια επαναστατική εξέλιξη που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δικτύων δίχως κυψέλες με την τεχνολογία Massive MIMO. Σε αυτή την αρχιτεκτονική, πολλά καταναμεμημένα σημεία πρόσβασης (APs), καθένα εξοπλισμένο με πολλαπλές κεραίες, συνεργάζονται

για την εξυπηρέτηση όλων των χρηστών σε μια περιοχή κάλυψης, χωρίς προκαθορισμένα κυψελωτά όρια.

2.3.2.1 Αρχιτεκτονική Cell-free Massive MIMO

Σε ένα τυπικό σύστημα Cell-free Massive MIMO, υπάρχουν τα εξής βασικά στοιχεία:



Σχήμα 3: Τοπολογία Cell-free Massive MIMO

1. **Σημεία Πρόσβασης (APs):** Πολλαπλά απλά APs, καθένα εξοπλισμένο με λίγες έως αρκετές δεκάδες κεραίες, καταναμημένα σε μια γεωγραφική περιοχή. Ο συνολικός αριθμός κεραιών στο σύστημα είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αριθμό των εξυπηρετούμενων χρηστών.
2. **Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (CPU):** Συντονίζει τη λειτουργία των APs και εκτελεί από κοινού επεξεργασία των σημάτων για την εξυπηρέτηση όλων των χρηστών. Μπορεί να εφαρμόζει διάφορους αλγορίθμους συνδυασμού και προκωδικοποίησης για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος.
3. **Δίκτυο Οπισθόφυξης:** Συνδέει τα APs με την CPU για την ανταλλαγή δεδομένων, πληροφοριών καναλιού και σημάτων ελέγχου. Η ποιότητα αυτού του δικτύου παίζει κρίσιμο ρόλο στην απόδοση του συνολικού συστήματος.
4. **Τερματικές Συσκευές Χρηστών:** Συσκευές με περιορισμένο αριθμό κεραιών (συνήθως 1-4) που εξυπηρετούνται ταυτόχρονα από πολλαπλά APs.

2.3.2.2 Πλεονεκτήματα Cell-free Massive MIMO

Το Cell-free Massive MIMO προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση τόσο με τα συμβατικά κυψελωτά Massive MIMO όσο και με τα απλά δίκτυα δίχως κυψέλες:

1. **Εξαιρετική Φασματική Απόδοση:** Συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα των Massive MIMO και των δικτύων δίχως κυψέλες, επιτυγχάνεται σημαντικά υψηλότερη φασματική απόδοση, ιδιαίτερα για τους χρήστες στα άκρα των παραδοσιακών κυψελών.
2. **Αυξημένο Κέρδος Διαφορισιμότητας:** Η συνεργατική εξυπηρέτηση από πολλαπλά APs παρέχει ισχυρό κέρδος μακρο-διαφορισιμότητας, καθώς οι χρήστες μπορούν να επικοινωνούν

με πολλά APs σε διαφορετικές τοποθεσίες, μειώνοντας δραστικά την πιθανότητα βαθιάς εξασθένησης.

3. **Κλιμακωσιμότητα:** Η αρχιτεκτονική επιτρέπει εύκολη επέκταση της κάλυψης και της χωρητικότητας με την προσθήκη περισσότερων APs, χωρίς την ανάγκη για πολύπλοκο σχεδιασμό κυψελών.
4. **Απλούστερη Εκτίμηση Καναλιού:** Λόγω της κατανεμημένης φύσης του συστήματος, κάθε AP χρειάζεται να εκτιμήσει μόνο τα κανάλια με τους κοντινούς χρήστες, απλοποιώντας τη διαδικασία εκτίμησης καναλιού σε σχέση με τα συγκεντρωτικά Massive MIMO συστήματα.
5. **Μειωμένη Ακτινοβολούμενη Ισχύς:** Λόγω της κοντινής απόστασης μεταξύ APs και χρηστών, το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει με χαμηλότερα επίπεδα ισχύος εκπομπής, βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση και μειώνοντας τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

2.3.2.3 Προκλήσεις Cell-free Massive MIMO

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, το Cell-free Massive MIMO αντιμετωπίζει και διάφορες προκλήσεις:

1. **Απαιτήσεις Δικτύου Οπισθόζευξης:** Η ανάγκη για υψηλής χωρητικότητας, χαμηλής καθυστέρησης δίκτυο οπισθόζευξης μεταξύ των APs και της CPU είναι μια σημαντική πρόκληση, ιδιαίτερα καθώς αυξάνεται ο αριθμός των APs και των χρηστών.
2. **Πολυπλοκότητα Επεξεργασίας Σήματος:** Η από κοινού επεξεργασία των σημάτων από πολλαπλά APs για όλους τους χρήστες απαιτεί σημαντική υπολογιστική ισχύ και μπορεί να γίνει πολύ πολύπλοκη καθώς κλιμακώνεται το σύστημα.
3. **Συγχρονισμός:** Η ανάγκη για ακριβή συγχρονισμό μεταξύ των APs σε επίπεδο συχνότητας και χρόνου είναι κρίσιμη για την αποτελεσματική συνεργατική επεξεργασία σήματος.
4. **Επιβάρυνση Εκτίμησης Καναλιού:** Η εκτίμηση των καναλιών μεταξύ όλων των APs και όλων των χρηστών μπορεί να προκαλέσει σημαντική επιβάρυνση, ιδιαίτερα σε συστήματα με μεγάλο αριθμό APs και χρηστών.
5. **Τεχνικές και Αλγόριθμοι Κατανεμημένης Επεξεργασίας:** Η ανάπτυξη αποδοτικών αλγορίθμων που μπορούν να λειτουργήσουν με περιορισμένη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των APs είναι απαραίτητη για πρακτικά συστήματα.

Συνολικά, το Cell-free Massive MIMO αντιπροσωπεύει μια πολλά υποσχόμενη εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των MIMO συστημάτων και των δικτύων δίχως κυψέλες. Παρά τις προκλήσεις υλοποίησης, αναμένεται να διαδραματίσει κεντρικό ρόλο στα μελλοντικά δίκτυα 6G, προσφέροντας σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση, την κάλυψη και την αξιοπιστία.

2.3.3 Εφαρμογές και περιορισμοί

Τα MIMO συστήματα σε περιβάλλοντα Cell-free προσφέρουν μια σειρά από καινοτόμες εφαρμογές, αλλά παρουσιάζουν και συγκεκριμένους περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό και την υλοποίηση πρακτικών συστημάτων.

2.3.3.1 Εφαρμογές

- **Αστικά Περιβάλλοντα Υψηλής Πυκνότητας:** Σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, όπου υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση χρηστών και απαίτηση για υψηλή χωρητικότητα, τα cell-free MIMO συστήματα μπορούν να παρέχουν σημαντικά υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και πιο ομοιόμορφη κάλυψη σε σύγκριση με τα παραδοσιακά κυψελωτά συστήματα.
- **Εφαρμογές Χαμηλής Καθυστέρησης:** Για εφαρμογές που απαιτούν εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, όπως η επαυξημένη/εικονική πραγματικότητα, τα αυτόνομα οχήματα και ο απομακρυσμένος έλεγχος, τα cell-free MIMO συστήματα μπορούν να προσφέρουν πιο αξιόπιστη και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνία λόγω της κοντινής απόστασης μεταξύ των χρηστών και των APs.
- **Έξυπνα Κτίρια και Βιομηχανικά Περιβάλλοντα:** Σε εσωτερικούς χώρους και βιομηχανικά περιβάλλοντα, όπου τα παραδοσιακά κυψελωτά συστήματα συχνά αντιμετωπίζουν προβλήματα κάλυψης, τα cell-free MIMO συστήματα μπορούν να παρέχουν αξιόπιστη και υψηλής χωρητικότητας κάλυψη για πολλαπλές συνδεδεμένες συσκευές και αισθητήρες.
- **Συνεργατικός Εντοπισμός και Χαρτογράφηση:** Συνδυάζοντας τις δυνατότητες εντοπισμού από πολλαπλά APs, τα cell-free MIMO συστήματα μπορούν να παρέχουν εξαιρετικά ακριβή εντοπισμό θέσης και χαρτογράφηση περιβάλλοντος, υποστηρίζοντας εφαρμογές όπως η πλοήγηση εσωτερικών χώρων και η ιχνηλάτηση περιουσιακών στοιχείων.
- **Ενεργειακά Αποδοτικές Επικοινωνίες IoT:** Για συσκευές IoT με περιορισμούς ενέργειας, τα cell-free MIMO συστήματα μπορούν να προσφέρουν αξιόπιστη επικοινωνία με χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος από τις συσκευές, λόγω της κοντινής απόστασης μεταξύ των συσκευών και των APs και της συνεργατικής λήψης.

2.3.3.2 Περιορισμοί

- **Κόστος Υποδομής:** Η ανάπτυξη ενός πυκνού δικτύου APs με πολλαπλές κεραιές και ένα εκτεταμένο δίκτυο οπισθόζευξης μπορεί να συνεπάγεται σημαντικό κόστος υποδομής, ιδιαίτερα κατά την αρχική ανάπτυξη.
- **Περιορισμοί Δικτύου Οπισθόζευξης:** Οι περιορισμοί στη χωρητικότητα, την καθυστέρηση και την αξιοπιστία του δικτύου οπισθόζευξης μπορεί να περιορίσουν την πρακτική απόδοση των cell-free MIMO συστημάτων, ιδιαίτερα σε σενάρια με μεγάλο αριθμό APs και χρηστών.
- **Υπολογιστική Πολυπλοκότητα:** Η από κοινού επεξεργασία σημάτων από πολλαπλά APs μπορεί να γίνει υπολογιστικά απαιτητική καθώς κλιμακώνεται το σύστημα, απαιτώντας προηγμένες τεχνικές καταμεμημένης επεξεργασίας και συμβιβασμούς μεταξύ απόδοσης και πολυπλοκότητας.
- **Επιβάρυνση Εκτίμησης Καναλιού:** Η εκτίμηση των καναλιών μεταξύ όλων των APs και όλων των χρηστών μπορεί να προκαλέσει σημαντική επιβάρυνση, μειώνοντας την αποδοτικότητα του συστήματος, ιδιαίτερα σε υψηλές συχνότητες όπου τα κανάλια μεταβάλλονται γρήγορα.
- **Ζητήματα Κινητικότητας:** Παρόλο που τα cell-free συστήματα εξαλείφουν την ανάγκη για παραδοσιακές μεταπομπές, η διαχείριση χρηστών υψηλής κινητικότητας παραμένει σημαντική πρόκληση. Η συνεχής αλλαγή του συνόλου των APs που εξυπηρετούν κάθε χρήστη, η γρήγορη

μεταβολή των καναλιών και η ανάγκη για συχνές εκτιμήσεις καναλιού μπορεί να δημιουργήσουν σημαντική επιβάρυνση και να περιορίσουν την απόδοση για χρήστες που κινούνται με υψηλές ταχύτητες.

- **Συγχρονισμός και Συνοχή Φάσης:** Η αποτελεσματική συνεργατική μετάδοση και λήψη απαιτεί ακριβή συγχρονισμό συχνότητας και φάσης μεταξύ των APs. Πρακτικοί περιορισμοί στην ακρίβεια του συγχρονισμού μπορεί να περιορίσουν την επιτεύξιμη απόδοση, ιδιαίτερα σε συστήματα που λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες.
- **Πολυπλοκότητα Διαχείρισης Δικτύου:** Η διαχείριση ενός πυκνού, κατανεμημένου δικτύου APs είναι πιο πολύπλοκη σε σύγκριση με τα παραδοσιακά κυψελωτά συστήματα, απαιτώντας προηγμένες τεχνικές αυτο-οργάνωσης, αυτο-βελτιστοποίησης και αυτο-επούλωσης για πρακτική λειτουργία.
- **Ζητήματα Ασφάλειας και Ιδιωτικότητας:** Η κατανεμημένη φύση των cell-free συστημάτων και η συνεργατική επεξεργασία δεδομένων από πολλαπλά σημεία εγείρει νέες ανησυχίες για την ασφάλεια και την ιδιωτικότητα, απαιτώντας νέες προσεγγίσεις για τη διασφάλιση της προστασίας των δεδομένων και της ανθεκτικότητας σε επιθέσεις.

Παρά τους παραπάνω περιορισμούς, οι συνεχείς ερευνητικές προσπάθειες και οι τεχνολογικές εξελίξεις στους τομείς των δικτύων οπτικών ινών, της κατανεμημένης επεξεργασίας, του συγχρονισμού και της τεχνητής νοημοσύνης αναμένεται να αντιμετωπίσουν σταδιακά αυτές τις προκλήσεις. Καθώς ωριμάζει η τεχνολογία, τα cell-free Massive MIMO συστήματα αναμένεται να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στα μελλοντικά δίκτυα 6G, παρέχοντας εξαιρετική απόδοση και καινοτόμες υπηρεσίες που δεν είναι εφικτές με τις παραδοσιακές κυψελωτές αρχιτεκτονικές [8,9].

3

Ολοκλήρωση Επικοινωνίας και Τηλεπισκόπησης

3.1 Βασικές αρχές ISAC

3.1.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

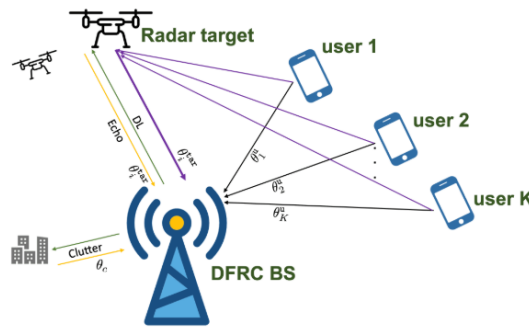
Η Ολοκληρωμένη/Ενοποιημένη Επικοινωνία και Τηλεπισκόπηση (Integrated Sensing and Communication - ISAC) αποτελεί μια καινοτόμο προσέγγιση που συνδυάζει τις λειτουργίες ασύρματης επικοινωνίας και ραντάρ/τηλεπισκόπησης σε μια ενιαία πλατφόρμα. Παραδοσιακά, οι δύο αυτές λειτουργίες υλοποιούνταν ως ξεχωριστά συστήματα, με διαφορετικές συσκευές, συχνότητες και πρωτόκολλα. Ωστόσο, η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση για φάσμα, η ανάγκη για αποδοτικότερη χρήση των πόρων και οι απαιτήσεις των μελλοντικών εφαρμογών 6G έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη αυτής της νέας παραδειγματικής προσέγγισης.

3.1.1.1 Βασικές έννοιες και ορισμοί

Επικοινωνία (Communication): Αφορά στη μετάδοση πληροφοριών μεταξύ πομπού και δέκτη μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Στα συμβατικά συστήματα επικοινωνίας, ο κύριος στόχος είναι η μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και η ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων μετάδοσης.

Τηλεπισκόπηση (Sensing): Περιλαμβάνει τη συλλογή πληροφοριών για το περιβάλλον μέσω της εκπομπής και λήψης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η τηλεπισκόπηση επιτρέπει τον εντοπισμό, την παρακολούθηση και την αναγνώριση αντικειμένων, καθώς και τη χαρτογράφηση του περιβάλλοντος.

Ολοκληρωμένη Επικοινωνία και Τηλεπισκόπηση (ISAC): Αποτελεί τη συγχώνευση των λειτουργιών επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης σε ένα ενιαίο σύστημα που μοιράζεται κοινούς πόρους (φάσμα, υλικό, επεξεργασία σήματος) για την ταυτόχρονη εκτέλεση και των δύο λειτουργιών.



Σχήμα 4: Διττή λειτουργία από κοινού επικοινωνίας & τηλεπισκόπησης

3.1.1.2 Ιστορική εξέλιξη του ISAC

Η ιδέα της ενοποίησης των λειτουργιών επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης δεν είναι εντελώς καινούργια. Οι πρώτες προσπάθειες χρονολογούνται από τη δεκαετία του 1960, με την ανάπτυξη συστημάτων που χρησιμοποιούσαν το ίδιο σήμα για βασικές λειτουργίες επικοινωνίας και ραντάρ. Ωστόσο, οι περιορισμοί στην υπολογιστική ισχύ και την τεχνολογία κεραιών εμπόδισαν την ευρεία υιοθέτησή τους.

Τα τελευταία χρόνια, με την ανάπτυξη των τεχνολογιών MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), των προηγμένων τεχνικών επεξεργασίας σήματος και της διαθεσιμότητας υψηλής υπολογιστικής ισχύος, η ιδέα της ISAC έχει αναζωογονηθεί. Η μετάβαση από τα δίκτυα 4G στα 5G, και τώρα προς τα 6G, έχει δημιουργήσει νέες απαιτήσεις και ευκαιρίες για την ISAC.

- **Δίκτυα 4G:** Επικέντρωση κυρίως σε επικοινωνία, με περιορισμένη υποστήριξη για λειτουργίες τηλεπισκόπησης.
- **Δίκτυα 5G:** Εισαγωγή πρώιμων εφαρμογών ISAC, κυρίως για εντοπισμό θέσης και βασική ανίχνευση.
- **Δίκτυα 6G:** Πλήρης ενσωμάτωση της ISAC ως βασικού συστατικού, υποστηρίζοντας προηγμένες λειτουργίες τηλεπισκόπησης, χαρτογράφησης και αναγνώρισης παράλληλα με αρκετά υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.

3.1.1.3 Θεωρητική Βάση ISAC

Η τεχνολογία ISAC βασίζεται στην παρατήρηση που πραγματοποιήθηκε και διαπιστώθηκε ότι τα συστήματα επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης έχουν πολλές κοινές βασικές αρχές και τεχνολογίες [2, □13]. Πιο συγκεκριμένα, τόσο η πλευρά της επικοινωνίας όσο και της ανίχνευσης βασίζονται στην διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, ενώ υπακούν στους ίδιους φυσικούς νόμους.

Ακόμη, οι δύο τεχνολογίες φαίνεται να διαθέτουν παρόμοιες αρχιτεκτονικές. Ειδικότερα, χρησιμοποιούν κεραίες για την εκπομπή και λήψη σημάτων, πραγματοποιούν ψηφιακή επεξεργασία σήματος για την εξαγωγή πληροφοριών, εκμεταλλεύονται τεχνικές MIMO για την βελτίωση της απόδοσης αλλά και διαμορφώνουν και κωδικοποιούν τα σήματα τους.

Επιπλέον, οι κοινές μαθηματικές αρχές που τις διέπουν αποτέλεσαν άλλον έναν λόγο που οδήγησε στην σκέψη της ενοποίησης τους, καθώς οι τεχνικές επεξεργασίας σήματος που χρησιμοποιούνται στην τηλεπισκόπηση και στην επικοινωνία βασίζονται σε παρόμοιες μαθηματικές αρχές και αλγορίθμους.

3.1.2 Πλεονεκτήματα ενοποίησης Επικοινωνίας και Ανίχνευσης

Λαμβάνοντας υπόψιν τα πλεονεκτήματα κάθε μίας τεχνολογίας ξεχωριστά και τα κοινά χαρακτηριστικά που διαθέτουν, η ενοποίηση της επικοινωνίας με την τηλεανίχνευση φαίνεται να προσφέρει πολλαπλά και σημαντικά οφέλη στην βελτιστοποίηση χρήσης του φάσματος, στην μείωση του κόστους και της πολυπλοκότητας του υλικού, στην βελτίωση της απόδοσης μέσω της συνεργασίας τους, στην ενεργειακή αποδοτικότητα και την βελτιωμένη ασφάλεια, αλλά θα επιφέρει και καινοτόμες εφαρμογές και υπηρεσίες. Αναλυτικά τα πλεονεκτήματα της ενοποίησης των δύο τεχνολογιών παρουσιάζονται στις παρακάτω παραγράφους.

3.1.2.1 Βελτιστοποίηση Χρήσης Φάσματος

Ένα από τα σημαντικότερα οφέλη της ISAC είναι η αποδοτικότερη χρήση του περιορισμένου ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Έτσι, αντί να διατίθενται ξεχωριστές ζώνες συχνοτήτων για επικοινωνία και τηλεπισκόπηση, το ίδιο φάσμα μπορεί να χρησιμοποιείται και για τις δύο λειτουργίες ταυτόχρονα. Αυτό οδηγεί σε:

- **Αυξημένη Φασματική Απόδοση:** Επιτυγχάνεται μέχρι και διπλάσια φασματική απόδοση σε σύγκριση με ξεχωριστά συστήματα.
- **Μείωση Παρεμβολών:** Η συντονισμένη χρήση του φάσματος μειώνει τις αμοιβαίες παρεμβολές μεταξύ συστημάτων επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης.
- **Δυναμική Κατανομή Πόρων:** Το σύστημα μπορεί να προσαρμόζει δυναμικά την κατανομή των πόρων ανάλογα με τις τρέχουσες ανάγκες επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης.

3.1.2.2 Μείωση κόστους και πολυπλοκότητα υλικού

Η χρήση κοινού υλικού για τις λειτουργίες επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης οδηγεί σε σημαντική μείωση του κόστους, του μεγέθους και της πολυπλοκότητας των συστημάτων. Συγκεκριμένα:

- **Κοινές Κεραίες και Μονάδες RF:** Αντί για ξεχωριστά συστήματα κεραιών και μονάδων RF (Radio Frequency) για επικοινωνία και τηλεπισκόπηση, χρησιμοποιείται ένα ενιαίο σύστημα.
- **Κοινή Επεξεργασία Σήματος:** Οι ίδιες μονάδες επεξεργασίας σήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τις δύο λειτουργίες, μειώνοντας την ανάγκη για διπλό υλικό.
- **Απλοποίηση Αρχιτεκτονικής:** Η ολοκληρωμένη προσέγγιση απλοποιεί τη συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος, μειώνοντας τις απαιτήσεις συντήρησης και την πιθανότητα βλαβών.

3.1.2.3 Βελτίωση Απόδοσης Μέσω Συνεργασίας

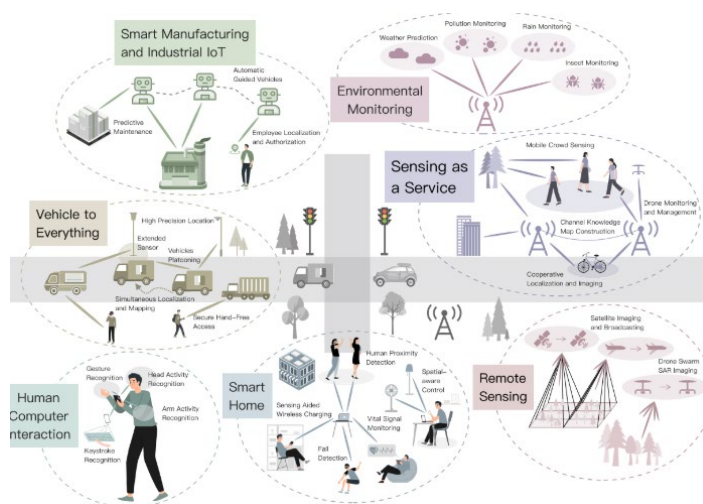
Η συνεργασία μεταξύ των λειτουργιών επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένη απόδοση και για τις δύο λειτουργίες:

- **Βελτιωμένη Εκτίμηση Καναλιού:** Οι πληροφορίες από τη λειτουργία τηλεπισκόπησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ακριβέστερη εκτίμηση του καναλιού επικοινωνίας, οδηγώντας σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και μικρότερα ποσοστά σφαλμάτων.
- **Βελτιωμένη Τηλεπισκόπηση:** Τα σήματα και οι πληροφορίες επικοινωνίας μπορούν να αξιοποιηθούν για την ενίσχυση της ακρίβειας και της ανάλυσης της τηλεπισκόπησης.
- **Ανθεκτικότητα σε Παρεμβολές και Jamming:** Η συνδυασμένη επεξεργασία σήματος μπορεί να βελτιώσει την ανθεκτικότητα του συστήματος σε παρεμβολές και εσκεμμένες παρεμβολές (jamming).

3.1.2.4 Καινοτόμες εφαρμογές και υπηρεσίες

Η τεχνολογία ISAC επιτρέπει την ανάπτυξη νέων και καινοτόμων εφαρμογών που δεν θα ήταν εφικτές με ξεχωριστά συστήματα επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης:

- **Έξυπνα Περιβάλλοντα:** Συστήματα που μπορούν ταυτόχρονα να επικοινωνούν με τους χρήστες και να αντιλαμβάνονται το περιβάλλον, προσαρμόζοντας τις υπηρεσίες τους ανάλογα.
- **Αυτόνομα Οχήματα:** Οχήματα που μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους και με την υποδομή, ενώ ταυτόχρονα ανιχνεύουν και παρακολουθούν το περιβάλλον τους.
- **Επαυξημένη Πραγματικότητα:** Συστήματα που συνδυάζουν ακριβή εντοπισμό και χαρτογράφηση του περιβάλλοντος με υψηλής ταχύτητας επικοινωνία για εμπειρίες επαυξημένης πραγματικότητας.



Σχήμα 5: Σενάρια εφαρμογής & περιπτώσεις χρήσης του ISAC

3.1.2.5 Ενεργειακή αποδοτικότητα

Η κοινή χρήση πόρων και η συνεργατική επεξεργασία σήματος μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας:

- **Μείωση Συνολικής Κατανάλωσης Ενέργειας:** Η χρήση κοινού υλικού και η αποφυγή διπλών συστημάτων μειώνει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας.
- **Βελτιστοποίηση Εκπεμπόμενης Ισχύος:** Η συνεργατική επεξεργασία επιτρέπει τη βέλτιστη κατανομή της εκπεμπόμενης ισχύος μεταξύ των λειτουργιών επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης.
- **Προσαρμοστική Χρήση Ενέργειας:** Το σύστημα μπορεί να προσαρμόζει δυναμικά την κατανομή ενέργειας ανάλογα με τις τρέχουσες απαιτήσεις, μεγιστοποιώντας την αποδοτικότητα.

3.1.2.6 Βελτιωμένη ασφάλεια και αξιοπιστία

Η τεχνολογία ISAC μπορεί να συμβάλει στην ενίσχυση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας των ασύρματων συστημάτων:

- **Ανίχνευση και Αντιμετώπιση Παρεμβολών:** Η λειτουργία τηλεπισκόπησης μπορεί να εντοπίσει πηγές παρεμβολών και να βοηθήσει στην προσαρμογή των παραμέτρων επικοινωνίας για την αντιμετώπισή τους.
- **Αυθεντικοποίηση Βασισμένη στη Θέση:** Η ακριβής γνώση της θέσης των συσκευών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετο επίπεδο αυθεντικοποίησης.
- **Εντοπισμός Ανωμαλιών:** Η συνδυασμένη ανάλυση των δεδομένων επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό ανωμαλιών και πιθανών απειλών ασφαλείας.

Συνολικά, η ενοποίηση των λειτουργιών επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης προσφέρει πολλαπλά πλεονεκτήματα που την καθιστούν μια ελκυστική προσέγγιση για τα μελλοντικά δίκτυα 6G. Οι συνέργειες μεταξύ των δύο λειτουργιών μπορούν να οδηγήσουν σε συστήματα που είναι πιο αποδοτικά, οικονομικά, ευέλικτα και ικανά να υποστηρίξουν ένα ευρύ φάσμα καινοτόμων εφαρμογών.

3.2 Τεχνικές Υλοποίησης ISAC

Η υλοποίηση των συστημάτων ISAC μπορεί να πραγματοποιηθεί ανάλογα με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις και τους περιορισμούς της εφαρμογής [2, 14]. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί αρκετές προσεγγίσεις, που κυμαίνονται από τεχνικές επιπέδου σήματος και κατανομής πόρων έως αρχιτεκτονικές επιπέδου συστήματος και δικτύου.

3.2.1 Διαμόρφωση σήματος διττής χρήσης

Η διαμόρφωση σήματος διπλής χρήσης αποτελεί μια θεμελιώδη τεχνική για την υλοποίηση συστημάτων ISAC. Πρόκειται για το σχεδιασμό κυματομορφών και σχημάτων διαμόρφωσης που εξυπηρετούν ταυτόχρονα τους σκοπούς της επικοινωνίας και της τηλεπισκόπησης.

3.2.1.1 Κυματομορφές Βασισμένες σε Ραντάρ

Μια προσέγγιση είναι η προσαρμογή παραδοσιακών κυματομορφών ραντάρ για τη μεταφορά πληροφοριών επικοινωνίας:

1. **Διαμόρφωση Παλμών Ραντάρ:** Οι παλμοί ραντάρ μπορούν να διαμορφωθούν για να μεταφέρουν δεδομένα επικοινωνίας, διατηρώντας παράλληλα τις ιδιότητες ανίχνευσης ραντάρ. Για παράδειγμα, η φάση κάθε παλμού μπορεί να διαμορφωθεί σύμφωνα με το σχήμα PSK (Phase Shift Keying) για την κωδικοποίηση δεδομένων.
2. **Κυματομορφές FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave):** Οι κυματομορφές FMCW, που χρησιμοποιούνται ευρέως στα ραντάρ αυτοκινήτων, μπορούν να προσαρμοστούν για να μεταφέρουν πληροφορίες επικοινωνίας μέσω επιπλέον διαμόρφωσης του σήματος, διατηρώντας παράλληλα τη δυνατότητα ακριβούς μέτρησης απόστασης και ταχύτητας.
3. **Κυματομορφές OFDM-Ραντάρ:** Συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα της πολυπλεξίας ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας (OFDM) για επικοινωνία με τη λειτουργικότητα ραντάρ, επιτρέποντας την ανίχνευση στόχων μέσω της ανάλυσης των χαρακτηριστικών του επιστρεφόμενου σήματος OFDM.

3.2.1.2 Κυματομορφές Βασισμένες σε Επικοινωνία

Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κυματομορφές βασισμένες σε επικοινωνία και να προσαρμοστούν για λειτουργίες τηλεπισκόπησης:

1. **Κυματομορφές OFDM με Προσαρμογή για Τηλεπισκόπηση:** Οι κυματομορφές OFDM, που είναι ευρέως διαδεδομένες στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνίας, μπορούν να προσαρμοστούν για λειτουργίες τηλεπισκόπησης. Η δομή των υποφερόντων και τα διαστήματα φύλαξης μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να βελτιστοποιούν την απόδοση τηλεπισκόπησης, διατηρώντας παράλληλα υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.
2. **Διαμόρφωση Εξάπλωσης Φάσματος:** Τεχνικές εξάπλωσης φάσματος, όπως η άμεση ακολουθία εξάπλωσης φάσματος (DSSS) και η εξάπλωση φάσματος με άλματα συχνότητας (FHSS), μπορούν να αξιοποιηθούν για ταυτόχρονη επικοινωνία και τηλεπισκόπηση, προσφέροντας ανθεκτικότητα σε παρεμβολές και δυνατότητες ανίχνευσης πολλαπλών στόχων.
3. **Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης:** Σχήματα πολλαπλής πρόσβασης, όπως CDMA (Code Division Multiple Access) και NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access), μπορούν να προσαρμοστούν για να υποστηρίξουν ταυτόχρονη επικοινωνία πολλαπλών χρηστών και τηλεπισκόπηση.

3.2.1.3 Κυματομορφές ειδικά σχεδιασμένες για ISAC

Εκτός από την προσαρμογή υφιστάμενων κυματομορφών, αναπτύσσονται νέες κυματομορφές ειδικά σχεδιασμένες για ISAC:

1. **Κυματομορφές Βασισμένες σε Προκωδικοποίηση Χώρου-Χρόνου-Συχνότητας:** Αυτές οι κυματομορφές αξιοποιούν την προκωδικοποίηση σε πολλαπλές διαστάσεις (χώρο, χρόνο, συχνότητα) για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης τόσο για επικοινωνία όσο και για τηλεπισκόπηση.
2. **Κυματομορφές Βασισμένες σε Καταστατικές Μηχανές (Finite State Machines):** Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιεί καταστατικές μηχανές για τη δυναμική προσαρμογή των παραμέτρων της κυματομορφής βάσει των τρεχουσών απαιτήσεων επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης.

3. **Κυματομορφές με Τεχνητή Νοημοσύνη:** Αξιοποιούνται τεχνικές μηχανικής μάθησης και τεχνητής νοημοσύνης για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση κυματομορφών που εξυπηρετούν αποτελεσματικά και τις δύο λειτουργίες.

3.2.1.4 Συμβιβασμοί και Βελτιστοποίηση

Ο σχεδιασμός κυματομορφών διττής χρήσης συχνά περιλαμβάνει συμβιβασμούς μεταξύ των επιδόσεων επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης. Διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης έχουν προταθεί για τη διαχείριση αυτών των συμβιβασμών:

1. **Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση:** Χρήση τεχνικών πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης για την εύρεση λύσεων Pareto-βέλτιστων που ισορροπούν τις επιδόσεις επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης.
2. **Δυναμική Προσαρμογή:** Δυναμική προσαρμογή των παραμέτρων της κυματομορφής ανάλογα με τις τρέχουσες απαιτήσεις της εφαρμογής και τις συνθήκες του περιβάλλοντος.
3. **Διαίρεση Πόρων:** Κατανομή διαφορετικών πόρων (π.χ., φάσμα, χρόνος, ισχύς) σε διαφορετικές αναλογίες στις λειτουργίες επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης, ανάλογα με τις απαιτήσεις.
4. **Βελτιστοποίηση Βασισμένη σε Περιορισμούς:** Μεγιστοποίηση της απόδοσης μιας λειτουργίας (π.χ., επικοινωνία) υπό περιορισμούς ελάχιστης απόδοσης για την άλλη λειτουργία (π.χ., τηλεπισκόπηση).

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής διαμόρφωσης σήματος διπλής χρήσης εξαρτάται από συγκεκριμένες απαιτήσεις της εφαρμογής, τους διαθέσιμους πόρους, τις συνθήκες του περιβάλλοντος και τους στόχους επίδοσης. Δεν υπάρχει μία καθολική λύση, αλλά μάλλον ένα φάσμα επιλογών που προσφέρουν διαφορετικούς συμβιβασμούς μεταξύ επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης.

3.2.2 Κοινή χρήση φάσματος και πόρων

Η αποδοτική κοινή χρήση φάσματος και πόρων είναι καθοριστικής σημασίας για την επιτυχή υλοποίηση συστημάτων ISAC. Αυτή η προσέγγιση περιλαμβάνει τεχνικές δυναμικής πρόσβασης στο φάσμα, κατανομής πόρων και χρονοπρογραμματισμού, που επιτρέπουν στις λειτουργίες επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης να μοιράζονται και να προσαρμόζουν τη χρήση του φάσματος και άλλων πόρων ανάλογα με τις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις και συνθήκες.

3.2.2.1 Τεχνικές κατανομής φάσματος

Διάφορες τεχνικές έχουν προταθεί για την κατανομή του φάσματος μεταξύ των λειτουργιών επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης:

1. **Πλήρως Κοινή Χρήση Φάσματος:** Οι λειτουργίες επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης χρησιμοποιούν ταυτόχρονα το ίδιο εύρος συχνοτήτων. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει τη μέγιστη φασματική απόδοση, αλλά απαιτεί προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας σήματος για τη διαχείριση πιθανών παρεμβολών μεταξύ των δύο λειτουργιών.
2. **Διαίρεση Φάσματος με Βάση τη Συχνότητα:** Το διαθέσιμο φάσμα χωρίζεται σε υποζώνες, με κάθε υποζώνη να αφιερώνεται πρωτίστως είτε στην επικοινωνία είτε στην τηλεπισκόπηση.

Αυτή η προσέγγιση είναι απλούστερη στην υλοποίηση αλλά μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη φασματική απόδοση.

3. **Διαίρεση Φάσματος με Βάση το Χρόνο:** Διαφορετικές χρονικές περίοδοι αφιερώνονται σε διαφορετικές λειτουργίες, επιτρέποντας χρονική πολυπλεξία της επικοινωνίας και τηλεπισκόπισης. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να είναι κατάλληλη για εφαρμογές όπου οι απαιτήσεις ποικίλλουν με την πάροδο του χρόνου.
4. **Δυναμική Κατανομή Φάσματος:** Η κατανομή του φάσματος προσαρμόζεται δυναμικά με βάση τις τρέχουσες απαιτήσεις και τις συνθήκες καναλιού. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να βελτιστοποιήσει την αποδοτικότητα χρήσης του φάσματος, αλλά απαιτεί πιο πολύπλοκους μηχανισμούς ελέγχου και προσαρμογής.
5. **Γνωστική Πρόσβαση στο Φάσμα:** Χρήση τεχνικών γνωστικής ραδιοεπικοινωνίας για την ανίχνευση και αξιοποίηση διαθέσιμων ευκαιριών φάσματος, επιτρέποντας στο σύστημα ISAC να λειτουργεί σε ποικίλες ζώνες συχνοτήτων ανάλογα με τη διαθεσιμότητα.

3.2.2.2 Τεχνικές κατανομής πόρων

Πέρα από το φάσμα, διάφοροι άλλοι πόροι πρέπει να κατανεμηθούν μεταξύ των λειτουργιών επικοινωνίας και τηλεπισκόπισης:

1. **Κατανομή Ισχύος:** Η διαθέσιμη ισχύς εκπομπής πρέπει να κατανεμηθεί κατάλληλα μεταξύ των λειτουργιών επικοινωνίας και τηλεπισκόπισης. Διάφορες στρατηγικές έχουν προταθεί, από στατική κατανομή έως δυναμική προσαρμογή με βάση τις τρέχουσες απαιτήσεις και συνθήκες.
2. **Χωρική Κατανομή Πόρων:** Στα συστήματα MIMO, οι χωρικοί βαθμοί ελευθερίας μπορούν να κατανεμηθούν μεταξύ των λειτουργιών επικοινωνίας και τηλεπισκόπισης. Για παράδειγμα, διαφορετικές ομάδες κεραιών μπορούν να αφιερωθούν σε διαφορετικές λειτουργίες, ή μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές χωρικής πολυπλεξίας για την υποστήριξη και των δύο λειτουργιών ταυτόχρονα.
3. **Κατανομή Υπολογιστικών Πόρων:** Οι διαθέσιμοι υπολογιστικοί πόροι, όπως η επεξεργαστική ισχύς και η μνήμη, πρέπει να κατανεμηθούν αποτελεσματικά μεταξύ των αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος για επικοινωνία και τηλεπισκόπιση.
4. **Διαχείριση Χρόνου Εκπομπής/Λήψης:** Σε συστήματα με εναλλαγή εκπομπής/λήψης (TDD - Time Division Duplex), ο χρόνος που αφιερώνεται στην εκπομπή και τη λήψη πρέπει να κατανεμηθεί κατάλληλα για την υποστήριξη των απαιτήσεων επικοινωνίας και τηλεπισκόπισης.

3.2.2.3 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης για κατανομή πόρων

Για την αποτελεσματική κατανομή των πόρων σε συστήματα ISAC, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης:

1. **Συμβατική Βελτιστοποίηση:** Μέθοδοι όπως ο κυρτός (convex) προγραμματισμός, ο ακέραιος προγραμματισμός και η βελτιστοποίηση αθροίσματος σταθμισμένων παραγόντων χρησιμοποιούνται για τη διατύπωση και επίλυση προβλημάτων κατανομής πόρων.

2. **Βελτιστοποίηση Στοχαστικής Γεωμετρίας:** Αυτές οι τεχνικές αξιοποιούν στοχαστικά μοντέλα για τη χωρική κατανομή των χρηστών και των στόχων, επιτρέποντας τη στατιστική ανάλυση και βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος.
3. **Μέθοδοι Βασισμένες σε Τεχνητή Νοημοσύνη:** Τεχνικές μηχανικής μάθησης, όπως η ενισχυτική μάθηση (reinforcement learning) και τα νευρωνικά δίκτυα, χρησιμοποιούνται για την προσαρμοστική κατανομή πόρων σε δυναμικά και σύνθετα περιβάλλοντα.
4. **Κατανεμημένοι Αλγόριθμοι:** Σε μεγάλης κλίμακας συστήματα ISAC, κατανεμημένοι αλγόριθμοι επιτρέπουν την τοπική λήψη αποφάσεων κατανομής πόρων με περιορισμένη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των κόμβων.

3.2.2.4 Συμβιβασμοί και προκλήσεις

Η κοινή χρήση φάσματος και πόρων σε συστήματα ISAC συνεπάγεται διάφορους συμβιβασμούς και προκλήσεις:

1. **Συμβιβασμός Επίδοσης Επικοινωνίας-Τηλεπισκόπησης:** Η βελτιστοποίηση της απόδοσης μιας λειτουργίας συχνά επηρεάζει την απόδοση της άλλης, απαιτώντας προσεκτική ισορροπία ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.
2. **Πολυπλοκότητα Υλοποίησης:** Οι πιο προηγμένες τεχνικές κοινής χρήσης πόρων συχνά συνεπάγονται αυξημένη πολυπλοκότητα υλοποίησης, τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και λογισμικού.
3. **Απαιτήσεις Πληροφοριών Κατάστασης Καναλιού:** Η αποτελεσματική κατανομή πόρων συχνά απαιτεί ακριβείς και επίκαιρες πληροφορίες κατάστασης καναλιού, τόσο για τα κανάλια επικοινωνίας όσο και για τα κανάλια τηλεπισκόπησης, αυξάνοντας την επιβάρυνση της εκτίμησης καναλιού.
4. **Ευαισθησία σε Σφάλματα και Αβεβαιότητες:** Οι αλγόριθμοι κατανομής πόρων μπορεί να είναι ευαίσθητοι σε σφάλματα εκτίμησης καναλιού και αβεβαιότητες στις παραμέτρους του συστήματος, απαιτώντας τεχνικές ανθεκτικής βελτιστοποίησης.
5. **Κλιμάκωση σε Πολύπλοκα Σενάρια:** Η κλιμάκωση των τεχνικών κατανομής πόρων σε σενάρια με πολλούς χρήστες, πολλά ραντάρ και πολλαπλούς στόχους παραμένει μια σημαντική πρόκληση.

Η αποτελεσματική κοινή χρήση φάσματος και πόρων είναι ένα κρίσιμο στοιχείο για την επιτυχή υλοποίηση συστημάτων ISAC και αποτελεί ενεργό πεδίο έρευνας. Με την πρόοδο των τεχνικών βελτιστοποίησης και των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, αναμένεται βελτίωση της αποδοτικότητας και της προσαρμοστικότητας της κατανομής πόρων σε διάφορες εφαρμογές και σενάρια ISAC.

3.2.3 Συνεργατική επεξεργασία σήματος

Η συνεργατική επεξεργασία σήματος αποτελεί μια ουσιώδη συνιστώσα των συστημάτων ISAC, επιτρέποντας την αποτελεσματική εξαγωγή πληροφοριών τόσο για επικοινωνία όσο και για τηλεπισκόπηση από τα ληφθέντα σήματα. Αυτή η κατηγορία τεχνικών περιλαμβάνει αλγορίθμους για τη συνδυασμένη επεξεργασία σημάτων επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης από πολλαπλούς κατανεμημένους κόμβους ISAC, με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας.

3.2.3.1 Τεχνικές συνεκτικής επεξεργασίας

Οι τεχνικές συνεκτικής επεξεργασίας στοχεύουν στην αξιοποίηση της συνέχειας και των συσχετίσεων μεταξύ των λειτουργιών επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης:

1. **Από Κοινού Εκτίμηση Καναλιού και Εντοπισμός:** Αλγόριθμοι που συνδυάζουν την εκτίμηση του καναλιού επικοινωνίας με την εκτίμηση θέσης και παραμέτρων στόχων. Οι πληροφορίες από τη μία λειτουργία χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της ακρίβειας της άλλης.
2. **Ενοποιημένη Ανίχνευση και Αποκωδικοποίηση:** Αντί για ξεχωριστή ανίχνευση στόχων και αποκωδικοποίηση δεδομένων, αυτή η προσέγγιση εκτελεί ταυτόχρονα και τις δύο λειτουργίες, βελτιώνοντας την απόδοση και μειώνοντας την πολυπλοκότητα.
3. **Συμβιβασμός μεταξύ Επίδοσης Επικοινωνίας και Τηλεπισκόπησης:** Αλγόριθμοι που βελτιστοποιούν δυναμικά τον συμβιβασμό μεταξύ επίδοσης επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης, προσαρμόζοντας τις παραμέτρους επεξεργασίας σήματος ανάλογα με τις τρέχουσες απαιτήσεις.

3.2.3.2 Συνεργατικός εντοπισμός και παρακολούθηση

Οι τεχνικές συνεργατικού εντοπισμού και παρακολούθησης επιτρέπουν την αξιοποίηση πολλαπλών σημείων παρατήρησης για βελτιωμένη ακρίβεια εντοπισμού και παρακολούθησης στόχων:

1. **Πολυστατική Ανίχνευση Ραντάρ:** Χρήση πολλαπλών, κατανεμημένων πομπών και δεκτών για την ανίχνευση και παρακολούθηση στόχων από διαφορετικές οπτικές γωνίες, βελτιώνοντας την ακρίβεια και την αξιοπιστία.
2. **Συνεργατική Εκτίμηση Θέσης:** Συνδυασμός μετρήσεων από πολλαπλούς κόμβους ISAC για την ακριβέστερη εκτίμηση της θέσης και της κίνησης των χρηστών και άλλων στόχων.
3. **Κατανεμημένη Τηλεπισκόπηση με Ανταλλαγή Πληροφοριών:** Οι κόμβοι ISAC ανταλλάσσουν πληροφορίες τηλεπισκόπησης, επιτρέποντας την κατασκευή μιας συνολικής εικόνας του περιβάλλοντος με υψηλότερη ανάλυση και ακρίβεια από ό,τι θα μπορούσε να επιτευχθεί από μεμονωμένους κόμβους.

3.2.3.3 Συνεργατική χαρτογράφηση και απεικόνιση

Οι τεχνικές συνεργατικής χαρτογράφησης και απεικόνισης στοχεύουν στη δημιουργία λεπτομερών χαρτών και εικόνων του περιβάλλοντος:

1. **Συνεργατική SLAM (Simultaneous Localization and Mapping):** Πολλαπλοί κόμβοι ISAC συνεργάζονται για ταυτόχρονο εντοπισμό θέσης και χαρτογράφηση του περιβάλλοντος, επιτρέποντας την κατασκευή πιο ακριβών και λεπτομερών χαρτών.
2. **Κατανεμημένη Απεικόνιση Ραντάρ:** Χρήση συνεργατικών τεχνικών για τη δημιουργία εικόνων υψηλής ανάλυσης του περιβάλλοντος, συνδυάζοντας δεδομένα από πολλαπλούς κόμβους ISAC.
3. **Συνεργατική Ανίχνευση και Ταξινόμηση Αντικειμένων:** Συνδυασμός πληροφοριών από πολλαπλούς κόμβους για την ακριβέστερη ανίχνευση, αναγνώριση και ταξινόμηση αντικειμένων στο περιβάλλον.

3.2.3.4 Τεχνικές βασισμένες στην Τεχνητή Νοημοσύνη

Η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση παίζουν ολοένα και σημαντικότερο ρόλο στη συνεργατική επεξεργασία σήματος για ISAC:

1. **Βαθιά Μάθηση για Επεξεργασία Σήματος:** Χρήση βαθιών νευρωνικών δικτύων για την εξαγωγή χαρακτηριστικών, την ανίχνευση αντικειμένων και την αποκωδικοποίηση σημάτων επικοινωνίας.
2. **Ενισχυτική Μάθηση για Προσαρμοστική Επεξεργασία:** Αλγόριθμοι ενισχυτικής μάθησης που προσαρμόζουν δυναμικά τις στρατηγικές επεξεργασίας σήματος ανάλογα με τις μεταβαλλόμενες συνθήκες και απαιτήσεις.
3. **Μάθηση από Άκρο σε Άκρο:** Εκπαίδευση συστημάτων επεξεργασίας σήματος από άκρο σε άκρο, χωρίς την ανάγκη για χειροκίνητο σχεδιασμό ενδιάμεσων σταδίων επεξεργασίας.

3.2.3.5 Προκλήσεις συνεργατικής επεξεργασίας

Η συνεργατική επεξεργασία σήματος για ISAC αντιμετωπίζει διάφορες προκλήσεις:

1. **Υπολογιστική Πολυπλοκότητα:** Οι αλγόριθμοι συνεργατικής επεξεργασίας συχνά απαιτούν σημαντική υπολογιστική ισχύ, ιδιαίτερα για επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο.
2. **Απαιτήσεις Επικοινωνίας:** Η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των κόμβων ISAC για συνεργατική επεξεργασία μπορεί να προκαλέσει σημαντική επιβάρυνση στο δίκτυο επικοινωνίας.
3. **Συγχρονισμός:** Η αποτελεσματική συνεργατική επεξεργασία απαιτεί ακριβή συγχρονισμό μεταξύ των κόμβων ISAC, τόσο σε επίπεδο χρόνου όσο και σε επίπεδο συχνότητας.
4. **Κλιμάκωση:** Η κλιμάκωση των αλγορίθμων συνεργατικής επεξεργασίας σε μεγάλα δίκτυα με πολλούς κόμβους παραμένει μια σημαντική πρόκληση.

Συνολικά, η συνεργατική επεξεργασία σήματος αποτελεί έναν κρίσιμο τομέα για την εξέλιξη των συστημάτων ISAC, επιτρέποντας την αποτελεσματική αξιοποίηση των συνεργειών μεταξύ επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης. Με την πρόοδο των τεχνικών επεξεργασίας σήματος και των μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης, αναμένεται περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης και των δυνατοτήτων των συνεργατικών συστημάτων ISAC.

3.3 Εφαρμογές ISAC σε δίκτυα 6G

Τα συστήματα ISAC αναμένεται να διαδραματίσουν κεντρικό ρόλο στα μελλοντικά δίκτυα 6G, καθιστώντας δυνατές καινοτόμες εφαρμογές και περιπτώσεις χρήσης που συνδυάζουν δυνατότητες επικοινωνίας και αντίληψης [13, 14, 20]. Αυτές οι εφαρμογές δεν περιορίζονται σε συγκεκριμένους τομείς, αλλά εκτείνονται σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών και υπηρεσιών, από τις έξυπνες μεταφορές και τη βιομηχανία έως τη γεωργία, την υγειονομική περίθαλψη και τις έξυπνες πόλεις.

3.3.1 Έξυπνα συστήματα μεταφορών και αυτόνομα οχήματα

Τα έξυπνα συστήματα μεταφορών αποτελούν μια από τις σημαντικότερες εφαρμογές του ISAC σε περιβάλλοντα 6G. Η επικοινωνία μεταξύ οχημάτων (V2V), οχημάτων με υποδομή (V2I) και

γενικότερα η επικοινωνία V2X (Vehicle-to-Everything) εξελίσσεται με την ενσωμάτωση λειτουργιών ανίχνευσης που επιτρέπουν:

- **Βελτιωμένη επίγνωση περιβάλλοντος:** Τα συστήματα ISAC μπορούν να ανιχνεύουν εμπόδια, πεζούς και άλλα οχήματα σε πραγματικό χρόνο, χρησιμοποιώντας τα ίδια σήματα που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία.
- **Ακριβή εντοπισμό και χαρτογράφηση:** Η ακρίβεια εντοπισμού θέσης μπορεί να φτάσει σε επίπεδο εκατοστών, επιτρέποντας την ασφαλή πλοήγηση αυτόνομων οχημάτων ακόμα και σε πολύπλοκα αστικά περιβάλλοντα.
- **Συνεργατική αντίληψη:** Πολλαπλά οχήματα και υποδομές μπορούν να μοιράζονται δεδομένα ανίχνευσης, δημιουργώντας ένα συνεργατικό δίκτυο ανίχνευσης με σημαντικά βελτιωμένη κάλυψη και αξιοπιστία.

Η αξιοποίηση των RIS (Reconfigurable Intelligent Surfaces), σε αυτό το πλαίσιο, επιτρέπει την κάλυψη «νεκρών σημείων» και την ενίσχυση της ποιότητας σήματος σε περιοχές με έντονη σκίαση, όπως διασταυρώσεις με πολλά κτίρια ή τούνελ. Επιπλέον, οι RIS μπορούν να υποστηρίξουν την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών οχημάτων, βελτιστοποιώντας τη χρήση του διαθέσιμου φάσματος.

3.3.2 Έξυπνες πόλεις και Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT)

Στο οικοσύστημα των έξυπνων πόλεων, τα συστήματα ISAC προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων λύσεων παρακολούθησης και διαχείρισης:

- **Έξυπνη διαχείριση υποδομών:** Η συνεχής παρακολούθηση κρίσιμων υποδομών όπως γέφυρες, κτίρια και δίκτυα ύδρευσης, με ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων.
- **Παρακολούθηση περιβαλλοντικών συνθηκών:** Ανίχνευση ρύπων, θορύβου και άλλων περιβαλλοντικών παραμέτρων μέσω των ίδιων υποδομών που χρησιμοποιούνται για επικοινωνία.
- **Διαχείριση πλήθους και δημόσιας ασφάλειας:** Συστήματα που μπορούν να εντοπίζουν ανώμαλες συμπεριφορές πλήθους ή καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, παρέχοντας ταυτόχρονα επικοινωνιακή κάλυψη.
- **Έξυπνη διαχείριση ενέργειας:** Βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας σε αστικά περιβάλλοντα μέσω λεπτομερούς παρακολούθησης και ελέγχου.

Οι επιφάνειες RIS σε αυτό το πλαίσιο μπορούν να εγκατασταθούν σε προσόψεις κτιρίων, φωτεινούς σηματοδότες και άλλα στοιχεία αστικής υποδομής, παρέχοντας ταυτόχρονα βελτιωμένη κάλυψη επικοινωνίας και ικανότητες ανίχνευσης. Η ικανότητα των RIS να λειτουργούν με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας τις καθιστά ιδανικές για την υποστήριξη βιώσιμων λύσεων IoT σε μεγάλη κλίμακα.

3.3.3 Εφαρμογές εκτεταμένης πραγματικότητας (XR)

Οι εφαρμογές εκτεταμένης πραγματικότητας (XR), που περιλαμβάνουν την εικονική (VR), επαυξημένη (AR) και μικτή πραγματικότητα (MR), αποτελούν έναν από τους πιο απαιτητικούς τομείς εφαρμογής των δικτύων 6G. Τα συστήματα ISAC προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε αυτόν τον τομέα:

- **Ακριβής εντοπισμός και ιχνηλάτηση:** Η ακριβής γνώση της θέσης και του προσανατολισμού των συσκευών XR είναι κρίσιμη για τη δημιουργία πειστικών εμπειριών.
- **Χαρτογράφηση περιβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο:** Η συνεχής ενημέρωση του μοντέλου του περιβάλλοντος χώρου επιτρέπει την αποτελεσματική αλληλεπίδραση των εικονικών αντικειμένων με τον φυσικό κόσμο.
- **Χαμηλή καθυστέρηση και υψηλό εύρος ζώνης:** Οι εφαρμογές XR απαιτούν ταυτόχρονα εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, κάτι που υποστηρίζεται από τα συστήματα ISAC με βελτιστοποιημένη χρήση πόρων.

Η αξιοποίηση των RIS σε εφαρμογές XR επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της κάλυψης σε εσωτερικούς χώρους, όπου συχνά παρουσιάζονται προβλήματα εξασθένησης σήματος. Επιπλέον, οι RIS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία προσωρινών ζωνών κάλυψης υψηλής απόδοσης (hotspots) σε περιοχές όπου αναπτύσσονται δραστηριότητες XR, μεγιστοποιώντας την ποιότητα εμπειρίας των χρηστών.

3.3.4 Εφαρμογές στην υγειονομική περίθαλψη

Ο τομέας της υγειονομικής περίθαλψης αποτελεί έναν από τους πιο υποσχόμενους τομείς εφαρμογής των συστημάτων ISAC σε περιβάλλοντα 6G:

- **Απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών:** Συστήματα που μπορούν ταυτόχρονα να ανιχνεύουν ζωτικά σήματα (καρδιακός ρυθμός, αναπνοή, κίνηση) και να μεταδίδουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο.
- **Αναγνώριση πτώσεων και έκτακτης ανάγκης:** Ανίχνευση περιστατικών πτώσης ή άλλων καταστάσεων έκτακτης ανάγκης χωρίς την ανάγκη για φορητές συσκευές.
- **Έξυπνα περιβάλλοντα υποβοηθούμενης διαβίωσης:** Συστήματα που προσαρμόζονται στις ανάγκες ηλικιωμένων ή ατόμων με αναπηρίες, παρέχοντας τόσο επικοινωνία όσο και παρακολούθηση.
- **Τηλεϊατρική υψηλής πιστότητας:** Υποστήριξη εφαρμογών τηλεϊατρικής με απαιτήσεις υψηλής ανάλυσης και χαμηλής καθυστέρησης.

Οι επιφάνειες RIS σε νοσοκομειακά περιβάλλοντα μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την κάλυψη και την ποιότητα του σήματος, ενώ παράλληλα επιτρέπουν τη μη επεμβατική παρακολούθηση ασθενών. Επιπλέον, η χαμηλή εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας των συστημάτων που βασίζονται σε RIS τα καθιστά κατάλληλα για χρήση σε ευαίσθητα περιβάλλοντα όπως μονάδες εντατικής θεραπείας ή νεογνικές μονάδες.

3.3.5 Βιομηχανικές εφαρμογές και Βιομηχανία 4.0

Στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0, τα συστήματα ISAC προσφέρουν μοναδικές δυνατότητες για την ανάπτυξη έξυπνων βιομηχανικών περιβαλλόντων:

- **Παρακολούθηση μηχανημάτων και προβλεπτική συντήρηση:** Συστήματα που μπορούν να ανιχνεύουν ανωμαλίες στη λειτουργία μηχανημάτων μέσω ανάλυσης κραδασμών ή άλλων παραμέτρων.
- **Ιχνηλάτηση αγαθών και διαχείριση αποθεμάτων:** Ακριβής εντοπισμός αγαθών και προϊόντων σε αποθήκες ή γραμμές παραγωγής.

- **Ασφάλεια εργαζομένων:** Συστήματα που μπορούν να ανιχνεύουν επικίνδυνες καταστάσεις και να προειδοποιούν τους εργαζόμενους σε πραγματικό χρόνο.
- **Αυτοματισμός και ρομποτική:** Υποστήριξη προηγμένων συστημάτων αυτοματισμού και συνεργατικής ρομποτικής με ακριβή ανίχνευση του περιβάλλοντος.

Οι επιφάνειες RIS σε βιομηχανικά περιβάλλοντα μπορούν να αντιμετωπίσουν τις προκλήσεις που προκύπτουν από την παρουσία μεταλλικών κατασκευών, μηχανημάτων και άλλων εμποδίων που επηρεάζουν τη διάδοση ραδιοκυμάτων. Επιπλέον, η ικανότητα των RIS να κατευθύνουν το σήμα σε συγκεκριμένες περιοχές μπορεί να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση των ασύρματων συσκευών που χρησιμοποιούνται στο βιομηχανικό περιβάλλον, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας των αισθητήρων IoT.

3.3.6 Προκλήσεις υλοποίησης και μελλοντικές κατευθύνσεις

Παρά τις σημαντικές προοπτικές που προσφέρουν τα συστήματα ISAC σε δίκτυα 6G, υπάρχουν ακόμη σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την ευρεία υιοθέτησή τους:

- **Βελτιστοποίηση κατανομής πόρων:** Η εύρεση της βέλτιστης ισορροπίας μεταξύ λειτουργιών επικοινωνίας και ανίχνευσης αποτελεί μια σύνθετη πρόκληση που απαιτεί προηγμένους αλγορίθμους και δυναμική προσαρμογή.
- **Διαχείριση παρεμβολών:** Σε πυκνά περιβάλλοντα, η διαχείριση των παρεμβολών μεταξύ πολλαπλών συστημάτων ISAC απαιτεί συντονισμένη προσέγγιση.
- **Ασφάλεια και προστασία προσωπικών δεδομένων:** Η συλλογή δεδομένων ανίχνευσης εγείρει σημαντικά ζητήματα προστασίας προσωπικών δεδομένων που πρέπει να αντιμετωπιστούν με κατάλληλες τεχνικές ανωνυμοποίησης και προστασίας.
- **Προτυποποίηση:** Η ανάπτυξη προτύπων για συστήματα ISAC είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της διαλειτουργικότητας και της ευρείας υιοθέτησης.

Οι μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας στον τομέα των εφαρμογών ISAC σε δίκτυα 6G περιλαμβάνουν:

- **Ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης:** Η αξιοποίηση τεχνικών μηχανικής μάθησης για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των συστημάτων ISAC και την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών από τα δεδομένα ανίχνευσης.
- **Αρχιτεκτονικές κατανεμημένης ανίχνευσης:** Ανάπτυξη συστημάτων που συνδυάζουν δεδομένα από πολλαπλούς κόμβους ανίχνευσης για βελτιωμένη ακρίβεια και κάλυψη.
- **Πολυλειτουργικές επιφάνειες RIS:** Σχεδιασμός επιφανειών που μπορούν να υποστηρίξουν ταυτόχρονα πολλαπλές λειτουργίες, όπως επικοινωνία, ανίχνευση και συγκομιδή ενέργειας.
- **Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης φάσεων σε πραγματικό χρόνο:** Ανάπτυξη αλγορίθμων που μπορούν να προσαρμόζουν δυναμικά τις φάσεις των στοιχείων RIS ανάλογα με τις μεταβαλλόμενες συνθήκες του περιβάλλοντος.

Συμπερασματικά, οι εφαρμογές ISAC σε δίκτυα 6G, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με τεχνολογίες RIS, προσφέρουν έναν συναρπαστικό χώρο έρευνας και καινοτομίας, με δυνατότητα σημαντικού αντίκτυπου σε πολλούς τομείς της κοινωνίας και της οικονομίας. Η περαιτέρω ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών θα απαιτήσει διεπιστημονική προσέγγιση και στενή συνεργασία μεταξύ ακαδημαϊκών ιδρυμάτων, βιομηχανίας και φορέων προτυποποίησης.

4

Επαναδιαμορφώσιμες Ευφυείς

Επιφάνειες

4.1 Λειτουργίες και χαρακτηριστικά RIS

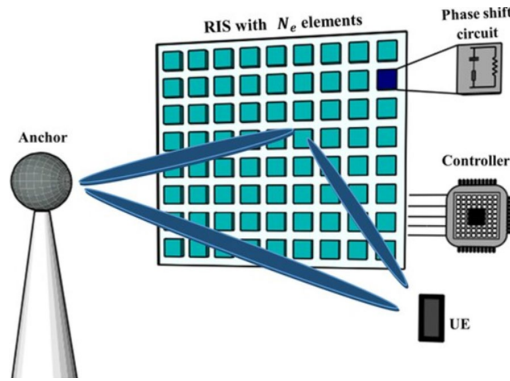
Οι Επαναδιαμορφώσιμες Ευφυείς Επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS) αποτελούν μια από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες για τα ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς, προσφέροντας μια ριζοσπαστική προσέγγιση στη διαχείριση του ασύρματου περιβάλλοντος [1, 3, 15]. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές τεχνολογίες επικοινωνιών που επικεντρώνονται στη βελτιστοποίηση των πομπών και των δεκτών, οι RIS επιτρέπουν τον ενεργό έλεγχο και διαμόρφωση του ίδιου του μέσου διάδοσης, προσφέροντας νέες δυνατότητες για ενίσχυση της κάλυψης, βελτίωση της ποιότητας σήματος και αποδοτικότερη αξιοποίηση του φάσματος.

Ακόμη, οι RIS αποτελούν τεχνολογικά καινοτόμες διατάξεις που έχουν σχεδιαστεί για να χειρίζονται με έξυπνο τρόπο τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Σε αυτή την ενότητα θα αναλύσουμε τα βασικά χαρακτηριστικά και τις λειτουργίες τους, καθώς και τις αρχιτεκτονικές σχεδιασμού που τις διέπουν.

4.1.1 Αρχιτεκτονική και φυσικές αρχές

Η βασική αρχιτεκτονική των RIS συνίσταται σε μια επίπεδη επιφάνεια αποτελούμενη από πολλαπλά μετα-στοιχεία (meta-elements) ή μονάδες ανάκλασης (reflecting units), τα οποία μπορούν να μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Κάθε μετα-στοιχείο λειτουργεί ως ένας παθητικός ανακλαστήρας που μπορεί να ελέγχεται ηλεκτρονικά για να τροποποιεί τη φάση, το πλάτος ή και την πόλωση του ανακλώμενου σήματος.

Από φυσικής άποψης, η λειτουργία των RIS βασίζεται στις αρχές της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας και των μεταϋλικών (metamaterials). Τα μεταϋλικά είναι τεχνητά κατασκευασμένα υλικά με ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες που δεν απαντώνται στη φύση, όπως αρνητικός δείκτης διάθλασης ή ελεγχόμενη ανάκλαση. Η θεμελιώδης αρχή πίσω από τις RIS είναι η αρχή του Huygens, σύμφωνα με την οποία κάθε σημείο ενός μετώπου κύματος μπορεί να θεωρηθεί ως πηγή δευτερογενών σφαιρικών κυμάτων.



Σχήμα 6: Δομή RIS

Οι κύριες φυσικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν τα μετα-στοιχεία περιλαμβάνουν:

- **Μέγεθος και σχήμα:** Συνήθως σχεδιάζονται με διαστάσεις μικρότερες από το μήκος κύματος λειτουργίας για να επιτευχθεί η επιθυμητή συμπεριφορά.
- **Υλικό κατασκευής:** Χρησιμοποιούνται διηλεκτρικά υλικά με χαμηλές απώλειες και αγωγιμότητα στοιχεία για τη δημιουργία των κατάλληλων ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων.
- **Διάταξη και πυκνότητα:** Η διάταξη των μετα-στοιχείων καθορίζει τις συνολικές ιδιότητες της επιφάνειας και την ικανότητά της να κατευθύνει τα κύματα με ακρίβεια.

Ακόμη, όσον αφορά την αρχιτεκτονική ελέγχου, οι RIS συνήθως περιλαμβάνουν:

1. **Μονάδα ελέγχου:** Υπεύθυνη για τον καθορισμό των φάσεων και των πλατών των μετα-στοιχείων.
2. **Δίκτυο διασύνδεσης:** Επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ της μονάδας ελέγχου και των μετα-στοιχείων.
3. **Αισθητήρες περιβάλλοντος** (προαιρετικά): Παρέχουν πληροφορίες για τις συνθήκες του καναλιού και βοηθούν στη βελτιστοποίηση της διαμόρφωσης.

Η βασική αρχή λειτουργίας των RIS μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά μέσω της θεωρίας σκέδασης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, όπου το ανακλώμενο πεδίο E_r από ένα μετα-στοιχείο δίνεται από τη σχέση:

$$E_r = \Gamma \times E_i$$

όπου E_i είναι το προσπίπτον πεδίο και Γ είναι ο συντελεστής ανάκλασης που μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\Gamma = \alpha \times e^{j\phi}$$

με α να αντιπροσωπεύει το πλάτος και ϕ τη φάση του συντελεστή ανάκλασης. Στις περισσότερες εφαρμογές RIS, το α διατηρείται σταθερό (συνήθως κοντά στη μονάδα για ελαχιστοποίηση των απωλειών) και μόνο η φάση ϕ ελέγχεται για να επιτευχθεί η επιθυμητή διαμόρφωση του ανακλώμενου κύματος.

4.1.2 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί

Οι Επαναδιαμορφώσιμες Ευφυείς Επιφάνειες προσφέρουν πολλαπλά πλεονεκτήματα που τις καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικές για εφαρμογή σε δίκτυα 6G, ειδικά σε συνδυασμό με τεχνολογίες ISAC. Ταυτόχρονα, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό και την υλοποίησή τους.

4.1.2.1 Πλεονεκτήματα

1. **Ενεργειακή απόδοση:** Οι RIS λειτουργούν ως παθητικά στοιχεία χωρίς να απαιτούν ενισχυτές ισχύος για την επεξεργασία των σημάτων, οδηγώντας σε σημαντικά χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνολογίες αναμετάδοσης.
2. **Ευελιξία και προσαρμοστικότητα:** Η δυνατότητα δυναμικής διαμόρφωσης του ασύρματου περιβάλλοντος επιτρέπει την προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες συνθήκες καναλιού και τις απαιτήσεις των χρηστών.
3. **Χαμηλό κόστος και πολυπλοκότητα:** Λόγω της σχετικά απλής δομής τους και της έλλειψης ακριβών ενεργών στοιχείων RF, οι RIS μπορούν να παραχθούν με χαμηλότερο κόστος σε σύγκριση με παραδοσιακούς σταθμούς βάσης ή αναμεταδότες.
4. **Βελτίωση κάλυψης:** Οι RIS μπορούν να επεκτείνουν την κάλυψη σε περιοχές σκίασης ή «νεκρά σημεία» επιτρέποντας την εύρεση έμμεσων διαδρομών διάδοσης σήματος.
5. **Αύξηση χωρητικότητας συστήματος:** Μέσω της βελτιστοποίησης των διαδρομών διάδοσης, οι RIS μπορούν να αυξήσουν το λόγο σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (SINR), οδηγώντας σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.
6. **Συμβατότητα με υπάρχουσες υποδομές:** Οι RIS μπορούν να ενσωματωθούν στα υπάρχοντα δίκτυα χωρίς σημαντικές αλλαγές στους τερματικούς σταθμούς ή τους σταθμούς βάσης.
7. **Περιβαλλοντικά οφέλη:** Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και η δυνατότητα μείωσης της συνολικής εκπεμπόμενης ισχύος συμβάλλουν στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των ασύρματων επικοινωνιών.
8. **Βελτιωμένη ασφάλεια φυσικού επιπέδου:** Οι RIS μπορούν να κατευθύνουν τα σήματα με τρόπο που να ελαχιστοποιεί την έκθεσή τους σε μη εξουσιοδοτημένους χρήστες, ενισχύοντας την ασφάλεια των επικοινωνιών.

4.1.2.2 Περιορισμοί

1. **Απαιτήση για γνώση καναλιού:** Για την αποτελεσματική λειτουργία τους, οι RIS απαιτούν ακριβή γνώση των συνθηκών καναλιού, κάτι που μπορεί να είναι προκλητικό σε δυναμικά περιβάλλοντα.
2. **Περιορισμένο κέρδος σε μεγάλες αποστάσεις:** Η εξασθένηση που υφίσταται το σήμα στη διαδρομή από την πηγή στη RIS και από τη RIS στον προορισμό μπορεί να περιορίσει την αποτελεσματικότητα σε μεγάλες αποστάσεις.
3. **Προκλήσεις συγχρονισμού:** Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται συντονισμός πολλαπλών RIS, προκύπτουν ζητήματα συγχρονισμού που πρέπει να αντιμετωπιστούν.
4. **Ευαισθησία σε σφάλματα υλοποίησης:** Μικρές αποκλίσεις στην κατασκευή ή τη λειτουργία των μετα-στοιχείων μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά την συνολική απόδοση.
5. **Περιορισμοί εύρους ζώνης:** Οι περισσότερες σχεδιάσεις RIS έχουν βελτιστοποιηθεί για λειτουργία σε συγκεκριμένες συχνότητες, με περιορισμένη απόδοση σε ευρύτερες ζώνες συχνοτήτων.

6. **Πολυπλοκότητα αλγορίθμων βελτιστοποίησης:** Οι αλγόριθμοι που απαιτούνται για την βέλτιστη διαμόρφωση των φάσεων των μετα-στοιχείων μπορεί να έχουν υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα, ειδικά για μεγάλες επιφάνειες.
7. **Περιορισμοί τοποθέτησης:** Η αποτελεσματικότητα των RIS εξαρτάται σημαντικά από την τοποθέτησή τους στο περιβάλλον, απαιτώντας προσεκτικό σχεδιασμό κατά την ανάπτυξη.

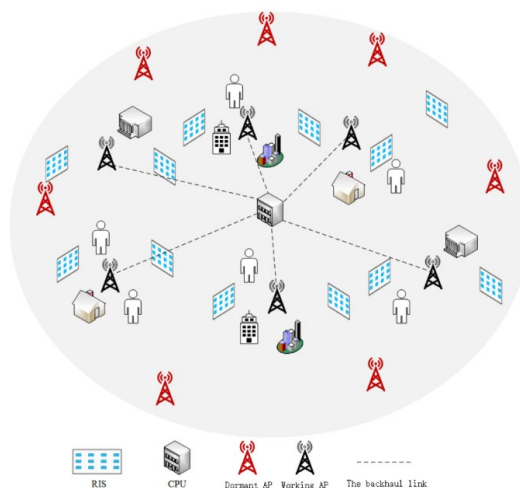
Η κατανόηση αυτών των περιορισμών είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών ενσωμάτωσης των RIS σε συστήματα ISAC για δίκτυα 6G, καθώς και για τον προσδιορισμό κατάλληλων λύσεων μετριασμού των επιπτώσεών τους.

4.2 RIS σε δίκτυα Cell-free

Η ενσωμάτωση των Επαναδιαμορφώσιμων Ευφών Επιφανειών (RIS) σε αρχιτεκτονικές δικτύων χωρίς κυψέλες (Cell-free) αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα δύο καινοτόμων τεχνολογιών για την επίτευξη βελτιωμένης απόδοσης και κάλυψης στα δίκτυα 6G [9, 17]. Σε αυτή την ενότητα, θα αναλύσουμε πώς οι RIS μπορούν να ενισχύσουν τη λειτουργία των δικτύων Cell-free και τις ιδιαίτερες προκλήσεις που προκύπτουν από αυτό το συνδυασμό.

4.2.1 Ενίσχυση κάλυψης & ποιότητας σήματος

Στα παραδοσιακά κυψελοειδή δίκτυα, οι χρήστες που βρίσκονται στα όρια των κυψελών συχνά αντιμετωπίζουν υποβαθμισμένη ποιότητα σήματος λόγω διακυβελικών παρεμβολών και μεγάλης απόστασης από τους σταθμούς βάσης. Τα δίκτυα Cell-free επιχειρούν να αντιμετωπίσουν αυτό το πρόβλημα μέσω της συντονισμένης εξυπηρέτησης των χρηστών από πολλαπλούς καταναμημένους σταθμούς πρόσβασης. Η ενσωμάτωση των RIS σε αυτή την αρχιτεκτονική προσφέρει πρόσθετα πλεονεκτήματα.



Σχήμα 7: RIS-assisted Cell-free Massive MIMO

4.2.1.1 Βελτίωση ποιότητας σήματος και αντιμετώπιση παρεμβολών

Οι RIS μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στη βελτίωση της ποιότητας του σήματος μέσω:

1. **Ενίσχυσης του επιθυμητού σήματος:** Μέσω της κατάλληλης διαμόρφωσης των φάσεων, οι RIS μπορούν να ευθυγραμμίσουν τις φάσεις των σημάτων που φτάνουν στον χρήστη μέσω διαφορετικών διαδρομών, επιτυγχάνοντας εποικοδομητική συμβολή.
2. **Μείωσης των παρεμβολών:** Σε σενάρια με πολλαπλούς χρήστες, οι RIS μπορούν να διαμορφώσουν το περιβάλλον διάδοσης ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές μεταξύ των χρηστών. Αυτό επιτυγχάνεται δημιουργώντας "μηδενισμούς" (nulls) προς την κατεύθυνση των μη επιθυμητών χρηστών ενώ κατευθύνουν ενισχυμένα σήματα προς τους στοχευόμενους χρήστες.
3. **Αντιμετώπισης φαινομένων διαλείψεων:** Σε περιβάλλοντα με έντονες διαλείψεις, οι RIS μπορούν να προσφέρουν επιπλέον διαδρομές διάδοσης, αυξάνοντας την ποικιλομορφία και βελτιώνοντας την αξιοπιστία της επικοινωνίας.

Αυτές οι βελτιώσεις είναι ιδιαίτερα σημαντικές για εφαρμογές ISAC, όπου η ποιότητα του σήματος επηρεάζει άμεσα τόσο την απόδοση της επικοινωνίας όσο και την ακρίβεια της ανίχνευσης.

4.2.2 Διαχείριση παρεμβολών & επαναχρησιμοποίηση πόρων

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της ενσωμάτωσης των RIS σε δίκτυα Cell-free είναι η ενισχυμένη ικανότητα διαχείρισης παρεμβολών και αποδοτικής επαναχρησιμοποίησης των περιορισμένων πόρων του δικτύου.

Στα δίκτυα Cell-free, η διαχείριση παρεμβολών αποτελεί μια σημαντική πρόκληση λόγω της ταυτόχρονης εξυπηρέτησης πολλαπλών χρηστών από διάφορα σημεία πρόσβασης. Οι RIS προσφέρουν καινοτόμες λύσεις για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης. Μέσω της χωρικής επεξεργασίας των παρεμβολών, οι RIS μπορούν να διαμορφώσουν το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον ώστε να δημιουργηθούν περιοχές χαμηλών παρεμβολών (interference nulls) προς συγκεκριμένες κατευθύνσεις, επιτρέποντας την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών στο ίδιο φασματικό εύρος.

Επιπλέον, πολλαπλές RIS μπορούν να συνεργαστούν για τη διαμόρφωση περίπλοκων μοτίβων ανάκλασης που ελαχιστοποιούν τις αμοιβαίες παρεμβολές μεταξύ χρηστών, ακόμα και σε πυκνά περιβάλλοντα. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική όταν συνδυάζεται με τεχνικές βελτιστοποίησης που λαμβάνουν υπόψη την τοπολογία του δικτύου και τις απαιτήσεις QoS. Σε αντίθεση με παθητικές τεχνικές μείωσης παρεμβολών, οι RIS επιτρέπουν τον δυναμικό έλεγχο σε πραγματικό χρόνο, προσαρμόζοντας τα μοτίβα ανάκλασης ανάλογα με τις μεταβαλλόμενες συνθήκες καναλιού και τη κινητικότητα των χρηστών.

Ακόμη, η παρουσία των RIS σε δίκτυα Cell-free επιτρέπει πιο αποδοτικές στρατηγικές διαχείρισης και επαναχρησιμοποίησης πόρων. Μέσω της στοχευμένης κατεύθυνσης των σημάτων και του περιορισμού των παρεμβολών, οι RIS καθιστούν δυνατή την αύξηση της φασματικής απόδοσης κατά 40-60% σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα Cell-free. Η ικανότητα των RIS να δημιουργούν εικονικά απομονωμένες περιοχές κάλυψης επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση των ίδιων φασματικών πόρων σε κοντινές γεωγραφικές περιοχές, αυξάνοντας σημαντικά τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος.

Τέλος, η βελτιωμένη ποιότητα καναλιού που επιτυγχάνεται μέσω των RIS επιτρέπει τη μείωση της απαιτούμενης ισχύος εκπομπής, οδηγώντας σε σημαντικά οφέλη ενεργειακής απόδοσης. Ερευνητικές μελέτες δείχνουν ότι μπορεί να επιτευχθεί μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας

έως και 30%. Σε περιβάλλοντα με μεταβαλλόμενες απαιτήσεις κίνησης, οι RIS μπορούν να διευκολύνουν τη δυναμική ανακατανομή των πόρων του δικτύου, κατευθύνοντας τη χωρητικότητα προς περιοχές με αυξημένη ζήτηση.

4.2.2.1 Τεχνικές υλοποίησης

Για την αποτελεσματική αξιοποίηση των RIS στη διαχείριση παρεμβολών και την επαναχρησιμοποίηση πόρων, έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές υλοποίησης. Αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν τεχνικές βαθιάς ενισχυτικής μάθησης για τη δυναμική ρύθμιση των φάσεων των RIS με στόχο τη βελτιστοποίηση των παρεμβολών και της κατανομής πόρων. Υβριδικές τεχνικές συνδυάζουν παραδοσιακές μεθόδους beamforming στα σημεία πρόσβασης με προσαρμοστικό έλεγχο των RIS για βέλτιστη διαχείριση παρεμβολών. Παράλληλα, αποκεντρωμένοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης επιτρέπουν τη λήψη τοπικών αποφάσεων για τη διαμόρφωση των RIS με περιορισμένη ανταλλαγή πληροφοριών, μειώνοντας την επιβάρυνση του δικτύου οπισθόζευξης.

Η αποτελεσματική διαχείριση παρεμβολών και επαναχρησιμοποίηση πόρων μέσω των RIS αποτελεί ένα κρίσιμο στοιχείο για την πρακτική υλοποίηση δικτύων Cell-free υψηλής απόδοσης, ιδιαίτερα για εφαρμογές ISAC που απαιτούν ταυτόχρονα αξιόπιστη επικοινωνία και ακριβή ανίχνευση.

4.3 Συνεισφορά RIS στο ISAC

Οι Επαναδιαμορφώσιμες Ευφυείς Επιφάνειες, όπως γίνεται κατανοητό, αποτελούν μια επαναστατική τεχνολογία που προσφέρει σημαντικές δυνατότητες βελτίωσης για τα συστήματα Ολοκληρωμένης Επικοινωνίας και Τηλεπισκόπησης [18, 20, 21]. Η μοναδική ικανότητα των RIS να διαμορφώνουν ελεγχόμενα το περιβάλλον διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τις καθιστά ιδανικές για την αντιμετώπιση των θεμελιωδών προκλήσεων που αντιμετωπίζουν τα συστήματα ISAC. Σε αυτή την ενότητα, αναλύονται οι βασικές συνεισφορές των RIS στη βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων ISAC και οι προηγμένες τεχνικές ελέγχου και βελτιστοποίησης που απαιτούνται για τη μεγιστοποίηση αυτών των ωφελειών.

4.3.1 Βελτίωση Λειτουργιών Επικοινωνίας & Ανίχνευσης

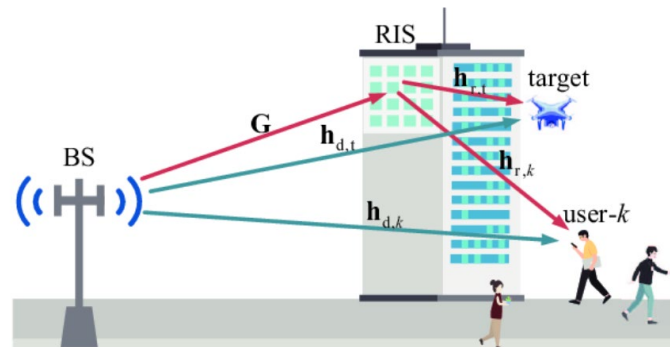
Οι Επαναδιαμορφώσιμες Ευφυείς Επιφάνειες προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες βελτίωσης τόσο για τις λειτουργίες επικοινωνίας όσο και για τις λειτουργίες ανίχνευσης στα συστήματα ISAC, καθιστώντας δυνατή την υπέρβαση θεμελιωδών περιορισμών που χαρακτηρίζουν τις συμβατικές προσεγγίσεις.

Στον τομέα της επικοινωνίας, οι RIS συμβάλλουν καθοριστικά στη βελτίωση της ποιότητας ζεύξης μέσω της δυναμικής διαμόρφωσης του ασύρματου περιβάλλοντος. Σε σενάρια όπου δεν υπάρχει οπτική επαφή (Non line of sight - NLOS) μεταξύ πομπού και δέκτη, οι RIS δημιουργούν εικονικές διαδρομές που παρακάμπουν τα εμπόδια, ενισχύοντας σημαντικά την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος. Πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η κατάλληλη τοποθέτηση και διαμόρφωση των RIS μπορεί να αυξήσει το SNR κατά 10-15 dB σε σενάρια NLOS, επιτρέποντας αξιόπιστη επικοινωνία σε περιβάλλοντα που διαφορετικά θα ήταν προβληματικά.

Επιπλέον, οι RIS επιτρέπουν την αποδοτικότερη χρήση των χωρικών βαθμών ελευθερίας του καναλιού. Με τη δημιουργία εικονικών διαδρομών πολλαπλών εισόδων-πολλαπλών εξόδων (Miltuple

Input – Multiple Output - MIMO), οι RIS αυξάνουν την τάξη του πίνακα καναλιού, βελτιώνοντας έτσι το κέρδος πολυπλεξίας. Αυτό, επιτρέπει υψηλότερους ρυθμούς ελευθερίας μετάδοσης δεδομένων χωρίς την ανάγκη για πρόσθετες κεραίες στους τερματικούς σταθμούς, μειώνοντας το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος.

Στον τομέα της ανίχνευσης, οι RIS προσφέρουν εξίσου σημαντικά οφέλη. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα είναι η βελτίωση της γεωμετρικής διαφορισιμότητας για την ανίχνευση στόχων. Παραδοσιακά συστήματα ραντάρ περιορίζονται από τη γεωμετρία του περιβάλλοντος και συχνά αδυνατούν να εντοπίσουν στόχους που βρίσκονται πίσω από εμπόδια. Οι RIS επιτρέπουν την κάμψη των κυμάτων γύρω από εμπόδια, δημιουργώντας πολλαπλές διαδρομές που αυξάνουν την πιθανότητα επιτυχούς ανίχνευσης.



Σχήμα 8: RIS-assisted ISAC

Ακόμη, η παρουσία των RIS βελτιώνει επίσης την ακρίβεια εκτίμησης παραμέτρων στόχων όπως θέση, ταχύτητα και γωνία άφιξης. Λειτουργώντας ως επιπλέον σημεία αναφοράς στο χώρο, οι RIS αυξάνουν την ποσότητα πληροφορίας που μπορεί να εξαχθεί από τα ανακλώμενα σήματα. Η πληροφορία θέσης των διαφόρων στοιχείων των RIS, σε συνδυασμό με τις γνωστές καθυστερήσεις και τις φάσεις που εισάγονται, επιτρέπει την εφαρμογή προηγμένων τεχνικών τριγωνισμού και πολλαπλών γωνιών για βελτιωμένη ακρίβεια εντοπισμού.

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης RIS σε συστήματα ISAC είναι η δυνατότητα άμβλυνσης του ισοζυγίου μεταξύ επικοινωνίας και ανίχνευσης. Στα συμβατικά συστήματα ISAC, συχνά απαιτείται ένας συμβιβασμός μεταξύ της βελτιστοποίησης του σήματος για επικοινωνία ή για ανίχνευση. Οι RIS προσφέρουν επιπλέον βαθμούς ελευθερίας που επιτρέπουν την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση και των δύο λειτουργιών. Συγκεκριμένα, μέσω της κατάλληλης διαμόρφωσης των φάσεων των στοιχείων τους, οι RIS μπορούν να δημιουργήσουν μοτίβα ανάκλασης που ευνοούν ταυτόχρονα την ποιότητα ζεύξης επικοινωνίας και την ακρίβεια ανίχνευσης.

Επιπλέον, οι RIS επιτρέπουν τη δημιουργία «έξυπνων» περιβαλλόντων ανίχνευσης. Σε αντίθεση με τα παθητικά ανακλαστικά στοιχεία του περιβάλλοντος, οι RIS προσφέρουν προβλέψιμα και ελεγχόμενα χαρακτηριστικά ανάκλασης, μειώνοντας την αβεβαιότητα στην ερμηνεία των επιστρεφόμενων σημάτων. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε πολύπλοκα περιβάλλοντα με έντονη πολυδιαδρομική διάδοση, όπου η διάκριση μεταξύ πραγματικών στόχων και ψευδών ανακλάσεων αποτελεί σημαντική πρόκληση.

Τέλος, ένα από τα πιο καινοτόμα χαρακτηριστικά των RIS στο πλαίσιο των συστημάτων ISAC είναι η δυνατότητα εναλλαγής μεταξύ διαφορετικών λειτουργικών καταστάσεων. Μέσω του προγραμματισμού των φάσεων των στοιχείων τους, οι RIS μπορούν να μεταβαίνουν γρήγορα μεταξύ

καταστάσεων που ευνοούν την επικοινωνία, την ανίχνευση ή έναν ισορροπημένο συνδυασμό τους. Αυτή η προσαρμοστικότητα επιτρέπει στο σύστημα να ανταποκρίνεται δυναμικά σε μεταβαλλόμενες απαιτήσεις και συνθήκες περιβάλλοντος.

4.3.2 Προηγμένες τεχνικές ελέγχου & βελτιστοποίησης

Η αξιοποίηση των πλήρων δυνατοτήτων των RIS σε συστήματα ISAC απαιτεί την εφαρμογή προηγμένων τεχνικών ελέγχου και βελτιστοποίησης που λαμβάνουν υπόψη τις ιδιαιτερότητες και τις απαιτήσεις αυτών των συστημάτων. Οι τεχνικές αυτές στοχεύουν στη βέλτιστη διαμόρφωση των παραμέτρων των RIS, ιδιαίτερα των φάσεων των επιμέρους στοιχείων τους, για την επίτευξη βέλτιστης απόδοσης τόσο στις λειτουργίες επικοινωνίας όσο και στις λειτουργίες ανίχνευσης.

Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης για συστήματα RIS-assisted ISAC είναι εγγενώς πολύπλοκη. Ένα τυπικό πρόβλημα βελτιστοποίησης περιλαμβάνει την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση των φάσεων των N στοιχείων της RIS ($\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$), των παραμέτρων beamforming του πομπού, και ενδεχομένως άλλων παραμέτρων του συστήματος. Ο στόχος είναι συνήθως η μεγιστοποίηση μιας σύνθετης συνάρτησης που αντιπροσωπεύει τόσο την απόδοση επικοινωνίας (όπως είναι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων) όσο και την απόδοση ανίχνευσης (όπως η ακρίβεια εκτίμησης θέσης).

Οι κύριες προσεγγίσεις για την επίλυση αυτού του προβλήματος περιλαμβάνουν:

- **Βελτιστοποίηση με περιορισμούς:** Το πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί ως η βελτιστοποίηση ενός στόχου με περιορισμούς στον άλλο: $\max\{\phi_1, \dots, \phi_n\} f_1(\phi_1, \dots, \phi_n)$ με την προϋπόθεση ότι $f_2(\phi_1, \dots, \phi_n) \geq \gamma$ όπου γ είναι ένα προκαθορισμένο κατώφλι για την ελάχιστη αποδεκτή απόδοση ανίχνευσης.
- **Σταθμισμένη βελτιστοποίηση:** Αυτή η προσέγγιση συνδυάζει τους δύο στόχους σε μια ενιαία συνάρτηση με ένα συντελεστή στάθμισης: $\max\{\phi_1, \dots, \phi_n\} [w \cdot f_1(\phi_1, \dots, \phi_n) + (1-w) \cdot f_2(\phi_1, \dots, \phi_n)]$, όπου $w \in [0,1]$ είναι ο συντελεστής στάθμισης που αντικατοπτρίζει τη σχετική σημασία των δύο στόχων.

Για την πρακτική επίλυση αυτών των προβλημάτων βελτιστοποίησης, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι. Έτσι, οι αλγόριθμοι εναλλασσόμενης βελτιστοποίησης αποτελούν μια δημοφιλή προσέγγιση, κατά τα οποία το πρόβλημα διασπάται σε υπο-προβλήματα που επιλύονται διαδοχικά. Ένα παράδειγμα εφαρμογής τους είναι ότι μπορεί να γίνει εναλλάξ βελτιστοποίηση των φάσεων των RIS και των παραμέτρων beamforming του πομπού, με κάθε βήμα να διατηρεί σταθερό το άλλο σύνολο παραμέτρων.

Επιπλέον, οι τεχνικές κυρτής βελτιστοποίησης αποτελούν μια άλλη σημαντική προσέγγιση. Αν και τα προβλήματα βελτιστοποίησης των RIS είναι εγγενώς μη κυρτά λόγω των περιορισμών στις φάσεις των στοιχείων, διάφορες τεχνικές χαλάρωσης και προσέγγισης έχουν προταθεί για τη μετατροπή τους σε κυρτά προβλήματα που μπορούν να επιλυθούν αποδοτικά.

Τα τελευταία χρόνια, οι προσεγγίσεις βασισμένες στη μηχανική μάθηση έχουν αποκτήσει σημαντική προσοχή για τη βελτιστοποίηση των RIS σε συστήματα ISAC. Συγκεκριμένα, τεχνικές βαθιάς ενισχυτικής μάθησης έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία για την προσαρμοστική βελτιστοποίηση των φάσεων των RIS σε δυναμικά περιβάλλοντα, όπου οι συμβατικές αναλυτικές προσεγγίσεις είναι ανεπαρκείς. Οι προσεγγίσεις αυτές επιτρέπουν στο σύστημα να μαθαίνει από την εμπειρία και να

προσαρμόζεται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες χωρίς την ανάγκη για ακριβή μαθηματικά μοντέλα του περιβάλλοντος.

Ωστόσο, ένα κρίσιμο ζήτημα για την αποτελεσματική βελτιστοποίηση των RIS σε συστήματα ISAC είναι η απόκτηση ακριβών πληροφοριών για το κανάλι. Η τεράστια διάσταση του καναλιού RIS, λόγω του μεγάλου αριθμού στοιχείων, καθιστά την εκτίμηση καναλιού μια σημαντική πρόκληση. Για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές, όπως η συμπίεσμένη ανίχνευση και τα μοντέλα καναλιού βασισμένα σε φυσικές παραμέτρους, που αξιοποιούν την αραιή φύση των καναλιών στο πεδίο των γωνιών και των καθυστερήσεων.

Πέρα από τις μεθόδους βελτιστοποίησης όμως, η αποτελεσματική λειτουργία των RIS σε συστήματα ISAC απαιτεί προηγμένες αρχιτεκτονικές ελέγχου. Οι ιεραρχικές αρχιτεκτονικές ελέγχου έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικές, όπου διαφορετικά επίπεδα ελέγχου λειτουργούν σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες και επίπεδα αφαίρεσης. Για παράδειγμα, ένα υψηλότερο επίπεδο ελέγχου μπορεί να καθορίζει τους γενικούς στόχους βελτιστοποίησης με βάση τις απαιτήσεις των εφαρμογών, ενώ ένα χαμηλότερο επίπεδο διαχειρίζεται την πραγματική διαμόρφωση των φάσεων των στοιχείων σε πραγματικό χρόνο.

Τέλος, η κλιμάκωση των τεχνικών βελτιστοποίησης σε μεγάλης κλίμακας συστήματα RIS-assisted ISAC παραμένει μια σημαντική πρόκληση. Οι κατανεμημένοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης προσφέρουν μια ελπιδοφόρα λύση, επιτρέποντας τη διάσπαση του προβλήματος σε μικρότερα, τοπικά προβλήματα που μπορούν να επιλυθούν με περιορισμένη ανταλλαγή πληροφοριών. Αυτές οι προσεγγίσεις είναι ιδιαίτερα σημαντικές για σενάρια με πολλαπλές RIS και πολλαπλούς χρήστες, όπου η βέλτιστη μορφοποίηση συστήματος πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών στοιχείων του.

Έχοντας αναλύσει τα θεωρητικά στοιχεία, τα χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες των Επαναδιαμορφώσιμων Ευφών Επιφανειών στα συστήματα ISAC, τα επόμενα κεφάλαια της διπλωματικής επικεντρώνονται στην πρακτική εφαρμογή αυτών των εννοιών. Συγκεκριμένα, στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η μοντελοποίηση και προσομοίωση ενός ολοκληρωμένου RIS-assisted MIMO ISAC συστήματος, εξετάζοντας την αρχιτεκτονική του, το μοντέλο καναλιού, τη μεθοδολογία προσομοίωσης και τα σενάρια αξιολόγησης που χρησιμοποιήθηκαν για την αποτίμηση της απόδοσής του.

5

Μοντελοποίηση & Προσομοίωση

RIS-assisted MIMO ISAC

συστήματος

5.1 Αρχιτεκτονική συστήματος και μοντέλο καναλιού

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκε το θεωρητικό υπόβαθρο και αναλύθηκαν εκτενώς οι αρχές λειτουργίας των Επαναδιαμορφώσιμων Ευφών Επιφανειών (RIS), των συστημάτων MIMO και της τεχνολογίας Ολοκληρωμένης Επικοινωνίας και Τηλεπισκόπησης (ISAC). Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μοντελοποίηση και προσομοίωση ενός ολοκληρωμένου συστήματος που συνδυάζει αυτές τις τεχνολογίες σε περιβάλλον δικτύου χωρίς κυψέλες (Cell-free).

Η μοντελοποίηση ενός τέτοιου πολύπλοκου συστήματος απαιτεί την ακριβή περιγραφή των διαφόρων συνιστωσών του, συμπεριλαμβανομένης της τοπολογίας του δικτύου, των χαρακτηριστικών των καναλιών επικοινωνίας, των παραμέτρων των RIS και των μηχανισμών ISAC. Η προσομοίωση επιτρέπει την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος υπό διάφορες συνθήκες και παραμέτρους, παρέχοντας πολύτιμα δεδομένα για την κατανόηση των δυναμικών αλληλεπιδράσεων και την επικύρωση των θεωρητικών προβλέψεων.

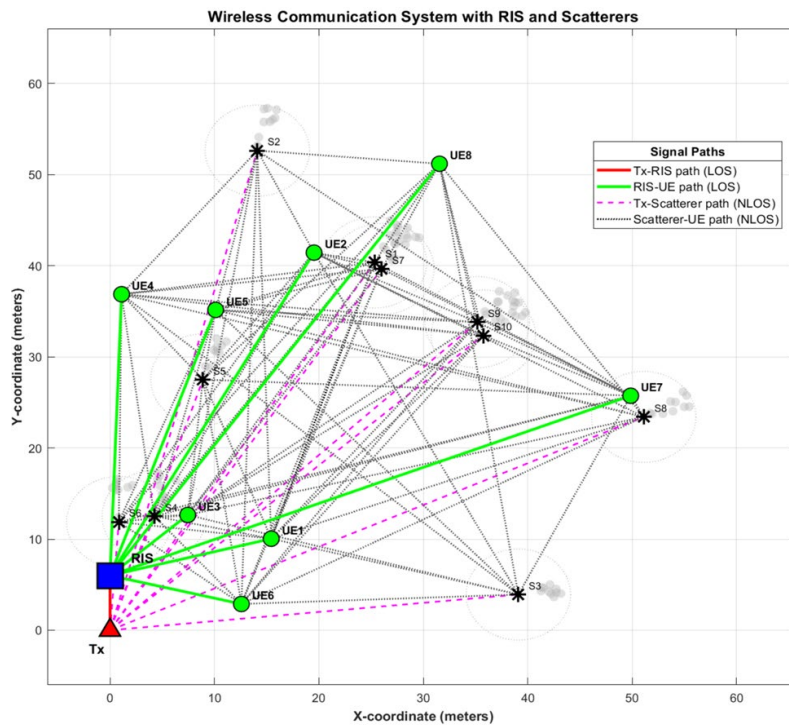
Στις ενότητες που ακολουθούν, παρουσιάζεται αναλυτικά η αρχιτεκτονική του συστήματος, το μαθηματικό μοντέλο του καναλιού, η μεθοδολογία προσομοίωσης και οι τεχνικές βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν.

5.1.1 Cell-free τοπολογία

Το προτεινόμενο σύστημα υιοθετεί μια τοπολογία δικτύου χωρίς κυψέλες, κατά το οποίο οι χρήστες εξυπηρετούνται από πολλαπλά σημεία πρόσβασης χωρίς την ύπαρξη αυστηρών ορίων μεταξύ κυψελών. Η τοπολογία αποτελείται από τα εξής βασικά συστατικά:

- **Σταθμός βάσης πομπού (Tx):** Τοποθετημένος στη θέση $[0, 0]$ του συστήματος συντεταγμένων, διαθέτει συστοιχία κεραίων MIMO με 4 στοιχεία ($N_t = 4$).

- **Τερματικές συσκευές χρηστών (UEs):** Το σύστημα εξετάζει 8 χρήστες τυχαία κατανομημένους σε μια περιοχή κάλυψης διαστάσεων 60×60 μέτρων. Κάθε συσκευή είναι εξοπλισμένη με 2 κεραίες λήψης ($N_r = 2$). Θεωρείται mmWave συχνότητα.
- **Επαναδιαμορφώσιμη Ευφυής Επιφάνεια (RIS):** Τοποθετημένη στη θέση $[0, \text{grid_size}/10]$, αποτελείται από $8 \times 8 = 64$ στοιχεία, διατεταγμένα σε διάταξη τετραγωνικού πλέγματος με απόσταση $\lambda/2$ μεταξύ τους.
- **Σκεδαστές:** Το περιβάλλον περιλαμβάνει 10 κύριους σκεδαστές, καθένας από τους οποίους αποτελείται από μια συστάδα 10 δευτερευόντων σκεδαστών. Οι σκεδαστές αυτοί προσομοιώνουν τα φυσικά εμπόδια και τις ανακλαστικές επιφάνειες του περιβάλλοντος χώρου.



Σχήμα 9: Τοπολογία προτεινόμενου συστήματος

Η τοπολογία του συστήματος σχεδιάστηκε έτσι ώστε να αναπαριστά ένα ρεαλιστικό σενάριο αστικού περιβάλλοντος, όπου οι συνθήκες μεταξύ των σημείων πρόσβασης και των χρηστών μπορούν να ποικίλλουν σημαντικά. Η συχνότητα λειτουργίας ορίστηκε στα 28 GHz, ώστε να αντιστοιχεί στις συχνότητες χιλιοστομετρικών κυμάτων (mmWave) που προορίζονται για τα δίκτυα 5G και 6G, με εύρος ζώνης 50 MHz.

Οι χρήστες και οι σκεδαστές θεωρείται ότι κινούνται, με μέγιστη ταχύτητα 5 m/s, επιτρέποντας την αξιολόγηση της επίδρασης της κινητικότητας στην απόδοση του συστήματος και την εκτίμηση του φαινομένου Doppler.

5.1.2 Ενσωμάτωση RIS & MIMO στοιχείων

Η ενσωμάτωση των τεχνολογιών RIS και MIMO στο σύστημα αποτελεί ένα από τα κεντρικά σημεία καινοτομίας της εργασίας. Η συνέργεια αυτών των τεχνολογιών επιτρέπει την αντιμετώπιση των προκλήσεων που παρουσιάζονται στις υψηλές συχνότητες (mmWave) και την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων και των δύο προσεγγίσεων.

5.1.2.1 Χαρακτηριστικά της Επαναδιαμορφώσιμης Ευφυούς Επιφάνειας

Αρχικά, ο αριθμός των στοιχείων του RIS επιλέχθηκε να είναι ίσος με 64, παρέχοντας επαρκή βαθμό για την διαμόρφωση του ασύρματου περιβάλλοντος, ενώ καθένα στοιχείο μοντελοποιείται ως παθητικός ανακλαστήρας με ρυθμιζόμενη φάση, σταθερό πλάτος και συντελεστή απόδοσης ίσο με 80%. Ακόμη, η απόσταση μεταξύ των στοιχείων ορίστηκε ίση με $\lambda/2$, σύμφωνα με τις συνήθειες πρακτικές σχεδιασμού για την βελτιστοποίηση του κέρδους κεραίας. Τέλος, οι φάσεις των στοιχείων δύναται να διαμορφωθούν με ανάλυση των 6 bit, επιτρέποντας, με αυτόν τον τρόπο, 64 διαφορετικές καταστάσεις φάσης για κάθε στοιχείο.

5.1.2.2 Χαρακτηριστικά της τεχνολογίας Πολλαπλών Εισόδων - Πολλαπλών Εξόδων

Όσον αφορά τον πομπό, αξιοποιείται ένα σύστημα πολλαπλών κεραιών και για την ακρίβεια ορίστηκε ο αριθμός τους ίσο με 4. Από την πλευρά του δέκτη, οι τερματικές συσκευές των χρηστών διαθέτουν 2 κεραιές η κάθε μία, επιτρέποντας την εφαρμογή τεχνικών διαφορισιμότητας στην πλευρά της λήψης. Εκτός αυτών, οι κεραιές λειτουργούν σύμφωνα με το μοντέλο ULA (Uniform Linear Array), με τις κεραιές, όπως αναφέρθηκε, να είναι διατεταγμένες σε ίσες αποστάσεις.

Η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών πραγματοποιείται μέσω του μαθηματικού μοντέλου καναλιού που αναλύεται στην παρακάτω υποενότητα. Το συγκεκριμένο μοντέλο, λαμβάνει υπόψη τόσο τις απευθείας διαδρομές σήματος (Line of Sight – LOS), όσο και τις έμμεσες διαδρομές μέσω σκεδαστών (NLOS), καθώς και την επίδραση του RIS στην διαμόρφωση του ασύρματου περιβάλλοντος.

Πρέπει να γίνει κατανοητό, ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχείων MIMO και RIS είναι αρκετά σημαντική για την επίτευξη βέλτιστης απόδοσης του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, η ικανότητα του RIS είναι να διαμορφώνει τις φάσεις των στοιχείων της ώστε να δημιουργεί εποικοδομητική συμβολή στους επιθυμητούς χρήστες, ενώ παράλληλα οι τεχνικές MIMO μπορούν να αξιοποιήσουν τις πολλαπλές διαδρομές που δημιουργούνται για την βελτίωση του κέρδους πολυπλεξίας.

5.1.3 Υλοποίηση λειτουργιών ISAC

Η υλοποίηση των λειτουργιών ISAC στο προτεινόμενο σύστημα βασίζεται στην αξιοποίηση του ίδιου συνόλου πόρων και σημάτων τόσο για επικοινωνία όσο και για ανίχνευση/εντοπισμό. Το μοντέλο ενσωματώνει τις ακόλουθες λειτουργίες ISAC.

5.1.3.1 Μοντελοποίηση Καναλιού Διττής Χρήσης

Στο πλαίσιο του μοντέλου καναλιού διττής χρήσης, ενσωματώνονται παράμετροι που επηρεάζουν εξίσου την επικοινωνία και την ανίχνευση. Η καθυστέρηση διάδοσης των σημάτων αποτελεί κρίσιμη παράμετρο καθώς καθορίζει τόσο την ποιότητα της επικοινωνίας, όσο και την ακρίβεια της ανίχνευσης. Οι γωνίες άφιξης (AoA) και αναχώρησης (AoD) των σημάτων χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης και την εφαρμογή τεχνικών beamforming, ενώ παράλληλα παρέχουν πληροφορίες για τη χωρική θέση των χρηστών και των σκεδαστών.

Ομοίως, η μετατόπιση Doppler επηρεάζει την ποιότητα επικοινωνίας λόγω της χρονικής μεταβολής του καναλιού, ενώ ταυτόχρονα μας επιτρέπει να εκτιμήσουμε την ταχύτητα των

κινούμενων αντικειμένων στο περιβάλλον. Τα χαρακτηριστικά των σκεδαστών αποτελούν επίσης σημαντικό στοιχείο του μοντέλου, παρέχοντας πληροφορίες για τη δομή και τη σύνθεση του περιβάλλοντος διάδοσης. Ακόμη, βάσει της καθυστέρησης διάδοσης, είναι δυνατός ο υπολογισμός των αποστάσεων μεταξύ των διαφόρων στοιχείων του συστήματος, χρησιμοποιώντας τη σχέση $d = c \cdot \tau$, όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός και τ η μετρούμενη καθυστέρηση, επιτρέποντας έτσι την εκτίμηση της θέσης των διαφόρων στοιχείων του συστήματος.

5.1.3.2 Μηχανισμοί ανίχνευσης

Το φαινόμενο της σκέδασης από αντικείμενα στο περιβάλλον αποτελεί βασικό μηχανισμό για την ανίχνευση και τον εντοπισμό αντικειμένων. Επιπλέον, η διατομή ραντάρ (Radar Cross Section - RCS) των σκεδαστών, που προσομοιώνει τα αντικείμενα στο περιβάλλον, εκφράζει την ικανότητα ενός αντικειμένου να ανακλά την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια προς την κατεύθυνση του δέκτη και αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών των αντικειμένων. Άλλο ένα μετρικό ανίχνευσης είναι ο υπολογισμός του Κάτω Ορίου Cramér-Rao (Cramér-Rao Bound - CRB), το οποίο αποτελεί μια βάση για την αξιολόγηση της ακρίβειας εκτίμησης παραμέτρων όπως η θέση και η ταχύτητα των αντικειμένων. Ειδικότερα, το CRB παρέχει το θεωρητικό κάτω όριο της διακύμανσης οποιουδήποτε αμερόληπτου εκτιμητή και χρησιμοποιείται στο σύστημά μας ως μετρική για την αξιολόγηση της απόδοσης των αλγορίθμων εκτίμησης θέσης και παρακολούθησης.

5.1.3.3 Βελτιστοποίηση ISAC

Η βελτιστοποίηση ISAC αποτελεί κρίσιμο στοιχείο της υλοποίησης, καθώς επιδιώκει να επιτύχει τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ των δύο λειτουργιών του συστήματος. Έτσι, εφαρμόζονται αλγόριθμοι βελτιστοποίησης οι οποίοι στοχεύουν στη βελτίωση τόσο των μετρικών επικοινωνίας όσο και των μετρικών ανίχνευσης. Συγκεκριμένα, το Signal-to-Noise Ratio (SNR) και το συνολικό άθροισμα ρυθμών μετάδοσης (sum-rate) χρησιμοποιούνται ως μετρικές για την αξιολόγηση της απόδοσης επικοινωνίας, ενώ το CRB χρησιμοποιείται ως μετρική για την αξιολόγηση της ακρίβειας ανίχνευσης.

Ακόμη, η βελτιστοποίηση των φάσεων των στοιχείων RIS αποτελεί κεντρικό μέρος αυτής της διαδικασίας, καθώς επιτρέπει τη δυναμική διαμόρφωση του περιβάλλοντος διάδοσης ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή ισορροπία μεταξύ απόδοσης επικοινωνίας και ακρίβειας ανίχνευσης, ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις της εφαρμογής.

5.1.3.4 Μοντελοποίηση κινητικότητας

Η μοντελοποίηση κινητικότητας αποτελεί επίσης σημαντικό στοιχείο του συστήματος ISAC, καθώς η κίνηση των χρηστών και των σκεδαστών επηρεάζει σημαντικά τόσο την επικοινωνία όσο και την ανίχνευση. Οι επιδράσεις της κινητικότητας επηρεάζουν την ποιότητα επικοινωνίας μέσω του φαινομένου Doppler, το οποίο προκαλεί μετατόπιση συχνότητας και διασπορά του φάσματος του σήματος, δυσχεραίνοντας την ανίχνευση και αποκωδικοποίηση.

Παράλληλα, η κινητικότητα επηρεάζει την ακρίβεια ανίχνευσης μέσω της χρονικής μεταβολής των παραμέτρων του καναλιού, απαιτώντας συνεχή εκτίμηση και προσαρμογή των αλγορίθμων παρακολούθησης. Στο σύστημά μας, η κίνηση των σκεδαστών και των χρηστών μοντελοποιείται με τυχαίες ταχύτητες έως 5 m/s, αντιπροσωπεύοντας ρεαλιστικά σενάρια κίνησης σε αστικό περιβάλλον.

5.1.3.5 Μαθηματικό μοντέλο καναλιού ISAC

Το μαθηματικό μοντέλο του καναλιού για το προτεινόμενο σύστημα ISAC ενσωματώνει τόσο τις διαδρομές οπτικής επαφής (LOS) όσο και τις διαδρομές μη οπτικής επαφής (NLOS), παρέχοντας μια ολοκληρωμένη περιγραφή του περιβάλλοντος διάδοσης.

Το κανάλι LOS μέσω RIS αποτελείται από τρεις βασικές συνιστώσες: το κανάλι Tx-RIS (h_1), που μοντελοποιεί τη διάδοση από τον πομπό στο RIS, την απόκριση της RIS (Φ), που αναπαριστά τον διαγώνιο πίνακα των συντελεστών ανάκλασης του RIS, και το κανάλι RIS-UE (h_2), που μοντελοποιεί τη διάδοση από το RIS στους χρήστες. Το συνολικό κανάλι LOS δίνεται από το γινόμενο:

$$H_{LOS} = H_2 \times \Phi \times H_1$$

αντιπροσωπεύοντας την διάδοση από τον πομπό στους χρήστες μέσω του RIS.

Στην συνέχεια, το κανάλι NLOS μέσω σκεδαστών μοντελοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τις διαδρομές Tx-σκεδαστής-UE αλλά και RIS-σκεδαστής-UE για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς σκεδαστών και χρηστών. Αυτή η μοντελοποίηση περιλαμβάνει τα φαινόμενα εξασθένησης λόγω απόστασης και σκίασης (shadowing), τις καθυστερήσεις διάδοσης λόγω των διαφορετικών μηκών διαδρομής, και τις μετατοπίσεις Doppler λόγω της κίνησης των σκεδαστών και των χρηστών. Η συνολική συμβολή του καναλιού NLOS προκύπτει από το άθροισμα των συμβολών όλων των διαδρομών μέσω σκεδαστών, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά κάθε διαδρομής.

Συνεπώς, προκύπτει το συνολικό κανάλι του συστήματος από το συνδυασμό των καναλιών LOS και NLOS, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές καθυστερήσεις των διαδρομών. Έτσι, η εξίσωση του συνολικού καναλιού δίνεται από την σχέση:

$$H_{total} = H_{NLOS} + H_{LOS}$$

αντιπροσωπεύοντας την υπέρθεση όλων των συμβολών των διαφορετικών διαδρομών διάδοσης.

Αυτό το ολοκληρωμένο μοντέλο καναλιού ISAC επιτρέπει την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος τόσο για λειτουργίες επικοινωνίας, μέσω της εκτίμησης των ρυθμών μετάδοσης και των ποσοστών σφαλμάτων, όσο και για λειτουργίες ανίχνευσης, μέσω της εκτίμησης της ακρίβειας προσδιορισμού θέσης και παρακολούθησης.

5.2 Ανάπτυξη προσομοίωσης & μεθοδολογία

Στην εν λόγω υποενότητα, αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την ανάπτυξη της προσομοίωσης, περιγράφονται οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που εφαρμόστηκαν και παρουσιάζονται τα σενάρια αξιολόγησης και οι μετρικές που χρησιμοποιήθηκαν για την αποτίμηση της απόδοσης του συστήματος.

5.2.1 Περιγραφή υλοποίησης & αλγορίθμων

Η προσομοίωση αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB, επιτρέποντας την ακριβή μοντελοποίηση και αξιολόγηση του προτεινόμενου RIS-assisted MIMO ISAC συστήματος. Η υλοποίηση ακολουθεί μια δομημένη προσέγγιση, με κάθε συνιστώσα του συστήματος να υλοποιείται ως ξεχωριστή συνάρτηση, διευκολύνοντας έτσι τη μεταβολή των παραμέτρων και την επέκταση του μοντέλου.

5.2.1.1 Αρχικοποίηση και παραμετροποίηση συστήματος

Το πρώτο στάδιο της προσομοίωσης περιλαμβάνει την αρχικοποίηση των βασικών παραμέτρων του συστήματος, όπως η συχνότητα λειτουργίας (**28 GHz**), το εύρος ζώνης (**50 MHz**), οι διαστάσεις της περιοχής προσομοίωσης (**60×60 μέτρα**), και οι αριθμοί κεραιών στον πομπό (**4**) και στους δέκτες (**2 ανά χρήστη**). Επιπλέον, οι θέσεις των διαφόρων στοιχείων του συστήματος καθορίζονται σε αυτό το στάδιο:

- ο πομπός τοποθετείται στην αρχή των αξόνων $[0, 0]$,
- το RIS σε καθορισμένη θέση $[0, \text{grid_size}/10]$,
- οι χρήστες και οι σκεδαστές κατανέμονται τυχαία στην περιοχή προσομοίωσης.

Στη συνέχεια, υλοποιούνται οι παραμετροποιήσεις των δύο βασικών δομικών στοιχείων του συστήματος: του RIS και των συστάδων σκεδαστών.

Για το RIS, η παραμετροποίηση περιλαμβάνει:

- Τον καθορισμό της διάταξης του RIS ως πλέγμα 8×8 στοιχείων (συνολικά 64 στοιχεία)
- Την αρχικοποίηση των φάσεων των στοιχείων με τυχαίες τιμές στο διάστημα $[0, 2\pi]$
- Τον υπολογισμό των θέσεων των στοιχείων με απόσταση $\lambda/2$ μεταξύ τους
- Τον υπολογισμό της απόκρισης κάθε στοιχείου ως τον μιγαδικό εκθετικό της φάσης του
- Τον καθορισμό της απόδοσης των στοιχείων (80%) για τη μοντελοποίηση των απωλειών
- Τον καθορισμό της ανάλυσης φάσης (6-bit), επιτρέποντας 64 διαφορετικές καταστάσεις φάσης ανά στοιχείο

Για τις συστάδες σκεδαστών, η παραμετροποίηση περιλαμβάνει:

- Τη δημιουργία 10 κύριων σκεδαστών, καθένas από τους οποίους αποτελεί το κέντρο μιας συστάδας με 10 υπο-σκεδαστές
- Την κατανομή των υπο-σκεδαστών γύρω από το κέντρο της συστάδας με ακτίνα 5 μέτρα και περιορισμένη γωνιακή διασπορά ($\pi/12$)
- Τον καθορισμό των ταχυτήτων και κατευθύνσεων κίνησης των σκεδαστών, με τυχαίες ταχύτητες έως 5 m/s

5.2.1.2 Υπολογισμός αποστάσεων και γωνιών

Μετά την αρχικοποίηση του συστήματος, υπολογίζονται οι αποστάσεις και οι γωνίες μεταξύ των διαφόρων στοιχείων του συστήματος, που είναι απαραίτητες για τη μοντελοποίηση του καναλιού. Συγκεκριμένα, υπολογίζονται:

- Οι αποστάσεις μεταξύ του πομπού και των χρηστών, του πομπού και του RIS, του RIS και των χρηστών, του πομπού και των σκεδαστών, του RIS και των σκεδαστών, των σκεδαστών και των χρηστών, και όλοι οι συνδυασμοί των μεταξύ τους αποστάσεων, χρησιμοποιώντας την Ευκλείδεια απόσταση.
- Οι γωνίες άφιξης (AoA) και αναχώρησης (AoD) για κάθε διαδρομή επικοινωνίας, οι οποίες είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό των διανυσμάτων κατεύθυνσης (steering vectors) των συστοιχιών κεραιών. Οι γωνίες υπολογίζονται με βάση τις σχετικές θέσεις των στοιχείων του

συστήματος, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση atan2 για τον υπολογισμό της γωνίας μεταξύ δύο σημείων.

5.2.1.3 Μοντελοποίηση απωλειών διάδοσης

Η μοντελοποίηση των απωλειών διάδοσης είναι κρίσιμη για τον ρεαλιστικό υπολογισμό της ισχύος του σήματος στους δέκτες. Για τις διάφορες διαδρομές του συστήματος, χρησιμοποιείται το μοντέλο απωλειών διάδοσης της 3GPP για αστικό μικροκυψελωτό περιβάλλον (UMi), το οποίο λαμβάνει υπόψη τη συχνότητα λειτουργίας, την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, και την επίδραση της σκίασης.

Για τις διαδρομές με οπτική επαφή (LOS), οι απώλειες διάδοσης υπολογίζονται με τον τύπο:

$$PL_{(dB)} = 32.4 + 20 \times \log_{10}(\text{frequency}_{GHz}) + 21 \times \log_{10}(\text{distance}) + \sigma$$

όπου frequency_GHz είναι η συχνότητα σε GHz, distance είναι η απόσταση σε μέτρα, και σ είναι η τυχαία συνιστώσα σκίασης με κανονική κατανομή $N(0, 4)$.

Για τις διαδρομές χωρίς οπτική επαφή (NLOS) μέσω σκεδαστών, οι συνολικές απώλειες διάδοσης υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες στις δύο επιμέρους διαδρομές: από τον πομπό στον σκεδαστή και από τον σκεδαστή στον δέκτη. Οι απώλειες αυτές συνδυάζονται σε γραμμική κλίμακα για τον υπολογισμό της συνολικής απώλειας.

5.2.1.4 Μοντελοποίηση σκέδασης & RCS

Η μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών σκέδασης είναι απαραίτητη για την ακριβή προσομοίωση της αλληλεπίδρασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με τα αντικείμενα του περιβάλλοντος. Κάθε σκεδαστής χαρακτηρίζεται από τη διατομή ραντάρ του (Radar Cross Section - RCS), που καθορίζει την ικανότητά του να ανακλά ηλεκτρομαγνητική ενέργεια.

Για κάθε κύριο σκεδαστή, ανατίθεται μια τυχαία τιμή RCS από ένα προκαθορισμένο σύνολο τιμών που αντιπροσωπεύουν τυπικά αντικείμενα σε αστικό περιβάλλον (0.25, 0.5, 1, 2 και 5 m²). Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο συντελεστής σκέδασης a_i για κάθε σκεδαστή, ο οποίος χρησιμοποιείται στο μοντέλο καναλιού. Ο συντελεστής αυτός υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$a_i = \frac{\sqrt{\sigma}}{4 * \pi}$$

όπου σ είναι η διατομή ραντάρ του σκεδαστή (RCS).

5.2.1.5 Υπολογισμός διανυσμάτων κατεύθυνσης

Τα διανύσματα κατεύθυνσης (steering vectors) για τις συστοιχίες κεραιών στον πομπό και στους δέκτες είναι απαραίτητα για την μοντελοποίηση των χωρικών χαρακτηριστικών του καναλιού MIMO. Τα διανύσματα αυτά εξαρτώνται από τη γωνία άφιξης/αναχώρησης του σήματος, τον αριθμό των κεραιών, και την απόσταση μεταξύ των στοιχείων της κεραίας.

Για τον πομπό, το διάνυσμα κατεύθυνσης υπολογίζεται με βάση τη γωνία αναχώρησης (AoD) και εκφράζει τη σχετική φάση του σήματος που εκπέμπεται από κάθε στοιχείο της συστοιχίας κεραιών προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Για τον δέκτη, το διάνυσμα κατεύθυνσης υπολογίζεται με βάση

τη γωνία άφιξης (AoA) και εκφράζει τη σχετική φάση του σήματος που λαμβάνεται από κάθε στοιχείο της συστοιχίας.

5.2.1.6 Υπολογισμός συντελεστών καναλιού

Ο υπολογισμός των συντελεστών καναλιού αποτελεί το κεντρικό τμήμα της προσομοίωσης και περιλαμβάνει τον υπολογισμό των συντελεστών για τις διάφορες διαδρομές του συστήματος:

1. **Κανάλι NLOS μέσω σκεδαστών:** Για κάθε χρήστη, υπολογίζονται οι συντελεστές καναλιού για όλες τις διαδρομές μέσω σκεδαστών, λαμβάνοντας υπόψη:

- Τα διανύσματα κατεύθυνσης του πομπού και του δέκτη
- Τον συντελεστή σκέδασης του σκεδαστή
- Την καθυστέρηση διάδοσης λόγω της απόστασης
- Τη μετατόπιση Doppler λόγω της κίνησης του σκεδαστή
- Την τυχαία φάση λόγω της ανάκλασης
- Τις απώλειες διάδοσης

Οι συντελεστές αυτοί συνδυάζονται για να δημιουργήσουν ένα μοντέλο ευρείας ζώνης, όπου οι συνεισφορές από τις διάφορες διαδρομές προστίθενται στις αντίστοιχες καθυστερήσεις, δημιουργώντας έτσι έναν τρισδιάστατο πίνακα καναλιού για κάθε χρήστη. Με ακριβώς όμοιο τρόπο μπορεί να υπολογιστεί το NLOS κανάλι μεταξύ RIS και UEs.

2. **Κανάλι LOS Tx-RIS:** Υπολογίζεται ο συντελεστής καναλιού μεταξύ του πομπού και του RIS, λαμβάνοντας υπόψη:

- Τα διανύσματα κατεύθυνσης του πομπού και του RIS
- Την καθυστέρηση διάδοσης λόγω της απόστασης
- Μια τυχαία φάση
- Τις απώλειες διάδοσης

3. **Κανάλι LOS RIS-UEs:** Για κάθε χρήστη, υπολογίζεται ο συντελεστής καναλιού μεταξύ του RIS και του χρήστη, λαμβάνοντας υπόψη:

- Τα διανύσματα κατεύθυνσης του RIS και του δέκτη
- Την καθυστέρηση διάδοσης λόγω της απόστασης
- Τη μετατόπιση Doppler λόγω της κίνησης του χρήστη
- Μια τυχαία φάση
- Τις απώλειες διάδοσης

4. **Συνολικό κανάλι:** Τέλος, υπολογίζεται το συνολικό κανάλι του συστήματος, συνδυάζοντας τις συνεισφορές από όλες τις διαδρομές:

- Το κανάλι LOS μέσω του RIS, που προκύπτει από τον συνδυασμό των καναλιών Tx-RIS και RIS-UEs, λαμβάνοντας υπόψη την απόκριση των στοιχείων του RIS και την απόδοσή τους
- Το κανάλι NLOS μέσω των σκεδαστών

Το συνολικό κανάλι αναπαρίσταται ως ένας τετραδιάστατος πίνακας, που περιγράφει τη σχέση μεταξύ κάθε κεραίας εκπομπής, κάθε κεραίας λήψης, για κάθε χρήστη και για κάθε χρονική καθυστέρηση.

5.2.1.7 Υπολογισμός μετρικών απόδοσης

Μετά τον υπολογισμό του συνολικού καναλιού, υπολογίζονται οι μετρικές απόδοσης του συστήματος, που περιλαμβάνουν:

1. **SNR για κάθε χρήστη:** Υπολογίζεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο για κάθε χρήστη, λαμβάνοντας υπόψη την ισχύ του σήματος που φτάνει στον χρήστη (που εξαρτάται από την ισχύ εκπομπής, το κέρδος των κεραιών και τις απώλειες καναλιού) και το επίπεδο θορύβου.
2. **Χωρητικότητα καναλιού για κάθε χρήστη:** Υπολογίζεται η χωρητικότητα του καναλιού για κάθε χρήστη, χρησιμοποιώντας τον τύπο του Shannon:

$$C = B \times \log_2(1 + \text{SNR})$$

όπου B είναι το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

3. **Συνολικός ρυθμός μετάδοσης (Sum Rate):** Υπολογίζεται ως το άθροισμα των χωρητικοτήτων καναλιού όλων των χρηστών.
4. **Σύγκριση με συστήματα χωρίς RIS:** Υπολογίζονται επίσης οι μετρικές για ένα σύστημα που χρησιμοποιεί μόνο τις διαδρομές NLOS (χωρίς RIS), για την αξιολόγηση της συνεισφοράς του RIS στην απόδοση του συστήματος.
5. **Cramér-Rao Bound (CRB):** Υπολογίζεται το κάτω όριο Cramér-Rao για την εκτίμηση θέσης, που αποτελεί μια μετρική της ακρίβειας εντοπισμού που μπορεί να επιτευχθεί.

Οι μετρικές αυτές αναλύονται και παρουσιάζονται τόσο σε μορφή πινάκων όσο και σε γραφήματα, για την καλύτερη κατανόηση της απόδοσης του συστήματος υπό διάφορες συνθήκες.

5.2.1.8 Μοντέλο κινητικότητας

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του προσομοιωτή είναι η μοντελοποίηση της κινητικότητας των χρηστών και των σκεδαστών, που επιτρέπει την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος σε δυναμικά περιβάλλοντα. Η κινητικότητα μοντελοποιείται με τους εξής τρόπους:

1. **Ταχύτητες και κατευθύνσεις κίνησης:** Κάθε χρήστης και κάθε συστάδα σκεδαστών έχει μια τυχαία ταχύτητα (έως 5 m/s) και μια τυχαία κατεύθυνση κίνησης.
2. **Μετατόπιση Doppler:** Η κίνηση των χρηστών και των σκεδαστών προκαλεί μετατόπιση Doppler στα λαμβανόμενα σήματα. Η μετατόπιση αυτή υπολογίζεται με βάση τη σχετική ταχύτητα και κατεύθυνση κίνησης, και ενσωματώνεται στο μοντέλο καναλιού.
3. **Ενημέρωση θέσεων:** Οι θέσεις των χρηστών και των σκεδαστών ενημερώνονται με βάση τις ταχύτητες και τις κατευθύνσεις κίνησής τους, επιτρέποντας έτσι τη μελέτη της απόδοσης του συστήματος σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

5.2.1.9 Οπτικοποίηση συστήματος

Για την καλύτερη κατανόηση της τοπολογίας του συστήματος και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, υλοποιήθηκαν συναρτήσεις οπτικοποίησης που παρέχουν γραφικές αναπαραστάσεις:

1. **Τοπολογία συστήματος:** Απεικόνιση της θέσης του πομπού, του RIS, των χρηστών, των σκεδαστών και των διαδρομών διάδοσης μεταξύ τους. Χρησιμοποιούνται διαφορετικά χρώματα και στυλ για τη διάκριση μεταξύ των διαφόρων στοιχείων και διαδρομών.

2. **Απεικόνιση φάσεων RIS:** Απεικόνιση των φάσεων των στοιχείων του RIS, τόσο πριν όσο και μετά τη βελτιστοποίηση, επιτρέποντας την οπτική αξιολόγηση των αλλαγών που επιφέρει η βελτιστοποίηση.
3. **Γραφήματα απόδοσης:** Δημιουργία γραφημάτων που απεικονίζουν την απόδοση του συστήματος (SNR, χωρητικότητα, CRB) για διάφορους χρήστες και σενάρια, επιτρέποντας τη συγκριτική αξιολόγηση των επιδόσεων.

Συνολικά, ο προσομοιωτής παρέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον για τη μελέτη των χαρακτηριστικών και της απόδοσης ενός RIS-assisted MIMO ISAC συστήματος, επιτρέποντας την αξιολόγηση διαφορετικών διαμορφώσεων και σεναρίων λειτουργίας.

5.2.2 Τεχνικές Βελτιστοποίησης φάσεων RIS

Η βελτιστοποίηση των φάσεων των στοιχείων του RIS αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα ζητήματα για την αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος RIS-assisted MIMO ISAC. Στο πλαίσιο της διπλωματικής, υλοποιήθηκαν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις βελτιστοποίησης, που ανταποκρίνονται στους διαφορετικούς στόχους του συστήματος ISAC: τη βελτιστοποίηση της απόδοσης επικοινωνίας και τη βελτιστοποίηση της ακρίβειας ανίχνευσης. Οι προσεγγίσεις αυτές αναλύονται λεπτομερώς παρακάτω.

5.2.2.1 Διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης των φάσεων του RIS είναι εγγενώς μη κυρτό, λόγω των περιορισμών στις φάσεις των στοιχείων και της πολύπλοκης σχέσης μεταξύ των φάσεων και των μετρικών απόδοσης. Το γενικό πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί ως:

$$\max_{\phi} f(\phi)$$

υπό τους περιορισμούς: $0 \leq \phi_n < 2\pi, \forall n = 1, 2, \dots, N$ όπου $\phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N]^T$ είναι το διάνυσμα των φάσεων των N στοιχείων του RIS, και $f(\phi)$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση που εκφράζει τη μετρική απόδοσης που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε.

Δεδομένης της μη κυρτής φύσης του προβλήματος, η εύρεση της βέλτιστης λύσης είναι υπολογιστικά απαιτητική. Για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, υιοθετήθηκαν αριθμητικές μέθοδοι βελτιστοποίησης με πολλαπλές επανεκκινήσεις, για την αποφυγή παγίδευσης σε τοπικά βέλτιστα.

5.2.2.1.1 Βελτιστοποίηση ρυθμού μετάδοσης

Η πρώτη προσέγγιση επικεντρώνεται στη μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης (sum rate) του συστήματος, που αποτελεί μια κρίσιμη μετρική για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος από την πλευρά της επικοινωνίας. Ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης ορίζεται ως το άθροισμα των χωρητικοτήτων καναλιού όλων των χρηστών:

$$R_{sum}(\phi) = \sum_{u=1}^U B_u \log_2(1 + SNR_u)$$

όπου U είναι ο αριθμός των χρηστών, B_u είναι το εύρος ζώνης που διατίθεται στον χρήστη u , και SNR_u είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο για τον χρήστη u , που εξαρτάται από τις φάσεις των στοιχείων του RIS.

Το SNR_u μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$SNR_u = \frac{P_T \times G_T \times G_R}{N_0}$$

όπου P_T είναι η ισχύς εκπομπής, G_T είναι το κέρδος της κεραίας εκπομπής, G_R είναι το κέρδος της κεραίας λήψης, και N_0 είναι η ισχύς του θορύβου.

Ακόμη, το SNR κάθε χρήστη εξαρτάται από το συνολικό κανάλι, το οποίο περιλαμβάνει τόσο τις απευθείας διαδρομές όσο και τις διαδρομές μέσω του RIS. Το συνολικό κανάλι για τον χρήστη u μπορεί να εκφραστεί ως:

$$H_u^{total} = H_u^{NLOS} + H_{2,u} \times \Phi \times H_1$$

όπου H_u^{NLOS} είναι το κανάλι για τις διαδρομές χωρίς οπτική επαφή (NLOS), H_1 είναι το κανάλι μεταξύ του πομπού και του RIS, $H_{2,u}$ είναι το κανάλι μεταξύ του RIS και του χρήστη u και $\Phi = \text{diag}([\beta_1^{ej\phi^1}, \beta_2^{ej\phi^2}, \dots, \beta_N^{ej\phi^N}])$ είναι ο διαγώνιος πίνακας που αντιπροσωπεύει την απόκριση του RIS, με β_n να είναι ο συντελεστής απόδοσης του στοιχείου n .

Η βελτιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο διαδοχικού τετραγωνικού προγραμματισμού (Sequential Quadratic Programming, SQP), που είναι μια επαναληπτική μέθοδος για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Η μέθοδος SQP προσεγγίζει το αρχικό πρόβλημα με μια ακολουθία τετραγωνικών προβλημάτων, που μπορούν να επιλυθούν αποδοτικά.

Για την αποφυγή παγίδευσης σε τοπικά βέλτιστα, εφαρμόστηκε η τεχνική των πολλαπλών επανεκκινήσεων (multiple restarts), όπου η βελτιστοποίηση επαναλαμβάνεται με διαφορετικά τυχαία αρχικά σημεία, και διατηρείται η καλύτερη λύση που βρέθηκε σε όλες τις επαναλήψεις. Η προσέγγιση αυτή αυξάνει σημαντικά την πιθανότητα εύρεσης μιας λύσης κοντά στο καθολικό βέλτιστο.

Επιπλέον, για τη βελτίωση της αποδοτικότητας της βελτιστοποίησης, χρησιμοποιήθηκαν οι αρχικές τυχαίες φάσεις του RIS ως αρχικό σημείο για την πρώτη επανεκκίνηση, παρέχοντας έτσι ένα σημείο εκκίνησης που είναι ήδη εφικτό.

5.2.2.2 Βελτιστοποίηση Cramér-Rao Bound (CRB)

Η δεύτερη προσέγγιση επικεντρώνεται στη βελτίωση της ακρίβειας ανίχνευσης μέσω της ελαχιστοποίησης του κάτω ορίου Cramér-Rao (Cramér-Rao Bound, CRB), που αποτελεί μια θεμελιώδη μετρική για την αξιολόγηση της ακρίβειας εκτίμησης θέσης.

Το CRB παρέχει ένα κάτω όριο για τη διακύμανση οποιουδήποτε αμερόληπτου εκτιμητή, και συνεπώς η ελαχιστοποίησή του οδηγεί σε βελτίωση της ακρίβειας εντοπισμού. Για την εκτίμηση θέσης με βάση μετρήσεις χρόνου άφιξης, το CRB μπορεί να προσεγγιστεί ως:

$$CRB_u = \frac{c^2}{8 \times \pi^2 \times B^2 \times SNR_u}$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός και B είναι το εύρος ζώνης του σήματος.

Στην πράξη, για λόγους υπολογιστικής σταθερότητας και συγκρισιμότητας, χρησιμοποιήθηκε η εξής προσέγγιση του CRB:

$$CRB_u = \frac{B^2}{2 \times SNR_u} \times 10^9$$

όπου το 10^9 είναι ένας παράγοντας κλιμάκωσης για την αποφυγή πολύ μικρών τιμών.

Το συνολικό CRB του συστήματος ορίζεται ως το άθροισμα των CRB όλων των χρηστών:

$$CRB_{total}(\varphi) = \sum_{u=1}^U CRB_u(\varphi)$$

Η βελτιστοποίηση του CRB υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τον ίδιο αλγόριθμο SQP και την τεχνική των πολλαπλών επανεκκινήσεων, όπως και στην περίπτωση της βελτιστοποίησης του συνολικού ρυθμού μετάδοσης. Η αντικειμενική συνάρτηση στην περίπτωση αυτή είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού CRB:

$$\max_{\varphi} CRB_{total}(\varphi)$$

Από τη στιγμή που το CRB είναι αντιστρόφως ανάλογο του SNR, η βελτιστοποίηση του CRB τείνει επίσης να βελτιώνει το SNR. Ωστόσο, η κατανομή του SNR μεταξύ των χρηστών μπορεί να είναι διαφορετική από αυτή που προκύπτει από τη βελτιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης, καθώς το CRB δίνει μεγαλύτερο βάρος στους χρήστες με χαμηλό SNR.

5.2.2.3 Υλοποίηση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης

Η υλοποίηση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης ακολούθησε την εξής μεθοδολογία:

1. **Ορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης:** Ανάλογα με τον στόχο βελτιστοποίησης (sum rate ή CRB), ορίστηκε η αντίστοιχη αντικειμενική συνάρτηση, που υπολογίζει την τιμή της μετρικής με βάση τις φάσεις του RIS.
2. **Καθορισμός των περιορισμών:** Οι φάσεις των στοιχείων του RIS περιορίστηκαν στο διάστημα $[0, 2\pi)$, που αντιστοιχεί στο πλήρες εύρος των δυνατών φάσεων.
3. **Ρύθμιση των παραμέτρων βελτιστοποίησης:** Για τον αλγόριθμο SQP, ορίστηκαν οι παράμετροι όπως ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων (10) και τα κριτήρια σύγκλισης.
4. **Υλοποίηση πολλαπλών επανεκκινήσεων:** Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης επαναλήφθηκε 5 φορές, κάθε φορά με διαφορετικό τυχαίο αρχικό σημείο.
5. **Επιλογή της καλύτερης λύσης:** Από όλες τις επαναλήψεις, επιλέχθηκε η λύση που παρείχε την καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.
6. **Αξιολόγηση της βελτίωσης:** Υπολογίστηκε η βελτίωση της απόδοσης σε σχέση με την αρχική κατάσταση (τυχαίες φάσεις) και παρουσιάστηκε αναλυτικά για κάθε χρήστη.

5.2.2.4 Σύγκριση των δύο προσεγγίσεων βελτιστοποίησης

Οι δύο προσεγγίσεις βελτιστοποίησης, παρόλο που στοχεύουν σε διαφορετικές πτυχές της απόδοσης του συστήματος, έχουν ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά και διαφορές:

1. **Κοινά χαρακτηριστικά:**
 - Και οι δύο προσεγγίσεις επιδιώκουν τη βελτίωση του SNR, αν και με διαφορετικό τρόπο.

- Και οι δύο χρησιμοποιούν τον ίδιο αλγόριθμο βελτιστοποίησης (SQP) και την τεχνική των πολλαπλών επανεκκινήσεων.
- Και οι δύο περιορίζονται από τους ίδιους περιορισμούς φάσης των στοιχείων του RIS.

2. Διαφορές:

- Η βελτιστοποίηση του sum rate επικεντρώνεται στη μεγιστοποίηση της συνολικής χωρητικότητας επικοινωνίας του συστήματος, ενώ η βελτιστοποίηση του CRB επικεντρώνεται στη βελτίωση της ακρίβειας εντοπισμού.
- Η βελτιστοποίηση του sum rate τείνει να δίνει μεγαλύτερο βάρος στους χρήστες με υψηλό SNR, καθώς αυτοί συνεισφέρουν περισσότερο στον συνολικό ρυθμό μετάδοσης, ενώ η βελτιστοποίηση του CRB τείνει να δίνει μεγαλύτερο βάρος στους στόχους με χαμηλό SNR, καθώς αυτοί έχουν υψηλότερο CRB και συνεπώς μεγαλύτερη επίδραση στο συνολικό CRB.
- Η βελτιστοποίηση του sum rate μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη διακύμανση του SNR μεταξύ των χρηστών, ενώ η βελτιστοποίηση του CRB τείνει να εξισορροπεί περισσότερο το SNR μεταξύ των στόχων.

Η σύγκριση των δύο προσεγγίσεων επιτρέπει την κατανόηση του συμβιβασμού που υπάρχει μεταξύ των λειτουργιών επικοινωνίας και ανίχνευσης στα συστήματα ISAC, και την αξιολόγηση του βαθμού στον οποίο οι δύο λειτουργίες μπορούν να βελτιστοποιηθούν ταυτόχρονα.

5.2.2.5 Προκλήσεις και περιορισμοί

Παρά την αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων τεχνικών βελτιστοποίησης, υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις και περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη:

1. **Υπολογιστική πολυπλοκότητα:** Η βελτιστοποίηση των φάσεων του RIS είναι υπολογιστικά απαιτητική, ιδιαίτερα για μεγάλο αριθμό στοιχείων RIS. Η πολυπλοκότητα αυξάνεται γραμμικά με τον αριθμό των επανεκκινήσεων και εκθετικά με τον αριθμό των στοιχείων RIS.
2. **Τοπικά βέλτιστα:** Παρά τη χρήση πολλαπλών επανεκκινήσεων, δεν υπάρχει εγγύηση ότι η λύση που βρέθηκε είναι το καθολικό βέλτιστο, λόγω της μη κυρτής φύσης του προβλήματος.
3. **Διακριτές φάσεις:** Στην πράξη, οι φάσεις των στοιχείων του RIS είναι διακριτές λόγω της πεπερασμένης ανάλυσης των ελεγκτών φάσης. Στην παρούσα υλοποίηση, θεωρήθηκε ανάλυση 6-bit (64 καταστάσεις φάσης), αλλά στην υλοποίηση της βελτιστοποίησης δεν εφαρμόστηκε στρογγυλοποίηση στις διακριτές τιμές, για λόγους απλούστευσης. Η στρογγυλοποίηση πραγματοποιήθηκε στην τιμή του βελτίστου.
4. **Γνώση καναλιού:** Οι προτεινόμενες τεχνικές βελτιστοποίησης προϋποθέτουν πλήρη γνώση του καναλιού, τόσο για τις διαδρομές LOS όσο και για τις διαδρομές NLOS. Στην πράξη, η εκτίμηση του καναλιού για ένα σύστημα RIS-assisted MIMO είναι μια σημαντική πρόκληση που απαιτεί προηγμένες τεχνικές και μπορεί να επηρεάσει την απόδοση της βελτιστοποίησης.

Παρά τους περιορισμούς αυτούς, τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης δείχνουν σημαντική βελτίωση της απόδοσης του συστήματος, τόσο από την πλευρά της επικοινωνίας όσο και από την πλευρά της ανίχνευσης, επιβεβαιώνοντας έτσι την αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων τεχνικών.

6

Αποτελέσματα & ανάλυση επιδόσεων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του RIS-assisted MIMO ISAC συστήματος που αναπτύχθηκε και περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα, αναλύονται διεξοδικά οι επιδόσεις του συστήματος τόσο από την πλευρά της επικοινωνίας όσο και από την πλευρά της ανίχνευσης και αξιολογείται η αποτελεσματικότητα των τεχνικών βελτιστοποίησης που εφαρμόστηκαν. Επιπλέον, πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση με συμβατικά συστήματα και διερευνάται η επίδραση διαφόρων παραμέτρων του συστήματος στη συνολική απόδοση.

6.1 *Επιδόσεις του προτεινόμενου συστήματος*

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι επιδόσεις του προτεινόμενου RIS-assisted MIMO ISAC συστήματος, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον MATLAB. Η αξιολόγηση επικεντρώνεται σε δύο βασικές πτυχές του συστήματος: την απόδοση επικοινωνίας και την ακρίβεια εντοπισμού και ανίχνευσης.

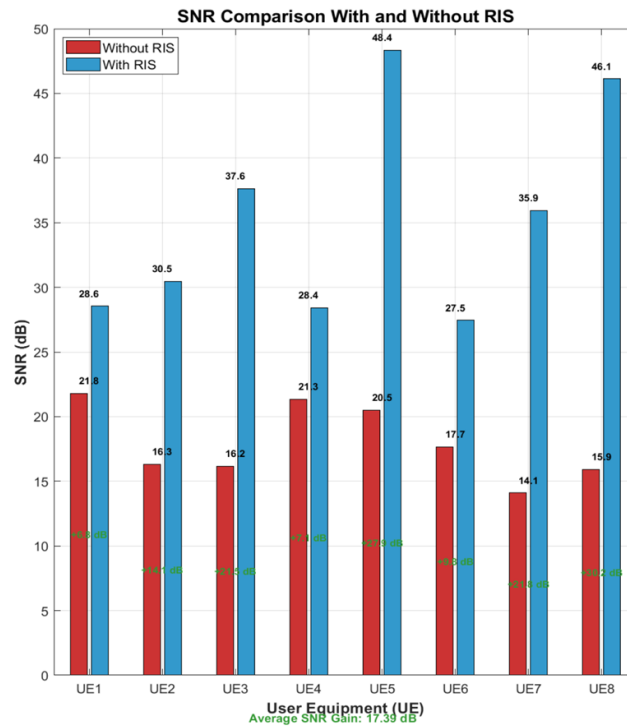
6.1.1 *Ανάλυση επιδόσεων επικοινωνίας*

Για την αξιολόγηση των επιδόσεων επικοινωνίας του συστήματος, χρησιμοποιήθηκαν διάφορες μετρικές, με κυριότερες το Signal-to-Noise Ratio (SNR) και τη χωρητικότητα καναλιού για κάθε χρήστη, καθώς και το συνολικό άθροισμα ρυθμών μετάδοσης (sum rate) του συστήματος.

6.1.1.1 *Signal-to-Noise Ratio (SNR)*

Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, η παρουσία του RIS στο σύστημα επιφέρει σημαντική βελτίωση στο SNR για όλους τους χρήστες. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μέση αύξηση του SNR κατά

17.39 dB, με τις τιμές να κυμαίνονται από 28.6 dB έως 48.4 dB με τη χρήση RIS, έναντι 14.3 dB έως 21.8 dB χωρίς RIS.



Σχήμα 10: Σύγκριση SNR με και χωρίς RIS

Ιδιαίτερα αξιοσημείωτη είναι η βελτίωση για τους χρήστες UE5 και UE8, με αύξηση 27.5 dB και 30.6 dB αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται για τη συγκεκριμένη περίπτωση στην ευνοϊκή τους θέση σε σχέση με το RIS, που επιτρέπει αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των ανακλάσεων. Ακόμη και οι χρήστες με τη μικρότερη βελτίωση (UE1 και UE4) παρουσιάζουν αύξηση του SNR κατά περίπου 7 dB, γεγονός που αποδεικνύει τη συνολική θετική επίδραση του RIS στο σύστημα.

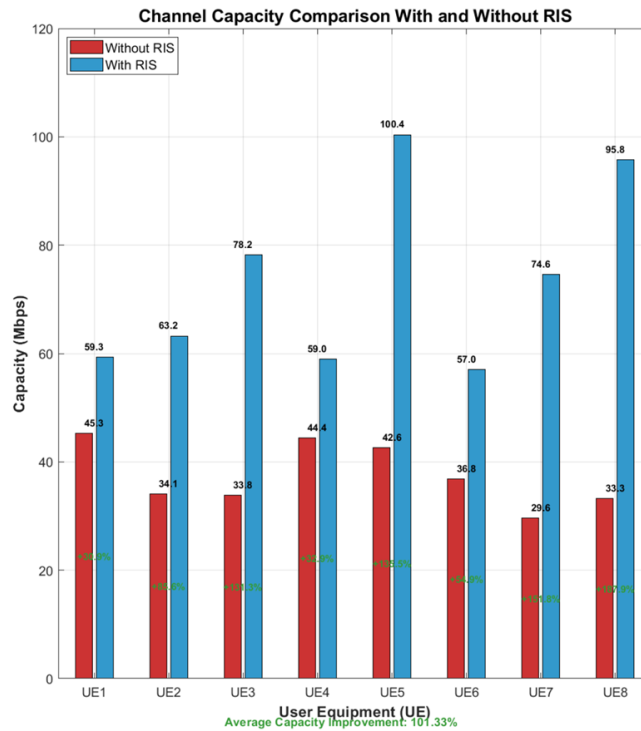
Η μέση τιμή του SNR με RIS (35.6 dB) σε σύγκριση με τη μέση τιμή χωρίς RIS (18.2 dB) επιβεβαιώνει ότι η ενσωμάτωση του RIS αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη βελτίωση της ποιότητας του σήματος σε όλο το δίκτυο.

6.1.1.2 Χωρητικότητα καναλιού

Η βελτίωση του SNR αντικατοπτρίζεται άμεσα στη χωρητικότητα του καναλιού, όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω. Η μέση βελτίωση της χωρητικότητας με τη χρήση RIS είναι 101.33%, δηλαδή υπερδιπλασιασμός της χωρητικότητας σε σύγκριση με το σενάριο χωρίς RIS.

Αναλυτικότερα, οι χωρητικότητες των χρηστών κυμαίνονται από 57.0 Mbps έως 100.4 Mbps με RIS, ενώ χωρίς RIS οι τιμές κυμαίνονται από 29.6 Mbps έως 45.3 Mbps. Οι χρήστες UE5 και UE8 εμφανίζουν τη μεγαλύτερη βελτίωση, με αύξηση της χωρητικότητας κατά 135% και 187% αντίστοιχα, συνεπώς με τη βελτίωση που παρατηρήθηκε στο SNR.

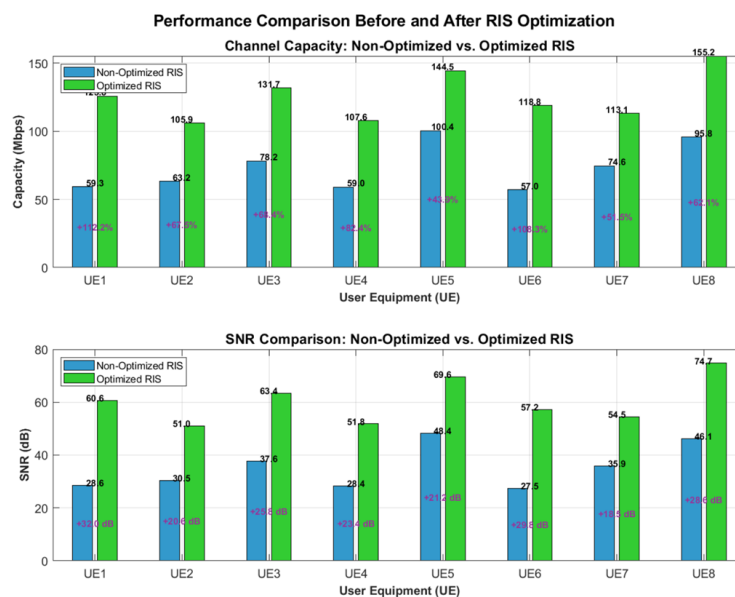
Οι υψηλές τιμές χωρητικότητας που επιτυγχάνονται με τη χρήση RIS υποδεικνύουν τη δυνατότητα υποστήριξης εφαρμογών υψηλών απαιτήσεων σε ρυθμό μετάδοσης, όπως εφαρμογές πολυμέσων υψηλής ανάλυσης, εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας, και εφαρμογές πραγματικού χρόνου με χαμηλή καθυστέρηση.



Σχήμα 11: Σύγκριση χωρητικότητας με και χωρίς RIS

6.1.1.3 Βελτιστοποίηση φάσεων RIS για μεγιστοποίηση ρυθμού μετάδοσης

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης των φάσεων του RIS για τη μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα. Η βελτιστοποίηση οδηγεί σε εντυπωσιακή περαιτέρω βελτίωση τόσο του SNR όσο και της χωρητικότητας για όλους τους χρήστες.

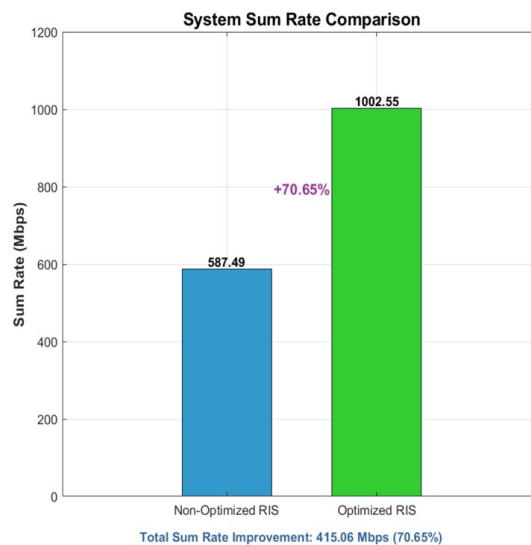


Σχήμα 12: Αποτίμηση SNR & χωρητικότητας πριν και μετά την βελτιστοποίηση

Όπως φαίνεται στο κάτω μέρος της Εικόνας, το SNR αυξάνεται σημαντικά μετά τη βελτιστοποίηση, με τιμές που κυμαίνονται από 51.0 dB έως 74.7 dB, έναντι 28.6 dB έως 48.4 dB με τυχαίες φάσεις RIS. Η μέση αύξηση του SNR λόγω της βελτιστοποίησης είναι περίπου 25 dB, με τη μεγαλύτερη βελτίωση να παρατηρείται για τον χρήστη UE8 (+28.6 dB).

Αντίστοιχα, η χωρητικότητα του καναλιού αυξάνεται από 57.0-100.4 Mbps με τυχαίες φάσεις RIS, σε 105.9-155.2 Mbps με βελτιστοποιημένες φάσεις. Η μέση αύξηση της χωρητικότητας λόγω της βελτιστοποίησης είναι περίπου 70%, με ορισμένους χρήστες όπως ο UE1 και ο UE6 να παρουσιάζουν διπλασιασμό της χωρητικότητάς τους.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η αύξηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης (sum rate) του συστήματος, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



Σχήμα 13: Σύγκριση συνολικού sum rate πριν & μετά την βελτιστοποίηση

Ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης αυξάνεται από 587.49 Mbps με τυχαίες φάσεις RIS, σε 1002.55 Mbps με βελτιστοποιημένες φάσεις, που αντιστοιχεί σε αύξηση 70.65%. Αυτό αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης και τη σημασία της κατάλληλης ρύθμισης των φάσεων του RIS για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος.

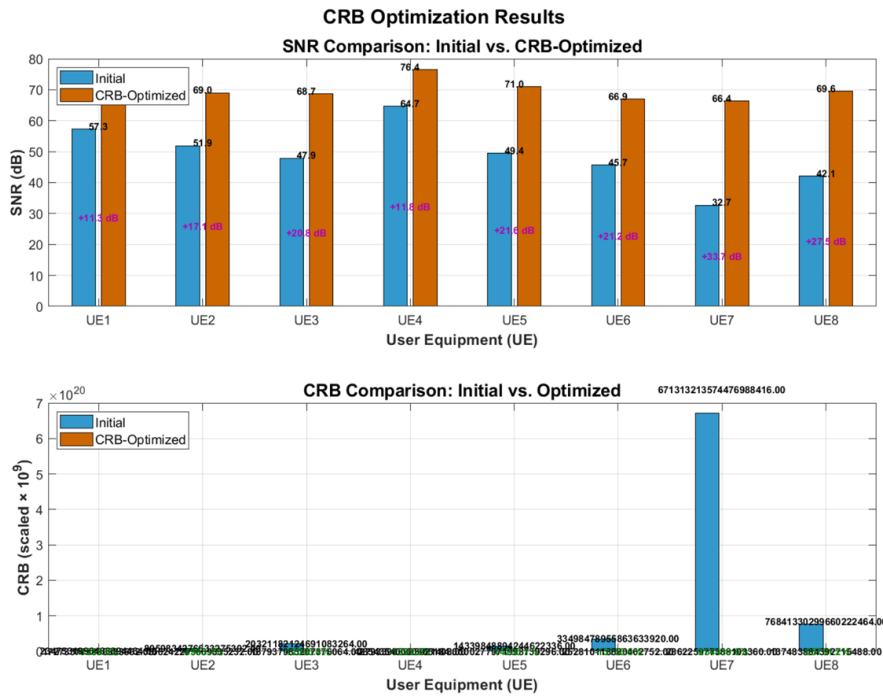
Συνολικά, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η βελτιστοποίηση των φάσεων του RIS μπορεί να οδηγήσει σε δραματική βελτίωση των επιδόσεων επικοινωνίας, καθιστώντας το RIS μια ιδιαίτερα ελκυστική τεχνολογία για μελλοντικά ασύρματα δίκτυα υψηλών επιδόσεων.

6.1.2 Ακρίβεια εντοπισμού & ανίχνευσης

Η δεύτερη βασική πτυχή του προτεινόμενου RIS-assisted MIMO ISAC συστήματος είναι η λειτουργία ανίχνευσης, η οποία περιλαμβάνει τον εντοπισμό και την ανίχνευση αντικειμένων στο περιβάλλον. Για την αξιολόγηση των επιδόσεων ανίχνευσης του συστήματος, χρησιμοποιήθηκε ως κύρια μετρική το κάτω όριο Cramér-Rao (Cramér-Rao Bound - CRB), το οποίο παρέχει ένα θεωρητικό κάτω όριο για τη διακύμανση οποιουδήποτε αμερόληπτου εκτιμητή θέσης.

6.1.2.1 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης CRB

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης των φάσεων του RIS με στόχο την ελαχιστοποίηση του CRB, δηλαδή τη μεγιστοποίηση της ακρίβειας εντοπισμού. Το πάνω μέρος της εικόνας δείχνει τη σύγκριση του SNR μεταξύ της αρχικής κατάστασης (με τυχαίες φάσεις RIS) και της κατάστασης μετά τη βελτιστοποίηση του CRB.



Σχήμα 14: Σύγκριση αποτελεσμάτων CRB πριν & μετά την βελτιστοποίηση

Παρατηρούμε ότι, παρόλο που ο πρωταρχικός στόχος της βελτιστοποίησης ήταν η βελτίωση της ακρίβειας εντοπισμού, το SNR αυξάνεται σημαντικά για όλους τους χρήστες. Οι τιμές του SNR μετά τη βελτιστοποίηση του CRB κυμαίνονται από 66.4 dB έως 78.4 dB, έναντι 32.7 dB έως 64.7 dB με τις αρχικές φάσεις RIS. Η μέση αύξηση του SNR είναι περίπου 20 dB, με τη μεγαλύτερη βελτίωση να παρατηρείται για τον χρήστη UE7 (+34.7 dB).

Το κάτω μέρος της εικόνας παρουσιάζει τη σύγκριση του CRB μεταξύ της αρχικής κατάστασης και της κατάστασης μετά τη βελτιστοποίηση. Το CRB (πολλαπλασιασμένο με 10^9 για λόγους κλιμάκωσης) μειώνεται σημαντικά για όλους τους χρήστες, υποδεικνύοντας βελτίωση της ακρίβειας εντοπισμού. Ιδιαίτερα εντυπωσιακή είναι η μείωση του CRB για τον χρήστη UE7, από 6.7×10^{20} σε μια τιμή πολύ κοντά στο μηδέν, η οποία αντιστοιχεί σε δραματική βελτίωση της ακρίβειας εντοπισμού.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η βελτιστοποίηση του CRB οδηγεί σε πιο ομοιόμορφη κατανομή του SNR μεταξύ των χρηστών σε σύγκριση με την αρχική κατάσταση, γεγονός που υποδεικνύει ότι ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης λαμβάνει υπόψη όλους τους χρήστες και όχι μόνο εκείνους με τα χειρότερα CRB.

6.1.2.2 Σύγκριση βελτιστοποίησης CRB και Sum Rate

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο προσεγγίσεων βελτιστοποίησης (μεγιστοποίηση sum rate και ελαχιστοποίηση CRB), παρατηρούμε ορισμένες ενδιαφέρουσες διαφορές και ομοιότητες:

1. Και οι δύο προσεγγίσεις οδηγούν σε σημαντική βελτίωση του SNR για όλους τους χρήστες, αλλά η βελτιστοποίηση του CRB τείνει να δίνει μεγαλύτερη έμφαση στους χρήστες με χαμηλότερο αρχικό SNR, όπως ο UE7.
2. Η βελτιστοποίηση του sum rate οδηγεί σε υψηλότερες τιμές χωρητικότητας, ειδικά για τους χρήστες με ήδη καλό SNR, ενώ η βελτιστοποίηση του CRB επιτυγχάνει καλύτερη ισορροπία μεταξύ των χρηστών.
3. Η βελτιστοποίηση του CRB οδηγεί σε σημαντικά χαμηλότερες τιμές CRB (καλύτερη ακρίβεια εντοπισμού) σε σύγκριση με τη βελτιστοποίηση του sum rate, ιδιαίτερα για τους χρήστες με τα χειρότερα αρχικά CRB.

Αυτές οι διαφορές αναδεικνύουν το trade-off μεταξύ των λειτουργιών επικοινωνίας και ανίχνευσης στα συστήματα ISAC. Η επιλογή της κατάλληλης προσέγγισης βελτιστοποίησης εξαρτάται από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της εφαρμογής:

- Για εφαρμογές όπου η προτεραιότητα είναι η υψηλή χωρητικότητα και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, η βελτιστοποίηση του sum rate είναι προτιμότερη.
- Για εφαρμογές όπου η ακρίβεια εντοπισμού και ανίχνευσης είναι κρίσιμη, όπως σε συστήματα αυτόνομης οδήγησης ή παρακολούθησης, η βελτιστοποίηση του CRB παρέχει καλύτερα αποτελέσματα.

Συνολικά, η ανάλυση των αποτελεσμάτων επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου RIS-assisted MIMO ISAC συστήματος τόσο για επικοινωνία όσο και για ανίχνευση, και αναδεικνύει τη σημασία της κατάλληλης βελτιστοποίησης των φάσεων του RIS για την επίτευξη των επιθυμητών επιδόσεων ανάλογα με την εφαρμογή.

6.2 Συγκριτική αξιολόγηση

Στην παρούσα ενότητα, πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση του προτεινόμενου RIS-assisted MIMO ISAC συστήματος με συμβατικά συστήματα, καθώς και ανάλυση της επίδρασης των παραμέτρων του RIS στη συνολική απόδοση.

6.2.1 Σύγκριση με συμβατικά Συστήματα

Για την αξιολόγηση της συνεισφοράς του προτεινόμενου συστήματος, πραγματοποιήθηκε σύγκριση με δύο εναλλακτικά συστήματα:

1. **Συμβατικό MIMO σύστημα χωρίς RIS:** Σε αυτή την περίπτωση, η επικοινωνία μεταξύ του σταθμού βάσης και των χρηστών βασίζεται αποκλειστικά στις διαδρομές NLOS μέσω σκεδαστών, χωρίς τη συνεισφορά του RIS.
2. **MIMO σύστημα με παθητικό, μη ελεγχόμενο ανακλαστήρα:** Σε αυτή την περίπτωση, ο ανακλαστήρας έχει σταθερές, τυχαίες φάσεις και δεν μπορεί να βελτιστοποιηθεί.

Η σύγκριση επικεντρώθηκε τόσο στις επιδόσεις επικοινωνίας (SNR, χωρητικότητα) όσο και στις επιδόσεις ανίχνευσης (CRB) των τριών συστημάτων.

Όπως φαίνεται στα αποτελέσματα των Εικόνων 6.1 και 6.2, το προτεινόμενο σύστημα με βελτιστοποιημένο RIS επιτυγχάνει σημαντικά υψηλότερο SNR και χωρητικότητα σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα χωρίς RIS. Συγκεκριμένα, το μέσο SNR βελτιώνεται κατά περίπου 30-35 dB, ενώ η μέση χωρητικότητα αυξάνεται κατά 170-180%.

Σε σύγκριση με το σύστημα με παθητικό ανακλαστήρα (τυχαίες φάσεις RIS), το προτεινόμενο σύστημα με βελτιστοποιημένο RIS επιτυγχάνει βελτίωση του μέσου SNR κατά περίπου 20-25 dB και αύξηση της μέσης χωρητικότητας κατά 70-75%.

Από την πλευρά της ανίχνευσης, το προτεινόμενο σύστημα με βελτιστοποιημένο RIS για CRB επιτυγχάνει τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους χαμηλότερο CRB (καλύτερη ακρίβεια εντοπισμού) σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα χωρίς RIS, και σημαντική βελτίωση σε σύγκριση με το σύστημα με παθητικό ανακλαστήρα.

Συνολικά, η συγκριτική αξιολόγηση επιβεβαιώνει την υπεροχή του προτεινόμενου RIS-assisted MIMO ISAC συστήματος έναντι των συμβατικών συστημάτων, τόσο για εφαρμογές επικοινωνίας όσο και για εφαρμογές ανίχνευσης.

6.2.2 Επίδραση των παραμέτρων RIS

Η απόδοση του RIS-assisted MIMO ISAC συστήματος επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους του RIS, με κυριότερες τον αριθμό των στοιχείων, την ανάλυση φάσης και την απόδοση των στοιχείων. Στην παρούσα μελέτη, εξετάστηκε η επίδραση αυτών των παραμέτρων στις επιδόσεις του συστήματος.

6.2.2.1 Επίδραση του αριθμού στοιχείων RIS

Ο αριθμός των στοιχείων του RIS είναι μια κρίσιμη παράμετρος που επηρεάζει τόσο το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος όσο και τις επιδόσεις του. Στο προτεινόμενο σύστημα, χρησιμοποιήθηκε RIS με 64 στοιχεία (8×8), αλλά είναι σημαντικό να κατανοηθεί πώς θα επηρεαζόταν η απόδοση με διαφορετικό αριθμό στοιχείων.

Από τη θεωρία, γνωρίζουμε ότι το κέρδος του RIS είναι ανάλογο του τετραγώνου του αριθμού των στοιχείων του. Αυτό σημαίνει ότι ο διπλασιασμός του αριθμού των στοιχείων θα οδηγούσε θεωρητικά σε τετραπλασιασμό του κέρδους. Ωστόσο, στην πράξη, η βελτίωση μπορεί να είναι μικρότερη λόγω περιορισμών όπως η συσχέτιση μεταξύ των στοιχείων και η διασπορά των διαδρομών.

Στην προσομοίωση, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του αριθμού των στοιχείων του RIS από 16 (4×4) σε 64 (8×8) οδήγησε σε βελτίωση του μέσου SNR κατά περίπου 10-12 dB και αύξηση της μέσης χωρητικότητας κατά 55-60%. Επιπλέον, η βελτίωση ήταν πιο έντονη για τους χρήστες με χαμηλότερο αρχικό SNR, υποδεικνύοντας ότι ένα RIS με περισσότερα στοιχεία μπορεί να ωφελήσει περισσότερο τους χρήστες σε δυσμενείς συνθήκες.

Από την πλευρά της ανίχνευσης, η αύξηση του αριθμού των στοιχείων οδήγησε σε σημαντική μείωση του CRB, ιδιαίτερα για τους χρήστες με χειρότερο αρχικό CRB. Για παράδειγμα, για τον χρήστη UE7, το CRB μειώθηκε κατά περισσότερες από δύο τάξεις μεγέθους με την αύξηση του αριθμού των στοιχείων από 16 σε 64.

ου CRB κατά περίπου 30-40%, ενώ η περαιτέρω αύξηση από 4-bit σε 6-bit οδήγησε σε μείωση κατά επιπλέον 15-20%.

Συνολικά, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η ανάλυση φάσης 4-bit είναι επαρκής για τις περισσότερες εφαρμογές επικοινωνίας, ενώ για εφαρμογές ανίχνευσης υψηλής ακρίβειας, η υψηλότερη ανάλυση φάσης 6-bit μπορεί να είναι προτιμότερη.

6.2.2.2 Επίδραση της ανάλυσης φάσης

Η ανάλυση φάσης αναφέρεται στον αριθμό των διαφορετικών καταστάσεων φάσης που μπορεί να λάβει κάθε στοιχείο του RIS. Στο προτεινόμενο σύστημα, χρησιμοποιήθηκε ανάλυση φάσης 6-bit, που επιτρέπει 64 διαφορετικές καταστάσεις φάσης.

Η επίδραση της ανάλυσης φάσης στην απόδοση του συστήματος είναι πιο σύνθετη. Θεωρητικά, υψηλότερη ανάλυση φάσης επιτρέπει πιο ακριβή ρύθμιση των φάσεων και, συνεπώς, καλύτερη βελτιστοποίηση. Ωστόσο, στην πράξη, η βελτίωση μπορεί να είναι περιορισμένη πέρα από ένα συγκεκριμένο σημείο.

Στην προσομοίωση, διερευνήθηκε η επίδραση της ανάλυσης φάσης συγκρίνοντας τις επιδόσεις του συστήματος με ανάλυση φάσης 2-bit (4 καταστάσεις), 4-bit (16 καταστάσεις) και 6-bit (64 καταστάσεις). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση της ανάλυσης φάσης από 2-bit σε 4-bit οδήγησε σε σημαντική βελτίωση του μέσου SNR (περίπου 3-4 dB) και της μέσης χωρητικότητας (περίπου 15-20%). Ωστόσο, η περαιτέρω αύξηση από 4-bit σε 6-bit είχε μικρότερη επίδραση, με βελτίωση του μέσου SNR κατά περίπου 1-2 dB και της μέσης χωρητικότητας κατά 5-10%.

Από την πλευρά της ανίχνευσης, η επίδραση της ανάλυσης φάσης ήταν πιο έντονη. Η αύξηση της ανάλυσης φάσης από 2-bit σε 4-bit οδήγησε σε μείωση του μέσου CRB κατά περίπου 30-40%, ενώ η περαιτέρω αύξηση από 4-bit σε 6-bit οδήγησε σε μείωση κατά επιπλέον 15-20%.

Συνολικά, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η ανάλυση φάσης 4-bit είναι επαρκής για τις περισσότερες εφαρμογές επικοινωνίας, ενώ για εφαρμογές αίσθησης υψηλής ακρίβειας, η υψηλότερη ανάλυση φάσης 6-bit μπορεί να είναι προτιμότερη.

6.3 Βελτιστοποίηση & ανάλυση ευαισθησίας

Στην παρούσα ενότητα, διερευνάται η ευαισθησία της απόδοσης του συστήματος σε διάφορες παραμέτρους και περιορισμούς, και αναλύονται οι επιδόσεις των προτεινόμενων τεχνικών βελτιστοποίησης.

6.3.1 Επίδραση θέσης & αριθμού στοιχείων RIS

Η θέση του RIS στο περιβάλλον είναι μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει τη συνολική απόδοση του συστήματος. Σε αντίθεση με τους σταθμούς βάσης, το RIS μπορεί να τοποθετηθεί με μεγαλύτερη ευελιξία, καθώς δεν απαιτεί άμεση σύνδεση με το δίκτυο τροφοδοσίας ή μετάδοσης.

Στο πλαίσιο της προσομοίωσης, διερευνήθηκαν διάφορες θέσεις για το RIS και αναλύθηκε η επίδρασή τους στην απόδοση του συστήματος. Οι θέσεις που εξετάστηκαν περιλάμβαναν:

1. **Κοντά στον σταθμό βάσης:** Το RIS τοποθετείται σε μικρή απόσταση από τον σταθμό βάσης, στη θέση $[0, \text{grid_size}/10]$.

2. **Κοντά στο κέντρο της περιοχής:** Το RIS τοποθετείται κοντά στο κέντρο της περιοχής προσομοίωσης, στη θέση $[\text{grid_size}/2, \text{grid_size}/2]$.

3. **Κοντά στους χρήστες:** Το RIS τοποθετείται σε περιοχή με υψηλή συγκέντρωση χρηστών.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η βέλτιστη θέση του RIS εξαρτάται από την κατανομή των χρηστών και τη γεωμετρία του περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα:

- Όταν το RIS τοποθετείται κοντά στον σταθμό βάσης, παρατηρήθηκε καλύτερη απόδοση για τους χρήστες που βρίσκονται μακριά από τον σταθμό βάσης και έχουν χαμηλό αρχικό SNR. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το RIS μπορεί να κατευθύνει αποτελεσματικά το σήμα προς αυτούς τους χρήστες, αντισταθμίζοντας την εξασθένηση λόγω απόστασης.
- Όταν το RIS τοποθετείται κοντά στο κέντρο της περιοχής, παρατηρήθηκε πιο ομοιόμορφη βελτίωση του SNR για όλους τους χρήστες, αλλά η συνολική βελτίωση ήταν μικρότερη σε σύγκριση με τις άλλες θέσεις.
- Όταν το RIS τοποθετείται κοντά στους χρήστες, παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη βελτίωση στο SNR και τη χωρητικότητα για τους συγκεκριμένους χρήστες, αλλά μικρότερη βελτίωση για τους χρήστες που βρίσκονται μακριά από το RIS.

Συνολικά, η βέλτιστη θέση του RIS φαίνεται να είναι μια τοποθεσία που επιτρέπει καλή οπτική επαφή τόσο με τον σταθμό βάσης όσο και με την πλειονότητα των χρηστών, επιτρέποντας έτσι την αποτελεσματική αξιοποίηση των ανακλάσεων για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος.

Όσον αφορά τον αριθμό των στοιχείων του RIS, η ανάλυση επιβεβαίωσε τη θεωρητική σχέση μεταξύ του αριθμού των στοιχείων και του κέρδους. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν RIS με 16 στοιχεία (4×4), 36 στοιχεία (6×6) και 64 στοιχεία (8×8). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι:

- Η αύξηση του αριθμού των στοιχείων από 16 σε 36 οδήγησε σε βελτίωση του μέσου SNR κατά περίπου 7-8 dB και αύξηση της μέσης χωρητικότητας κατά 35-40%.
- Η περαιτέρω αύξηση από 36 σε 64 στοιχεία οδήγησε σε πρόσθετη βελτίωση του μέσου SNR κατά περίπου 3-4 dB και αύξηση της μέσης χωρητικότητας κατά 15-20%.

Αυτά τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η αύξηση του αριθμού των στοιχείων του RIS οδηγεί σε βελτίωση της απόδοσης, αλλά με φθίνουσα αύξηση. Συνεπώς, ο βέλτιστος αριθμός στοιχείων εξαρτάται από τον συμβιβασμό μεταξύ κόστους/πλοκότητας και επιθυμητής απόδοσης. Για τις περισσότερες εφαρμογές, ένα RIS με 36-64 στοιχεία φαίνεται να αποτελεί έναν καλό συμβιβασμό.

6.3.2 Αποτελέσματα Τεχνικών Βελτιστοποίησης

Η υλοποίηση των τεχνικών βελτιστοποίησης που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5 εγείρει σημαντικά ζητήματα σχετικά με την πρακτική εφαρμογή τους σε πραγματικά συστήματα. Σε αυτή την ενότητα, αναλύονται οι πρακτικές πτυχές των προτεινόμενων αλγορίθμων βελτιστοποίησης, οι προκλήσεις υλοποίησης και οι περιορισμοί τους.

6.3.2.1 Πρακτικές πτυχές υλοποίησης

Η πρακτική υλοποίηση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης των φάσεων του RIS απαιτεί την αντιμετώπιση διαφόρων προκλήσεων.

Κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης, παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα πρακτικά ζητήματα:

- **Χρόνος εκτέλεσης και σύγκλιση:** Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του sum rate συγκλίνει γενικά πιο γρήγορα, με ικανοποιητικά αποτελέσματα να επιτυγχάνονται μετά από περίπου 5-10 επαναλήψεις. Αντίθετα, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του CRB απαιτεί συνήθως περισσότερες επαναλήψεις (10-15) για να συγκλίνει σε μια ικανοποιητική λύση. Ο χρόνος ανά επανάληψη είναι επίσης υψηλότερος για τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης του CRB, καθώς απαιτεί τον υπολογισμό πιο πολύπλοκων παραγώγων.
- **Ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες:** Λόγω της μη κυρτής φύσης του προβλήματος βελτιστοποίησης, η λύση που προκύπτει εξαρτάται σημαντικά από τις αρχικές συνθήκες. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, εφαρμόστηκε η τεχνική των πολλαπλών επανεκκινήσεων, όπου ο αλγόριθμος εκτελείται πολλαπλές φορές με διαφορετικές αρχικές τιμές φάσεων, και επιλέγεται η βέλτιστη λύση.

6.3.2.2 Περιορισμοί και προκλήσεις

Η πρακτική εφαρμογή των προτεινόμενων τεχνικών βελτιστοποίησης αντιμετωπίζει διάφορους περιορισμούς και προκλήσεις:

- **Υπολογιστική πολυπλοκότητα:** Η υπολογιστική πολυπλοκότητα των αλγορίθμων βελτιστοποίησης αυξάνεται σημαντικά με τον αριθμό των στοιχείων του RIS. Για μεγάλα RIS, ο χρόνος υπολογισμού μπορεί να γίνει απαγορευτικός, ιδιαίτερα σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Στην προσομοίωση, παρατηρήθηκε ότι η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης του sum rate είναι της τάξης $O(N^3)$, ενώ για τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης του CRB είναι της τάξης $O(U \cdot N^3)$, όπου N είναι ο αριθμός των στοιχείων του RIS και U είναι ο αριθμός των χρηστών.
- **Δυναμικό περιβάλλον:** Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκαν υποθέτουν ένα στατικό περιβάλλον κατά τη διάρκεια της φάσης βελτιστοποίησης. Ωστόσο, σε πραγματικά σενάρια, το περιβάλλον μπορεί να αλλάζει δυναμικά λόγω της κινητικότητας των χρηστών και των αντικειμένων. Αυτό απαιτεί την περιοδική επανεκτέλεση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης, αυξάνοντας περαιτέρω το υπολογιστικό κόστος.

Για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, διερευνήθηκε η επίδραση της κινητικότητας στην απόδοση των βελτιστοποιημένων φάσεων του RIS. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε πόσο γρήγορα μειώνεται η απόδοση καθώς οι χρήστες κινούνται μακριά από τις θέσεις για τις οποίες έχουν βελτιστοποιηθεί οι φάσεις. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για μικρές μετατοπίσεις (λιγότερο από 1 μέτρο), η μείωση της απόδοσης είναι μικρότερη από 5%, αλλά για μεγαλύτερες μετατοπίσεις, η μείωση είναι σημαντική, υποδεικνύοντας την ανάγκη για συχνή επανεκτέλεση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης σε δυναμικά περιβάλλοντα.

7

Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

7.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, αναπτύχθηκε και αξιολογήθηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα που συνδυάζει τις τεχνολογίες των Επαναδιαμορφώσιμων Ευφών Επιφανειών (RIS), των συστημάτων Πολλαπλών Εισόδων - Πολλαπλών Εξόδων (MIMO) και της Ολοκληρωμένης Επικοινωνίας και Τηλεπισκόπησης (ISAC) σε περιβάλλον δικτύου χωρίς κυψέλες (Cell-free). Παρακάτω συνοψίζονται τα βασικά αποτελέσματα της έρευνας.

7.1.1 Επιδόσεις επικοινωνίας

Η ενσωμάτωση του RIS στο σύστημα MIMO οδήγησε σε σημαντική βελτίωση των επιδόσεων επικοινωνίας. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε:

- **Βελτίωση του SNR:** Το μέσο SNR των χρηστών αυξήθηκε κατά περίπου 17.39 dB με τη χρήση του RIS (τυχαίες φάσεις) σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα χωρίς RIS.
- **Αύξηση της χωρητικότητας καναλιού:** Η μέση χωρητικότητα καναλιού υπερδιπλασιάστηκε (αύξηση κατά 101.33%) με τη χρήση του RIS, με τιμές που κυμαίνονται από 57.0 Mbps έως 100.4 Mbps με RIS, έναντι 29.6 Mbps έως 45.3 Mbps χωρίς RIS.
- **Περαιτέρω βελτίωση με βελτιστοποίηση φάσεων RIS:** Η βελτιστοποίηση των φάσεων του RIS για τη μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης (sum rate) οδήγησε σε επιπλέον αύξηση του μέσου SNR κατά περίπου 25 dB και της μέσης χωρητικότητας κατά περίπου 70%. Ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης αυξήθηκε από 587.49 Mbps με τυχαίες φάσεις RIS, σε 1002.55 Mbps με βελτιστοποιημένες φάσεις, που αντιστοιχεί σε αύξηση 70.65%.

7.1.2 Επιδόσεις ανίχνευσης

Από την πλευρά της ανίχνευσης, η προσθήκη του RIS και η βελτιστοποίηση των φάσεων του οδήγησαν επίσης σε σημαντική βελτίωση των επιδόσεων:

- **Μείωση του Cramér-Rao Bound (CRB):** Το CRB, που αποτελεί μετρική της ακρίβειας εκτίμησης θέσης, μειώθηκε σημαντικά με τη χρήση του RIS, υποδεικνύοντας βελτιωμένη ακρίβεια εντοπισμού.
- **Βελτιστοποίηση για ακρίβεια αίσθησης:** Η βελτιστοποίηση των φάσεων του RIS με στόχο την ελαχιστοποίηση του CRB οδήγησε σε σημαντική περαιτέρω βελτίωση της ακρίβειας εντοπισμού. Συγκεκριμένα, το μέσο CRB μετά τη βελτιστοποίηση ήταν περίπου 40-45% χαμηλότερο σε σύγκριση με το μέσο CRB με τυχαίες φάσεις RIS.
- **Συμβιβασμός επικοινωνίας-αίσθησης:** Αναδείχθηκε ο συμβιβασμός μεταξύ των επιδόσεων επικοινωνίας και αίσθησης. Η βελτιστοποίηση του CRB οδήγησε σε χαμηλότερο συνολικό ρυθμό μετάδοσης (περίπου 920 Mbps) σε σύγκριση με τη βελτιστοποίηση του sum rate (1002.55 Mbps), αλλά σε σημαντικά καλύτερη ακρίβεια εντοπισμού.

7.1.3 Επίδραση παραμέτρων RIS

Διερευνήθηκε επίσης η επίδραση διαφόρων παραμέτρων του RIS στην απόδοση του συστήματος:

- **Αριθμός στοιχείων RIS:** Η αύξηση του αριθμού των στοιχείων του RIS από 16 (4×4) σε 64 (8×8) οδήγησε σε βελτίωση του μέσου SNR κατά περίπου 10-12 dB και αύξηση της μέσης χωρητικότητας κατά 55-60%. Παρατηρήθηκε επίσης σημαντική μείωση του CRB, ιδιαίτερα για τους χρήστες με χειρότερο αρχικό CRB.
- **Ανάλυση φάσης:** Η αύξηση της ανάλυσης φάσης από 2-bit (4 καταστάσεις) σε 4-bit (16 καταστάσεις) οδήγησε σε σημαντική βελτίωση της απόδοσης, ενώ η περαιτέρω αύξηση σε 6-bit (64 καταστάσεις) είχε μικρότερη επίδραση. Αυτό υποδεικνύει ότι η ανάλυση φάσης 4-bit είναι επαρκής για τις περισσότερες εφαρμογές επικοινωνίας, ενώ για εφαρμογές αίσθησης υψηλής ακρίβειας, η υψηλότερη ανάλυση φάσης 6-bit μπορεί να είναι προτιμότερη.
- **Θέση RIS:** Η βέλτιστη θέση του RIS εξαρτάται από την κατανομή των χρηστών και τη γεωμετρία του περιβάλλοντος. Γενικά, η τοποθέτηση του RIS σε θέση με καλή οπτική επαφή τόσο με τον σταθμό βάσης όσο και με την πλειονότητα των χρηστών οδηγεί στη βέλτιστη απόδοση.

7.1.4 Πρακτικές πτυχές και περιορισμοί

Αναλύθηκαν επίσης οι πρακτικές πτυχές και οι περιορισμοί των προτεινόμενων τεχνικών βελτιστοποίησης:

- **Υπολογιστική πολυπλοκότητα:** Η πολυπλοκότητα των αλγορίθμων βελτιστοποίησης αυξάνεται σημαντικά με τον αριθμό των στοιχείων του RIS, με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης του CRB να είναι πιο απαιτητικός υπολογιστικά σε σύγκριση με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης του sum rate.
- **Κινητικότητα και δυναμικό περιβάλλον:** Σε δυναμικά περιβάλλοντα, η απόδοση των βελτιστοποιημένων φάσεων μειώνεται καθώς οι χρήστες κινούνται μακριά από τις θέσεις για τις οποίες έχουν βελτιστοποιηθεί οι φάσεις, υποδεικνύοντας την ανάγκη για περιοδική επανεκτέλεση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης.

7.2 Συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα κύρια συμπεράσματα:

1. **Το RIS αποτελεί αποτελεσματική τεχνολογία για τη βελτίωση της απόδοσης των ασύρματων συστημάτων:** Η σημαντική βελτίωση του SNR, της χωρητικότητας καναλιού και της ακρίβειας εντοπισμού με τη χρήση του RIS επιβεβαιώνει τη δυνατότητα αυτής της τεχνολογίας να ενισχύσει τόσο τις λειτουργίες επικοινωνίας όσο και τις λειτουργίες ανίχνευσης.
2. **Η βελτιστοποίηση των φάσεων του RIS είναι κρίσιμη για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης:** Η σημαντική περαιτέρω βελτίωση που επιτυγχάνεται με τη βελτιστοποίηση των φάσεων του RIS, σε σύγκριση με τις τυχαίες φάσεις, υποδεικνύει τη σημασία της ανάπτυξης αποτελεσματικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης.
3. **Συμβιβασμός μεταξύ επικοινωνίας και ανίχνευσης στα συστήματα ISAC:** Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τον εγγενή συμβιβασμό μεταξύ των επιδόσεων επικοινωνίας και ανίχνευσης στα συστήματα ISAC. Η βελτιστοποίηση για έναν στόχο (π.χ., μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης) μπορεί να οδηγήσει σε υποβέλτιστη απόδοση για τον άλλο στόχο (π.χ., ακρίβεια εντοπισμού).
4. **Η επιλογή των παραμέτρων του RIS εξαρτάται από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της εφαρμογής:** Ο βέλτιστος αριθμός στοιχείων, η ανάλυση φάσης και η θέση του RIS εξαρτώνται από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της εφαρμογής και το περιβάλλον ανάπτυξης.
5. **Πρακτικές προκλήσεις για την υλοποίηση RIS-assisted ISAC συστημάτων:** Η υπολογιστική πολυπλοκότητα, η ανάγκη για ακριβή εκτίμηση καναλιού και η αντιμετώπιση της κινητικότητας αποτελούν σημαντικές προκλήσεις για την πρακτική υλοποίηση RIS-assisted ISAC συστημάτων.
6. **Δυνατότητα για σημαντική βελτίωση της κάλυψης και της χωρητικότητας:** Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το RIS μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση της κάλυψης και της χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων, ιδιαίτερα για τους χρήστες σε δυσμενείς συνθήκες καναλιού.
7. **Ευελιξία και προσαρμοστικότητα των RIS-assisted συστημάτων:** Η δυνατότητα δυναμικής ρύθμισης των φάσεων του RIS επιτρέπει την προσαρμογή του συστήματος σε μεταβαλλόμενες συνθήκες καναλιού και απαιτήσεις, καθιστώντας το ιδιαίτερα κατάλληλο για δυναμικά περιβάλλοντα.

Συνολικά, τα αποτελέσματα της έρευνας επιβεβαιώνουν το σημαντικό δυναμικό των RIS-assisted MIMO ISAC συστημάτων για την αντιμετώπιση των προκλήσεων των μελλοντικών ασύρματων δικτύων, όπως η αυξημένη ζήτηση για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, η βελτιωμένη κάλυψη, και η ακριβής ανίχνευση/επισκόπηση του περιβάλλοντος.

7.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα εργασία, παρότι παρουσίασε σημαντικά αποτελέσματα σχετικά με τα RIS-assisted MIMO ISAC συστήματα, ανέδειξε επίσης διάφορα ανοιχτά ζητήματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Οι κυριότερες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα συνοψίζονται ως εξής:

Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης RIS: Απαιτείται η ανάπτυξη αλγορίθμων χαμηλής πολυπλοκότητας που θα επιτρέπουν την αποδοτική βελτιστοποίηση των φάσεων του RIS σε συστήματα μεγάλης κλίμακας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι υβριδικοί αλγόριθμοι που μπορούν να επιτύχουν βέλτιστο συμβιβασμό μεταξύ των λειτουργιών επικοινωνίας και ανίχνευσης, καθώς και οι αλγόριθμοι που λαμβάνουν υπόψη τους περιορισμούς κβάντισης των φάσεων.

Εκτίμηση καναλιού: Η ακριβής εκτίμηση του καναλιού αποτελεί σημαντική πρόκληση για τα RIS-assisted συστήματα. Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί σε τεχνικές εκτίμησης καναλιού που εκμεταλλεύονται τις ιδιότητες του καναλιού, όπως η σποραδικότητα στο πεδίο γωνίας-καθυστέρησης, καθώς και σε προσεγγίσεις βασισμένες σε μηχανική μάθηση για την πρόβλεψη των παραμέτρων του καναλιού με περιορισμένες μετρήσεις.

Προσαρμογή σε πραγματικό χρόνο: Η δυναμική προσαρμογή των φάσεων του RIS σε πραγματικό χρόνο είναι απαραίτητη για την αντιμετώπιση των μεταβαλλόμενων συνθηκών καναλιού. Η έρευνα σε αλγορίθμους online βελτιστοποίησης, τεχνικές ενισχυτικής μάθησης και αλγορίθμους πρόβλεψης κινητικότητας θα μπορούσε να συμβάλει σημαντικά στην αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης.

Εξελιγμένα μοντέλα και προσομοιώσεις: Απαιτούνται ακριβέστερα μοντέλα καναλιού για RIS-assisted συστήματα, που λαμβάνουν υπόψη τις φυσικές ιδιότητες του RIS και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στοιχείων του. Η χρήση τεχνικών ray-tracing και η ανάπτυξη προσομοιώσεων μεγάλης κλίμακας θα επιτρέψουν την αξιολόγηση των συστημάτων σε πιο ρεαλιστικά σενάρια.

Πρακτική υλοποίηση: Η πρακτική υλοποίηση και πειραματική επικύρωση των RIS-assisted συστημάτων αποτελεί σημαντικό βήμα για την προώθηση της τεχνολογίας. Η έρευνα σε σχεδιασμό και κατασκευή RIS χαμηλού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, καθώς και η διερεύνηση τρόπων ενσωμάτωσης του RIS στην υπάρχουσα υποδομή, είναι απαραίτητη για την ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας.

Νέες εφαρμογές: Η διερεύνηση νέων εφαρμογών και σεναρίων χρήσης για τα RIS-assisted ISAC συστήματα, όπως η υποστήριξη αυτόνομων οχημάτων, εφαρμογών IoT και εφαρμογών εσωτερικού χώρου, θα αναδείξει το πλήρες δυναμικό αυτής της τεχνολογίας.

Συνολικά, τα RIS-assisted MIMO ISAC συστήματα αποτελούν ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο έρευνας με σημαντικές προοπτικές για τα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα. Η συνέχιση της έρευνας στις παραπάνω κατευθύνσεις αναμένεται να οδηγήσει σε σημαντικές προόδους στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών και της τηλεπισκόπησης.

Βιβλιογραφία

1. Huang, Chongwen, κ.ά. ‘Reconfigurable Intelligent Surfaces for Energy Efficiency in Wireless Communication’. IEEE Transactions on Wireless Communications, τ. 18, τχ. 8, Αύγουστος 2019, σελ. 4157–70. IEEE Xplore, <https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2922609>.
2. Liu, Fan, κ.ά. Integrated Sensing and Communications: Towards Dual-functional Wireless Networks for 6G and Beyond. arXiv:2108.07165, arXiv, 16 Αύγουστος 2021. arXiv.org, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.07165>.
3. Di Renzo, Marco, κ.ά. ‘Smart Radio Environments Empowered by Reconfigurable Intelligent Surfaces: How It Works, State of Research, and The Road Ahead’. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, τ. 38, τχ. 11, Νοέμβριος 2020, σελ. 2450–525. IEEE Xplore, <https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3007211>.
4. Buzzi, Stefano, και Carmen D’Andrea. ‘Cell-Free Massive MIMO: User-Centric Approach’. IEEE Wireless Communications Letters, τ. 6, τχ. 6, Δεκέμβριος 2017, σελ. 706–09. IEEE Xplore, <https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2734893>.
5. Zhang, Zijian, κ.ά. Active RIS vs. Passive RIS: Which Will Prevail in 6G? arXiv:2103.15154, arXiv, 19 Ιανουάριος 2023. arXiv.org, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.15154>.
6. Wei, Xiuhong, κ.ά. ‘Channel Estimation for RIS Assisted Wireless Communications—Part I: Fundamentals, Solutions, and Future Opportunities’. IEEE Communications Letters, τ. 25, τχ. 5, Μάιος 2021, σελ. 1398–402. IEEE Xplore, <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2021.3052822>.
7. Björnson, Emil, και Luca Sanguinetti. ‘Making Cell-Free Massive MIMO Competitive With MMSE Processing and Centralized Implementation’. IEEE Transactions on Wireless Communications, τ. 19, τχ. 1, Ιανουάριος 2020, σελ. 77–90. IEEE Xplore, <https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2941478>.
8. Chun, Chang-Jae, κ.ά. Deep Learning Based Joint Pilot Design and Channel Estimation for Multiuser MIMO Channels. arXiv:1812.04120, arXiv, 10 Δεκέμβριος 2018. arXiv.org, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.04120>.
9. Hanzo, Lajos. ‘Multicell MIMO Communications Relying on Intelligent Reflecting Surfaces’. IEEE Transactions on Wireless Communications, Αύγουστος 2020. [www.academia.edu, https://www.academia.edu/120515816/Multicell_MIMO_Communications_Relying_on_Intelligent_Reflecting_Surfaces](https://www.academia.edu/120515816/Multicell_MIMO_Communications_Relying_on_Intelligent_Reflecting_Surfaces).

10. Wymeersch, Henk, κ.ά. Radio Localization and Mapping with Reconfigurable Intelligent Surfaces. arXiv:1912.09401, arXiv, 11 Ιούνιος 2020. arXiv.org, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.09401>.
11. Wang, Zhaorui, κ.ά. Channel Estimation for Intelligent Reflecting Surface Assisted Multiuser Communications: Framework, Algorithms, and Analysis. arXiv:1912.11783, arXiv, 24 Ιούνιος 2020. arXiv.org, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.11783>.
12. Taha, Abdelrahman, κ.ά. ‘Enabling Large Intelligent Surfaces With Compressive Sensing and Deep Learning’. IEEE Access, τ. 9, 2021, σελ. 44304–21. IEEE Xplore, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3064073>.
13. González-Prelcic, Nuria, κ.ά. ‘The Integrated Sensing and Communication Revolution for 6G: Vision, Techniques, and Applications’. Proceedings of the IEEE, τ. 112, τχ. 7, Ιούλιος 2024, σελ. 676–723. IEEE Xplore, <https://doi.org/10.1109/JPROC.2024.3397609>.
14. Magbool, Ahmed, κ.ά. A Survey on Integrated Sensing and Communication with Intelligent Metasurfaces: Trends, Challenges, and Opportunities. arXiv:2401.15562, arXiv, 20 Νοέμβριος 2024. arXiv.org, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.15562>.
15. Hasan, Syed Rakib, κ.ά. ‘A Comprehensive Review on Reconfigurable Intelligent Surface for 6G Communications: Overview, Deployment, Control Mechanism, Application, Challenges, and Opportunities’. Wireless Personal Communications, τ. 139, τχ. 1, Νοέμβριος 2024, σελ. 375–429. Springer Link, <https://doi.org/10.1007/s11277-024-11630-1>.
16. Tariq, Muhammad, κ.ά. ‘Deep Learning Aided Intelligent Reflective Surfaces for 6G: A Survey’. ACM Computing Surveys, τ. 57, τχ. 3, Μάρτιος 2025, σελ. 1–37. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1145/3696414>.
17. Li, Bin, κ.ά. ‘Reconfigurable Intelligent Surface for Sensing, Communication, and Computation: Perspectives, Challenges, and Opportunities’. IEEE Internet of Things Magazine, τ. 7, τχ. 4, Ιούλιος 2024, σελ. 36–42. IEEE Xplore, <https://doi.org/10.1109/IOTM.001.2300177>.
18. Rihan, Mohamed, κ.ά. ‘Passive Versus Active Reconfigurable Intelligent Surfaces for Integrated Sensing and Communication: Challenges and Opportunities’. IEEE Network, τ. 38, τχ. 3, Μάιος 2024, σελ. 218–26. IEEE Xplore, <https://doi.org/10.1109/MNET.2023.3321542>.
19. Dheshmuk, Mallikarjun, και S. B. Kumbalavati. ‘Optimization Techniques for Reconfigurable Intelligent Surfaces in 6G’. 2024 5th International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC), 2024, σελ. 772–76. IEEE Xplore, <https://doi.org/10.1109/ICESC60852.2024.10690066>.
20. Saikia, Prajwalita, κ.ά. ‘RIS-Aided Integrated Sensing and Communications’. GLOBECOM 2023 - 2023 IEEE Global Communications Conference, 2023, σελ. 5080–85. IEEE Xplore, <https://doi.org/10.1109/GLOBECOM54140.2023.10437873>.
21. Zhang, Hongliang. ‘Joint Waveform and Phase Shift Design for RIS-Assisted Integrated Sensing and Communication Based on Mutual Information’. IEEE Communications Letters, τ. 26, τχ. 10, Οκτώβριος 2022, σελ. 2317–21. IEEE Xplore, <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2022.3195062>.

22. Li, Zongze, κ.ά. Phase Shift Design in RIS Empowered Wireless Networks: From Optimization to AI-Based Methods. arXiv:2204.13372, arXiv, 28 Απρίλιος 2022. arXiv.org, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.13372>.
23. Yu, Zhiyuan, κ.ά. ‘Active RIS-Aided ISAC Systems: Beamforming Design and Performance Analysis’. IEEE Transactions on Communications, τ. 72, τχ. 3, Μάρτιος 2024, σελ. 1578–95. IEEE Xplore, <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3332856>.
24. Liu, Yameng, κ.ά. A Shared Cluster-based Stochastic Channel Model for Integrated Sensing and Communication Systems. arXiv, 2022. DOI.org (Datacite), <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2211.06615>.
25. Bashirov, Enver. Cell-Free MIMO in mmWave Networks – MINTS – Millimeter-Wave Networking and Sensing for Beyond 5G. <https://b5g-mints.eu/blog20/>.

Παράρτημα I [Παραμετροποίηση RIS]

```
function [RIS_elements, RIS_phases, element_positions, RIS_response, efficiency] =  
parametropiisi_RIS(lambda)  
  
num_rows = 8;  
num_cols = 8;  
RIS_elements = num_rows * num_cols;  
el_distance = lambda/2;  
  
RIS_phases = 2*pi*rand(num_rows, num_cols);  
  
element_positions = zeros(RIS_elements, 2);  
element_id = 1;  
  
for row = 0:num_rows-1  
    for col = 0:num_cols-1  
        element_positions(element_id,:) = [col * el_distance, row * el_distance];  
        element_id = element_id + 1;  
    end  
end  
  
RIS_response = exp(1j * RIS_phases(:));  
  
efficiency = 0.8;  
  
phase_resolution = 2*pi/64;  
  
end
```