



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
UNIVERSITY OF PIRAEUS

INTEGRATED SENSING AND COMMUNICATION: A
KEY ENABLER FOR RESILIENCE AND
SUSTAINABILITY IN FUTURE NETWORKS

ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ
ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ : Ο ΒΑΣΙΚΟΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΒΙΩΣΙΜΩΝ ΚΑΙ ΑΝΘΕΚΤΙΚΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ
ΔΙΚΤΥΩΝ ΝΕΑΣ ΓΕΝΙΑΣ

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών “Κλιματική Κρίση και
Τεχνολογίες Πληροφορικής και Επικοινωνιών
(MSc in Climate Crisis and Information and Communication
Technologies)”

Αναστασάκης Δημήτρης
ΑΜ:ΜΚΚ 2304

Επιβλέπουσα: Δρ.Αλεξίου Αγγελική

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εξετάζει την τεχνολογία Ενσωματωμένων Συστημάτων Ανίχνευσης και Επικοινωνιών (Integrated Sensing and Communication - ISAC), αναδεικνύοντας τον ρόλο της ως βασικό μοχλό για την ανάπτυξη ευφυών, βιώσιμων και ανθεκτικών ασύρματων δικτύων νέας γενιάς (6G και πέραν). Αναλύει τόσο τη θεωρητική θεμελίωση όσο και τις πρακτικές εφαρμογές της ISAC, καλύπτοντας τη συγχώνευση των λειτουργιών ανίχνευσης και επικοινωνίας, τα επίπεδα ενσωμάτωσης, τις τεχνολογικές προκλήσεις σε επίπεδο υλικού, επεξεργασίας σήματος και σχεδιασμού δεκτών, καθώς και τις στρατηγικές σχεδιασμού για διπλή λειτουργικότητα. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη συμβολή της τεχνολογίας στην αποδοτικότερη χρήση των πόρων, στη βελτίωση της λειτουργικότητας των σύγχρονων δικτύων και στην ενίσχυση της βιωσιμότητας. Η εργασία εστιάζει επίσης στις ευρύτερες επιπτώσεις της ενσωμάτωσης της ISAC σε κρίσιμους τομείς εφαρμογών, ενώ σκιαγραφεί τις μελλοντικές προοπτικές και τις τεχνολογικές εξελίξεις που αναμένεται να καθορίσουν τον ρόλο της στα δίκτυα του μέλλοντος.

ABSTRACT

This paper examines Integrated Sensing and Communication (ISAC) technology, highlighting its role as a key enabler for the development of intelligent, sustainable and resilient next-generation wireless networks (6G and beyond). It analyzes both the theoretical foundation and practical applications of ISAC, covering the fusion of sensing and communication functions, the levels of integration, the technological challenges at the hardware, signal processing and receiver design levels, as well as the design strategies for dual functionality. Particular emphasis is given to the contribution of the technology to more efficient use of resources, improve the functionality of modern networks and enhance the sustainability. It also focuses on the broader implications of the integration of ISAC in critical application areas, while outlining future perspectives and technological developments that are expected to define its role in the networks of the future.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

PART I : ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

- Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην Τεχνολογία Ενσωματωμένων Συστημάτων Ανίχνευσης και Επικοινωνιών (ISAC)2

1. Ιστορικό και Σημασία των Συστημάτων ISAC
- 1.2 Σκοπός και Οφέλη της Τεχνολογίας ISAC
- 1.3 Βασικές Τεχνολογικές Προκλήσεις στα Συστήματα ISAC

- Κεφάλαιο 2: Επίπεδα Ενσωμάτωσης και Στρατηγικές Σχεδιασμού

- 2.1 Επίπεδα Ενσωμάτωσης ISAC.
 - 2.1.1 Διαμοιρασμός Φάσματος.
 - 2.1.2 Διαμοιρασμός Υποδομών.
 - 2.1.3 Ενοποίηση Κυματομορφών και Επεξεργασίας Σήματος
 - 2.1.4 Πλήρης Ενοποίηση – Perceptive networks.
- 2.2 Στρατηγικές Σχεδιασμού ISAC
 - 2.2.2 Σχεδιασμός με Επίκεντρο την Επικοινωνία
 - 2.2.3 Ενοποιημένος Σχεδιασμός

- Κεφάλαιο 3: Εξελίξεις και Τεχνολογικές Προκλήσεις στο Υλικό και την Επεξεργασία Σήματος

- 3.1 Νέες Τεχνολογίες Υλικού για ISAC
 - 3.1.1 Συστοιχίες Κεραιών MIMO και UM-MIMO
 - 3.1.2 Εξελιγμένοι Πομποδέκτες και RF Front-Ends
 - 3.1.3 Συστήματα Συστοιχιών Κεραιών Σωμάτων (Body Array Systems)
- 3.2 Προκλήσεις Επεξεργασίας Σήματος και Τεχνολογίες MIMO και UM-MIMO
 - 3.2.1 Πολυκαναλική Επεξεργασία και Αλγόριθμοι Συγχρονισμού
 - 3.2.2 Location computing και Mobile Edge Computing

3.3 Προκλήσεις και Λύσεις σε Δυναμικά Περιβάλλοντα και Παρεμβολές

3.3.1 Διαχείριση Παρεμβολών και Τεχνικές Interference Mitigation

3.3.2 Τεχνολογίες SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) και Χαρτογράφηση

Κεφάλαιο 4 : Σχεδιασμός και Βελτιστοποίηση Δεκτών

4.1 Φυσικά Συστήματα Συνύπαρξης (Physical Co-existing Systems)

4.2 Συστήματα Διπλής Λειτουργικότητας (Dual-functional Systems)

Κεφάλαιο 5: Τεχνικές Εξελίξεις και Εφαρμογές στα PMNs

5.2 Διαχείριση Παρεμβολών στα PMNs,

5.2.2 Τεχνικές Διαχείρισης Παρεμβολών

5.3 Συνεργατική Ανίχνευση στα PMNs

5.3.2 Βασικές Τεχνικές Συνεργατικής Ανίχνευσης

Κεφάλαιο 6 : Εισαγωγή στις RIS-Υποστηριζόμενες Ενσωματωμένες Λειτουργίες Ανίχνευσης και Επικοινωνίας (RIS-Enabled ISAC)

6.1 Βασικές Αρχές

6.2 Τεχνολογίες Επεξεργασίας Σήματος για RIS-Enabled ISAC

6.2.1 Απόκτηση Πληροφοριών Γωνίας (AoA)

6.2.2 Εκτίμηση Καθυστέρησης και Doppler

6.3 : Τεχνικές Σχεδιασμού και Βελτιστοποίησης των RIS

Κεφάλαιο 7: Συχνότητες και Ασύρματα Συστήματα Millimeter Wave (mmWave) και Terahertz (THz)

7.2 Χαρακτηριστικά και Προκλήσεις THz Συχνοτήτων

PART II: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ INTERGRATION

Κεφάλαιο 8: Ασύρματα Αισθητήρια με WiFi, 4G, και 5G Δίκτυα

Κεφάλαιο 9: Εισαγωγή στα Δίκτυα Αντίληψης για Κινητές Συσκευές (Perceptive Mobile Networks - PMNs)

9.1 Αρχιτεκτονική των Δικτύων Αντίληψης για Κινητές Συσκευές (PMNs)

9.2 Τεχνολογικά Χαρακτηριστικά των Δικτύων Αντίληψης για Κινητές Συσκευές (PMNs)

9.3 Βελτιστοποίηση και Παρεμβολές

9.4 Προκλήσεις και Ερευνητικές Κατευθύνσεις για τα Δίκτυα Αντίληψης για Κινητές Συσκευές (PMNs)

9.4.2 Προκλήσεις στη Δυναμική Ανίχνευση και κατανομή πόρων.

Κεφάλαιο 10: Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Προοπτικές για τα Συστήματα ISAC

10.1.1 Δίκτυα 6G και THz Επικοινωνία

10.1.2 ISAC και Δίκτυα των Πραγμάτων (IoT)

10.2 ISAC και Τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης και Μηχανικής Μάθησης

10.3 Ανάπτυξη Υλικού και Νέων Υλικών για ISAC

10.4 Βελτίωση της Ιδιωτικότητας και Ασφάλειας Δεδομένων στα ISAC Συστήματα

PART III: ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΚΑΙ SUSTAINABILITY

Κεφάλαιο 11: Προκλήσεις και Ηθικά Ζητήματα στα Συστήματα ISAC

11.1 Προκλήσεις Ασφάλειας στα ISAC Συστήματα

11.2 Η Επίδραση στην Αγορά Εργασίας

Κεφάλαιο 12 : Ενεργειακή Αποδοτικότητα και Βιωσιμότητα

12.1 Case studies

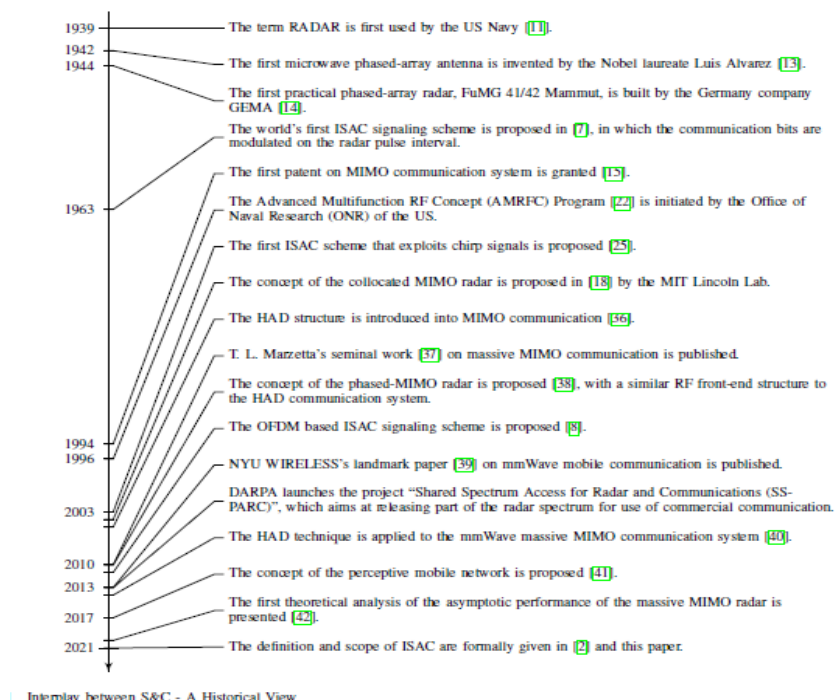
Βιβλιογραφία

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην Τεχνολογία Ενσωματωμένων Συστημάτων Ανίχνευσης και Επικοινωνιών (ISAC)

1.1 Ιστορικό και Σημασία των Συστημάτων ISAC

Η τεχνολογία Ενσωματωμένων Συστημάτων Ανίχνευσης και Επικοινωνιών (Integrated Sensing and Communication – ISAC) αντιπροσωπεύει μια από τις πιο πρωτοποριακές εξελίξεις στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών και αποτελεί πυλώνα της μετάβασης στα δίκτυα 6ης γενιάς (6G). Το ISAC συνδυάζει λειτουργίες που στο παρελθόν διαχωρίζονταν, δηλαδή την ανίχνευση (όπως ραντάρ και αισθητήρες) και την επικοινωνία (όπως Wi-Fi και κινητή τηλεφωνία), σε ένα ενιαίο σύστημα που βελτιώνει την αποδοτικότητα, μειώνει τα κόστη και διευκολύνει την ανάπτυξη και συντήρηση των επικοινωνιακών δικτύων.

Η προέλευση των συστημάτων ISAC χρονολογείται από την ανάγκη για ενσωματωμένες λύσεις στον στρατιωτικό τομέα και την αεροδιαστημική, όπου το βάρος, ο όγκος και η ενέργεια ήταν καθοριστικοί περιοριστικοί παράγοντες. Οι πρώτες μορφές ISAC επικεντρώθηκαν στη συνύπαρξη των λειτουργιών ανίχνευσης και επικοινωνίας μέσω διαμοιρασμού του φάσματος, όπου τα συστήματα ραντάρ και επικοινωνίας χρησιμοποιούσαν κοινούς πόρους. Αυτή η προσέγγιση αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποδοτική, επιτρέποντας την εξοικονόμηση πόρων και την ευελιξία στη διαχείριση των συχνοτήτων.



Fan Liu, Yuanhao Cui : Integrated Sensing and Communications: Integrated Sensing and Communications: Towards Dual-functional Wireless Networks for 6G and Beyond pg.3

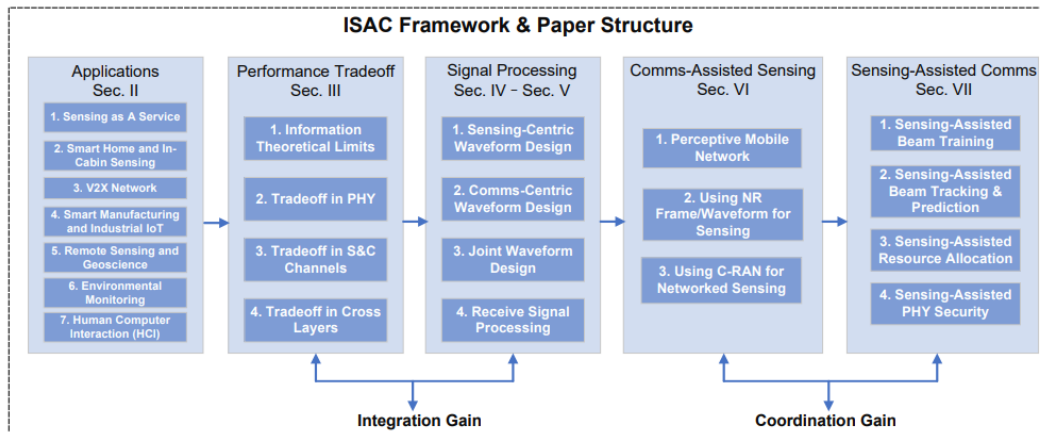
Η ανάπτυξη των τεχνολογιών 5G και η μεταγενέστερη έλευση του 6G οδήγησαν σε νέα πρότυπα, καθώς η αυξημένη ανάγκη για υποστήριξη λειτουργιών όπως η εντοπιστική ακρίβεια, η ανάλυση του περιβάλλοντος και η επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο απαιτούν την ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών σε ένα ενιαίο πλαίσιο. Οι εφαρμογές του ISAC δεν περιορίζονται μόνο σε στρατιωτικά και βιομηχανικά περιβάλλοντα, αλλά επεκτείνονται σε νέες περιοχές, όπως τα αυτόνομα οχήματα, οι έξυπνες πόλεις, και η περιβαλλοντική παρακολούθηση.

1.2 Σκοπός και Οφέλη της Τεχνολογίας ISAC

Η πρωτοπορία της τεχνολογίας ISAC έγκειται στην ικανότητά της να συνδυάζει την ανίχνευση και την επικοινωνία σε ένα ενοποιημένο σύστημα. Αυτή η συνύπαρξη λειτουργιών εξασφαλίζει τη βελτιστοποίηση της χρήσης του φάσματος, καθώς τα ίδια σήματα που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία μπορούν παράλληλα να αξιοποιηθούν και για σκοπούς ανίχνευσης. Με αυτόν τον τρόπο, οι τεχνολογίες ISAC συμβάλλουν στη μείωση της ανάγκης για αποκλειστικές συχνότητες ανίχνευσης, επιτυγχάνοντας σημαντική εξοικονόμηση πόρων και βελτίωση της συνολικής απόδοσης του δικτύου.

Αξιοσημείωτο παράδειγμα εφαρμογής των ISAC συστημάτων είναι οι έξυπνες πόλεις, όπου τα δίκτυα επικοινωνιών μπορούν να παρακολουθούν συνεχώς και να προσαρμόζονται σε αλλαγές στο περιβάλλον, όπως είναι η κίνηση των οχημάτων, οι αλλαγές στη θερμοκρασία ή η ποιότητα του αέρα. Σε τέτοιου είδους περιβάλλοντα, τα συστήματα ανίχνευσης λειτουργούν σε συνδυασμό με την επικοινωνία, διασφαλίζοντας ότι οι συσκευές IoT και οι αισθητήρες μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους και να προσαρμόζονται στις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Επιπλέον, η τεχνολογία ISAC έχει καθοριστικό ρόλο και σε βιομηχανικά περιβάλλοντα όπου η ασφάλεια και η αποδοτικότητα έχουν ζωτική σημασία. Τα συστήματα ανίχνευσης και επικοινωνίας μπορούν να ελέγχουν την παραγωγική διαδικασία, να αναγνωρίζουν τυχόν προβλήματα και να προσαρμόζουν τις λειτουργίες τους, βελτιώνοντας τη συνολική ποιότητα και εξοικονομώντας πόρους.



Fan Liu, Yuanhao Cui : Integrated Sensing and Communications: Integrated Sensing and Communications: Towards Dual-functional Wireless Networks for 6G and Beyond pg.4

Παραπάνω βλέπουμε πως τέτοιου είδους συστήματα, μπορούν να βελτιώσουν τις συνολικές επιδόσεις και δυνατότητες των συστημάτων.

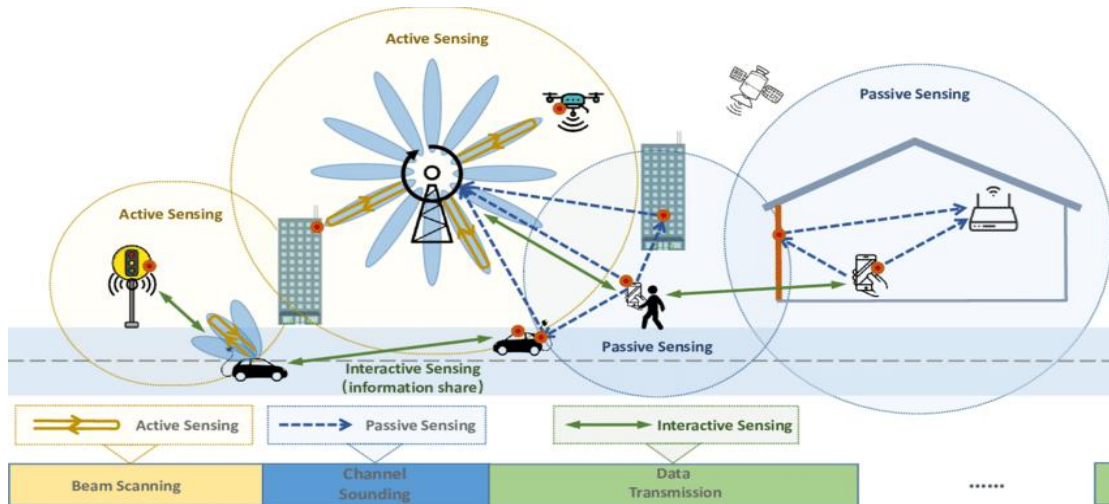
1.3 Βασικές Τεχνολογικές Προκλήσεις στα Συστήματα ISAC.

Παρά τα σημαντικά οφέλη, η υλοποίηση και ανάπτυξη των συστημάτων ISAC συνοδεύεται από μια σειρά τεχνολογικών προκλήσεων.

Πρώτη και κύρια πρόκληση είναι η επίτευξη της συμβίωσης των σημάτων ανίχνευσης και επικοινωνίας, καθώς αυτά τα δύο είδη σημάτων έχουν πολύ διαφορετικές απαιτήσεις. Η ανίχνευση απαιτεί υψηλή ακρίβεια και ισχυρή ισχύ για την ακριβή καταγραφή και αναγνώριση αντικειμένων και φαινομένων, ενώ η επικοινωνία απαιτεί μέγιστη εκμετάλλευση του φάσματος με ελάχιστες παρεμβολές

Οι νέες τεχνολογίες, όπως το MIMO (Multiple Input Multiple Output) και το UM-MIMO (Ultra Massive MIMO), προσφέρουν εντυπωσιακές δυνατότητες στη βελτιστοποίηση των ISAC συστημάτων, επιτρέποντας τη δημιουργία πολλαπλών κανάλων επικοινωνίας και ανίχνευσης ταυτόχρονα. Παρόλο που οι δυνατότητες του MIMO έχουν αξιοποιηθεί ευρέως, η πλήρης εφαρμογή των τεχνολογιών αυτών στα συστήματα ISAC παραμένει προκλητική, λόγω των απαιτήσεων επεξεργασίας σήματος και της ενσωμάτωσης των υποδομών.

Ένας ακόμα καθοριστικός παράγοντας είναι η επεξεργασία σήματος. Τα ISAC συστήματα πρέπει να διαθέτουν αλγόριθμους, που μπορούν να χειριστούν ταυτόχρονα δεδομένα από αισθητήρες και επικοινωνιακά δεδομένα, και να παρέχουν επαρκή ανάλυση σε πραγματικό χρόνο. Η συμβίωση των λειτουργιών ανίχνευσης και επικοινωνίας απαιτεί τη χρήση πολύπλοκων αλγορίθμων για την κατανόηση των δεδομένων του περιβάλλοντος χωρίς να επηρεάζεται η επικοινωνιακή απόδοση. Οι προκλήσεις στην επεξεργασία σήματος και στη διαχείριση πόρων είναι κρίσιμες για τη βιωσιμότητα αυτών των συστημάτων σε απαιτητικά περιβάλλοντα.



Jie Yang , Xi Yang : Integrated Sensing and Communication with Multi-Domain Cooperation pg.4

Τέλος, σημαντική πρόκληση αποτελεί και η ασφάλεια των ISAC συστημάτων, καθώς η ενσωμάτωση της ανίχνευσης και της επικοινωνίας σε ένα ενιαίο σύστημα εισάγει κινδύνους που δεν υπάρχουν στα παραδοσιακά συστήματα. Ο σχεδιασμός ασφαλών πρωτοκόλλων για την προστασία των δεδομένων ανίχνευσης και επικοινωνίας καθίσταται ουσιώδης, ενώ παράλληλα είναι απαραίτητη η εφαρμογή τεχνολογιών που μπορούν να διασφαλίσουν την ιδιωτικότητα των χρηστών και των δεδομένων.

Κεφάλαιο 2: Επίπεδα Ενσωμάτωσης και Στρατηγικές Σχεδιασμού.

Η ενσωμάτωση των λειτουργιών ανίχνευσης και επικοινωνίας σε ένα ενιαίο σύστημα είναι ένα από τα βασικά επιτεύγματα της τεχνολογίας ISAC, καθώς ενισχύει σημαντικά την αποδοτικότητα των δικτύων και επιτρέπει την ανάπτυξη καινοτόμων εφαρμογών. Τα επίπεδα ενσωμάτωσης των ISAC συστημάτων καθορίζονται από τον βαθμό συγχώνευσης μεταξύ των δύο λειτουργιών, τις τεχνολογικές δυνατότητες και τις ανάγκες κάθε εφαρμογής. Παρακάτω αναλύονται τα βασικά επίπεδα ενσωμάτωσης, καθώς και οι στρατηγικές σχεδιασμού που απαιτούνται για την υλοποίηση και τη βελτιστοποίηση των συστημάτων ISAC.

2.1 Επίπεδα Ενσωμάτωσης ISAC.

Τα ISAC συστήματα μπορούν να λειτουργούν σε διάφορα επίπεδα ενσωμάτωσης, τα οποία εξαρτώνται από τη συνύπαρξη και την αλληλεπίδραση των λειτουργιών ανίχνευσης και επικοινωνίας. Κάθε επίπεδο παρέχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και απαιτεί διαφορετικές τεχνικές για την υλοποίηση. Ενδεικτικά, τα βασικά επίπεδα ενσωμάτωσης περιλαμβάνουν:

2.1.1 Διαμοιρασμός Φάσματος:

Στο βασικότερο επίπεδο ενσωμάτωσης, οι λειτουργίες ανίχνευσης και επικοινωνίας διαμοιράζονται το ίδιο φάσμα, χωρίς να απαιτείται πλήρης ενοποίηση του υλικού ή των

υποδομών. Στην προσέγγιση αυτή, τα σήματα ανίχνευσης και επικοινωνίας χρησιμοποιούν κοινές συχνότητες, αλλά δεν αλληλεπιδρούν άμεσα.

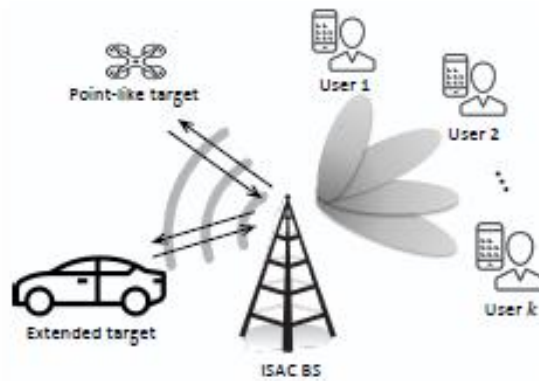
Στο επίπεδο αυτό, η στρατηγική συνύπαρξης εξασφαλίζεται μέσω τεχνικών κατανομής του φάσματος και διαχείρισης των παρεμβολών, ώστε να αποφεύγεται η σύγκρουση μεταξύ των σημάτων.

Η αρχική μορφή ISAC βασίστηκε στον διαμοιρασμό του φάσματος, ειδικά σε στρατιωτικές εφαρμογές, όπου το φάσμα συχνοτήτων ήταν περιορισμένο και η αποδοτικότητα ήταν κρίσιμη. Με τον διαμοιρασμό του φάσματος, οι οργανισμοί μπορούσαν να μειώσουν το κόστος και την πολυπλοκότητα των συστημάτων, επιτρέποντας την ταυτόχρονη λειτουργία ανίχνευσης και επικοινωνίας σε ένα κοινό περιβάλλον. Στα σύγχρονα δίκτυα, ο διαμοιρασμός φάσματος παραμένει βασικό επίπεδο ενσωμάτωσης, ιδιαίτερα σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και Wi-Fi, όπου οι συχνότητες είναι πολύτιμες και οι πόροι περιορισμένοι.

2.1.2 Διαμοιρασμός Υποδομών:

Στο δεύτερο επίπεδο ενσωμάτωσης, τα ISAC συστήματα μοιράζονται όχι μόνο το φάσμα αλλά και κοινές υποδομές υλικού, όπως κεραίες, πομποδέκτες και άλλα στοιχεία δικτύου. Στο επίπεδο αυτό, η ενσωμάτωση προχωρά περισσότερο, καθώς οι λειτουργίες ανίχνευσης και επικοινωνίας συνδυάζονται στον ίδιο εξοπλισμό και λειτουργούν παράλληλα. Ο διαμοιρασμός των υποδομών παρέχει πλεονεκτήματα όσον αφορά την εξοικονόμηση πόρων και τη βελτίωση της αποδοτικότητας, αλλά απαιτεί αυξημένη συντονισμένη διαχείριση, ώστε να αποφεύγονται παρεμβολές.

Στο επίπεδο του διαμοιρασμού υποδομών, οι συστοιχίες κεραιών και οι τεχνολογίες όπως το MIMO επιτρέπουν τη διαχείριση της κατεύθυνσης και της έντασης των σημάτων, επιτρέποντας την ταυτόχρονη λειτουργία ανίχνευσης και επικοινωνίας. Αυτή η τεχνολογία καθιστά δυνατή την υλοποίηση έξυπνων πόλεων, όπου οι κεραίες επικοινωνίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την ανίχνευση αντικειμένων ή την ανάλυση της κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο. Οι προκλήσεις σε αυτό το επίπεδο αφορούν την ανάγκη για προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας σήματος, που θα διασφαλίσουν την ποιότητα και των δύο λειτουργιών.

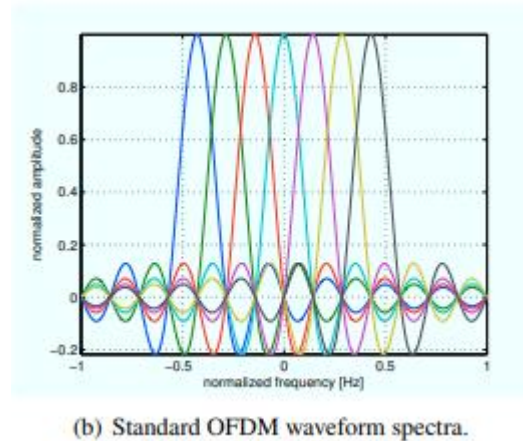
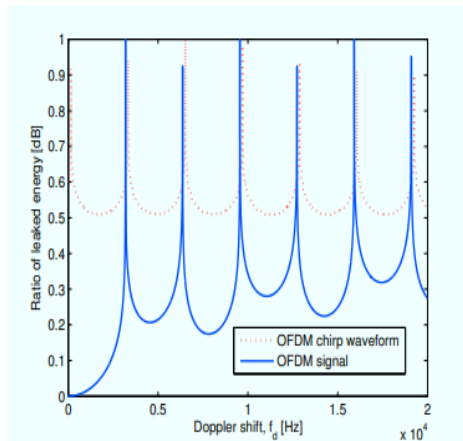


Jiaqi Zou , Songlin Sun :Energy-Efficient Beamforming Design for Integrated Sensing and Communications Systems pg.6

2.1.3 Ενοποίηση Κυματομορφών και Επεξεργασίας Σήματος:

Στο τρίτο επίπεδο ενσωμάτωσης, οι λειτουργίες ανίχνευσης και επικοινωνίας ενσωματώνονται σε ένα κοινό πλαίσιο κυματομορφών και επεξεργασίας σήματος. Στο επίπεδο αυτό, οι κυματομορφές που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία μπορούν να αξιοποιηθούν και για σκοπούς ανίχνευσης, επιτρέποντας τη συλλογή δεδομένων σχετικά με το περιβάλλον παράλληλα με τη μετάδοση πληροφοριών. Η στρατηγική αυτή προσφέρει μεγαλύτερη αποδοτικότητα και ταχύτητα στις λειτουργίες ανίχνευσης, καθώς τα δεδομένα μπορούν να αναλυθούν σε πραγματικό χρόνο χωρίς την ανάγκη ξεχωριστών διαδικασιών.

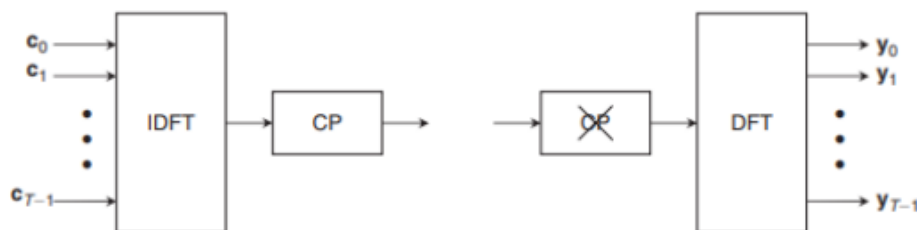
Η ενοποίηση κυματομορφών και επεξεργασίας σήματος βασίζεται σε προηγμένες τεχνικές, όπως το OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), το οποίο επιτρέπει τη διαχείριση και ανάλυση πολλαπλών συχνοτήτων ταυτόχρονα. Στην πράξη, αυτή η τεχνολογία επιτρέπει στα ISAC συστήματα να εκμεταλλεύονται το ίδιο σήμα τόσο για την επικοινωνία όσο και για την ανίχνευση, επιτυγχάνοντας εξαιρετική απόδοση σε περιβάλλοντα όπως τα αυτόνομα οχήματα, όπου η ανίχνευση αντικειμένων και η επικοινωνία απαιτούνται ταυτόχρονα.



Wen-gin Wang , Zhi Zheng : *OFDM Chirp Waveform Diversity For Co-Designed Radar-Communication System*

Η OFDM βασίζεται στην λογική της ορθογωνικότητας δηλαδή τοποθετούνται έτσι οι συχνότητες ώστε ακόμα και όταν υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των σημάτων ο δεκτής να μπορεί να ανακτήσει την πληροφορία. Επιπλέον, με αυτή τη τεχνική περιορίζουμε το φαινόμενο των διαλείψεων καθώς θα επηρεάζουν μόνο κάποιες υποφέρουσες συχνότητες , επίσης το πιο σημαντικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνικής είναι ότι αποφεύγουμε την ενδωσυμβολική παρεμβολή (ISI) που προκαλείται από τις διαφορετικές διαδρομές των σύμβολων. Τέλος, για να πετύχουμε την ορθογωνικότητα χρησιμοποιούμε ορθογωνικούς κώδικες.

Η MIMO-OFDM μπορεί να θεωρηθεί ως συχνότητα καθώς εκμεταλλεύεται την ποικιλομορφία της συχνότητας. Η OFDM front-end μετατρέπει το επιλεκτικό κανάλι συχνότητας σε παράλληλα κανάλια εξασθένισης. Η κυρία ιδέα είναι η μετατροπή του πίνακα του καναλιού σε κυκλικό μέσω της προσθήκης ενός κυκλικού προθέματος στη εκπεμπόμενη ακολουθία. Ο πίνακας του αριστερού φορέα είναι DFT(διακριτός μετασχηματισμός Fourier) και ο πίνακας του δεξιού IDFT(αντίστροφος διακριτός μετασχηματισμός Fourier).



Claude Oestges , Bruno Clerckx – *MIMO Wireless Communication _From Real-World Propagation to Space-Time Code Design pg.371*

2.1.4 Πλήρης Ενοποίηση – Perceptive networks:

Στο ανώτατο επίπεδο ενσωμάτωσης, τα *perceptive networks* ενσωματώνουν πλήρως τις λειτουργίες ανίχνευσης και επικοινωνίας, επιτρέποντας στις συσκευές να «αισθάνονται» το περιβάλλον τους και να προσαρμόζουν τη λειτουργία τους δυναμικά. Στα *perceptive networks*, οι πληροφορίες που συλλέγονται από τους αισθητήρες μπορούν να επηρεάσουν την επικοινωνία και αντίστροφα, δημιουργώντας ένα σύστημα με αυξημένη ευαισθησία και προσαρμοστικότητα. Τα δίκτυα αυτά χρησιμοποιούν τεχνικές, όπως το SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), για την καταγραφή και ανάλυση του περιβάλλοντος, επιτρέποντας τη χρήση τους σε πολύπλοκα και δυναμικά περιβάλλοντα, όπως οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις και οι έξυπνες πόλεις.

Στο επίπεδο αυτό, απαιτείται η πλήρης συγχώνευση τόσο του εξοπλισμού, όσο και των πρωτοκόλλων, καθώς τα δεδομένα ανίχνευσης και επικοινωνίας συνδυάζονται και αναλύονται από κοινού, επιτυγχάνοντας υψηλά επίπεδα απόδοσης. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε εφαρμογές, όπου η ακρίβεια και η ταχύτητα απόκρισης είναι κρίσιμες, όπως στην αυτόνομη οδήγηση και στις εφαρμογές ασφάλειας.

2.2 Στρατηγικές Σχεδιασμού ISAC

Η στρατηγική σχεδιασμού αποτελεί βασικό παράγοντα για την αποτελεσματική λειτουργία και βέλτιστη απόδοση των συστημάτων ISAC. Ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής και το επίπεδο ενσωμάτωσης, έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές προσεγγίσεις για τον σχεδιασμό των ISAC συστημάτων. Οι βασικές στρατηγικές περιλαμβάνουν τον σχεδιασμό με επίκεντρο την ανίχνευση, τον σχεδιασμό με επίκεντρο την επικοινωνία, και τον ενοποιημένο σχεδιασμό.

2.2.1 Σχεδιασμός με Επίκεντρο την Ανίχνευση:

Στον σχεδιασμό με επίκεντρο την ανίχνευση, το ISAC σύστημα έχει βελτιστοποιηθεί για να προσφέρει υψηλή απόδοση στην ανίχνευση του περιβάλλοντος, με κύριο στόχο την ακριβή συλλογή δεδομένων και την ανάλυση σε πραγματικό χρόνο. Ο σχεδιασμός αυτός χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές, όπου η ανίχνευση είναι η κύρια προτεραιότητα, όπως στις βιομηχανικές εφαρμογές παρακολούθησης και χαρτογράφησης. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό αυτό περιλαμβάνουν τις συστοιχίες κεραιών και την προηγμένη επεξεργασία σήματος, ώστε να επιτυγχάνονται υψηλά επίπεδα ακρίβειας και να αποφεύγονται οι παρεμβολές με τις λειτουργίες επικοινωνίας.

2.2.2 Σχεδιασμός με Επίκεντρο την Επικοινωνία:

Αντίθετα, στον σχεδιασμό με επίκεντρο την επικοινωνία, το σύστημα ISAC έχει προσαρμοστεί για να εξυπηρετεί κυρίως τις ανάγκες επικοινωνίας, ενώ οι λειτουργίες ανίχνευσης λειτουργούν σε δεύτερο ρόλο. Αυτή η στρατηγική χρησιμοποιείται συχνά σε δίκτυα όπου οι απαιτήσεις επικοινωνίας είναι υψηλές, όπως στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και Wi-Fi.

Σε αυτόν τον τύπο σχεδιασμού, η ποιότητα και η σταθερότητα της επικοινωνίας είναι οι κύριοι παράγοντες σχεδιασμού, με την ανίχνευση να προσαρμόζεται στις απαιτήσεις του επικοινωνιακού συστήματος, συχνά περιοριζόμενη σε βασικές λειτουργίες.

2.2.3 Ενοποιημένος Σχεδιασμός

Ο ενοποιημένος σχεδιασμός προσπαθεί να ισορροπήσει μεταξύ των λειτουργιών ανίχνευσης και επικοινωνίας, προσφέροντας ταυτόχρονα και τις δύο λειτουργίες σε βέλτιστα επίπεδα. Ο σχεδιασμός αυτός είναι κατάλληλος για εφαρμογές όπου οι λειτουργίες ανίχνευσης και επικοινωνίας είναι ισοδύναμες σε προτεραιότητα, όπως στην αυτόνομη οδήγηση, όπου η ανίχνευση και η επικοινωνία είναι απαραίτητες για την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία των οχημάτων. Ο ενοποιημένος σχεδιασμός βασίζεται σε τεχνικές, όπως η κατανομή φάσματος και η διαχείριση πόρων, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία και των δύο συστημάτων.

Συνοψίζοντας, η ανάπτυξη και η εφαρμογή των στρατηγικών σχεδιασμού απαιτούν προηγμένη επεξεργασία σήματος, διαχείριση πόρων, και προηγμένα πρωτόκολλα, ώστε να διασφαλίζεται η αποδοτική συνύπαρξη των λειτουργιών ανίχνευσης και επικοινωνίας. Η κατανόηση και βελτιστοποίηση των ISAC συστημάτων μπορεί να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στις εφαρμογές επόμενης γενιάς, όπως την εξοικονόμηση ενέργειας, τη βελτίωση της ποιότητας ζωής, και την ενίσχυση της ασφάλειας.

Κεφάλαιο 3: Εξελιζείς και Τεχνολογικές Προκλήσεις στο Υλικό και την Επεξεργασία Σήματος.

Η ανάπτυξη και η αποδοτική λειτουργία των Ενσωματωμένων Συστημάτων Ανίχνευσης και Επικοινωνιών (ISAC) βασίζονται σε δύο κυρίαρχους τεχνολογικούς τομείς: το υλικό (hardware) και την επεξεργασία σήματος (signal processing).

Η σύζευξη αυτών των δύο τομέων διασφαλίζει ότι τα συστήματα ISAC μπορούν να επιτύχουν τη διπλή λειτουργικότητα της ανίχνευσης και της επικοινωνίας, καθιστώντας τα ικανά να ανταποκριθούν στις αυξανόμενες απαιτήσεις απόδοσης, ακρίβειας και

αποδοτικότητας. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε τις σημαντικότερες τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα του υλικού και της επεξεργασίας σήματος, που επιτρέπουν την εξέλιξη των ISAC συστημάτων, καθώς και τις προκλήσεις που συνοδεύουν την ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών.

3.1 Νέες Τεχνολογίες Υλικού για ISAC.

Η ανάγκη για ταυτόχρονη ανίχνευση και επικοινωνία επιβάλλει υψηλές απαιτήσεις στο υλικό που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση των συστημάτων ISAC. Πιο συγκεκριμένα, οι απαιτήσεις αυτές αφορούν την ταχύτητα, την ευελιξία, και την ακρίβεια του εξοπλισμού, ώστε να μπορούν τα συστήματα να ανταποκριθούν στις ανάγκες των διαφορετικών εφαρμογών, από την αυτόνομη οδήγηση μέχρι τα έξυπνα αστικά δίκτυα. Ο σχεδιασμός του υλικού σε αυτόν τον τομέα επικεντρώνεται κυρίως στις συστοιχίες κεραιών MIMO και UM-MIMO, τους εξελιγμένους πομποδέκτες και RF front-ends, και τα καινοτόμα συστήματα συστοιχιών σωμάτων (Body Array Systems).

3.1.1 Συστοιχίες Κεραιών MIMO και UM-MIMO:

Η τεχνολογία MIMO (Multiple Input Multiple Output) εισήγαγε μια θεμελιώδη αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η διαχείριση των ασύρματων σημάτων, επιτρέποντας την ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη δεδομένων μέσω πολλαπλών καναλιών. Οι συστοιχίες MIMO ενσωματώνουν πολλαπλές κεραίες τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη, διευρύνοντας έτσι την απόδοση και την ταχύτητα μετάδοσης σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνικές μιας κεραίας. Η επέκταση αυτής της τεχνολογίας στα συστήματα Ultra Massive MIMO (UM-MIMO) ενσωματώνει ακόμη μεγαλύτερες συστοιχίες κεραιών, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη διαθεσιμότητα καναλιών και συνεπώς αυξημένη χωρητικότητα φάσματος.

Η ενσωμάτωση των MIMO και UM-MIMO τεχνολογιών στα συστήματα ISAC είναι καίριας σημασίας, καθώς επιτρέπει τη συνύπαρξη πολλαπλών σημάτων ανίχνευσης και επικοινωνίας, ενισχύοντας την ταχύτητα και την ποιότητα της μετάδοσης. Ειδικότερα, οι τεχνολογίες UM-MIMO επιτρέπουν την αποστολή και λήψη πληροφοριών από πολλαπλά αντικείμενα ταυτόχρονα, αυξάνοντας την ικανότητα του συστήματος να εντοπίζει και να παρακολουθεί αντικείμενα σε πραγματικό χρόνο. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά την τεχνολογία UM-MIMO ιδανική για περιβάλλοντα με υψηλή κινητικότητα, όπως η αυτόνομη οδήγηση, όπου η ακρίβεια της ανίχνευσης και η ταχύτητα της επικοινωνίας είναι κρίσιμες για την ασφάλεια.

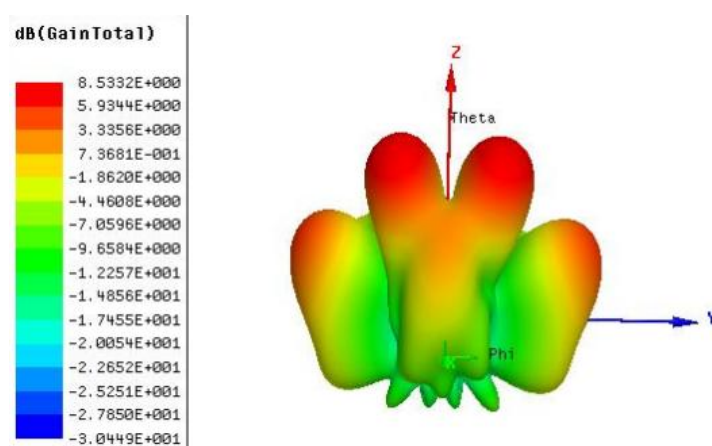
Δυναμική Διαχείριση Καναλιών με Τεχνικές MIMO

Οι τεχνικές MIMO επιτρέπουν την αξιοποίηση του φάσματος με ιδιαίτερα αποδοτικό τρόπο, καθώς κάθε κεραία μπορεί να λειτουργεί ανεξάρτητα και να διαχειρίζεται διαφορετικό κανάλι επικοινωνίας ή ανίχνευσης. Με αυτόν τον τρόπο, οι συστοιχίες MIMO παρέχουν υψηλό επίπεδο προσαρμοστικότητας στις συνθήκες του περιβάλλοντος, μειώνοντας τον κίνδυνο παρεμβολών και αυξάνοντας την αξιοπιστία της μετάδοσης. Ειδικότερα, οι τεχνικές δυναμικής διαχείρισης καναλιών, όπως το beamforming και το spatial multiplexing, επιτρέπουν στις κεραίες να προσαρμόζουν την κατεύθυνση και την ένταση του σήματος, ενισχύοντας την ανίχνευση και την επικοινωνία ταυτόχρονα.

Spatial Multiplexing

Στη χωρική πολυπλεξία χρειαζόμαστε πολλαπλές κεραίες στον πομπό και στο δέκτη. Η βασική ιδέα είναι η χρήση πολλαπλών κεραιών στο πομπό και στο δέκτη σε ένα μέσο διάδοσης με πολλούς σκεδαστές που οδηγούν τα πολλαπλά δεδομένα της ίδιας ζώνης συχνοτήτων σε αύξηση της χωρητικότητας γραμμικά. Η αύξηση της χωρητικότητας γίνεται μέσω των πολλαπλών κεραιών χωρίς να επηρεάζει το εύρος ζώνης ή την ισχύ μετάδοσης. Ακόμα μέσω της χωρικής πολυπλεξίας μπορούμε να εκμεταλλευτούμε όλο το εύρος των κεραιών αλλά έχουμε περιορισμό ως προς το κέρδος της διαφορισιμότητας. Το spatial multiplexing, εκμεταλλεύεται την πολυπλοκότητα των καναλιών, επιτρέποντας την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών σημάτων μέσω του ίδιου φάσματος, χωρίς να απαιτείται επιπλέον φασματικό εύρος. Οι δύο αυτές τεχνικές, όταν συνδυάζονται σε ένα σύστημα ISAC, επιτρέπουν τη βέλτιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος και τη διατήρηση υψηλών επιπέδων αξιοπιστίας στην επικοινωνία.

Το beamforming επιτρέπει την κατευθυντική εκπομπή του σήματος προς συγκεκριμένες περιοχές ενδιαφέροντος, μειώνοντας τις παρεμβολές και βελτιώνοντας την ποιότητα του σήματος.



D.Anastasakis : Σχεδίαση εκτυπωμένων κεραιών MIMO κατάλληλων για ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς

3.1.2 Εξελεγμένοι Πομποδέκτες και RF Front-Ends:

Οι πομποδέκτες και τα RF front-ends (Ραδιοσυχνικά Μέτωπα) αποτελούν τον συνδετικό κρίκο ανάμεσα στο φυσικό περιβάλλον και το σύστημα ISAC, καθώς είναι υπεύθυνοι για την επεξεργασία των σημάτων που εισέρχονται και εξέρχονται από το σύστημα. Οι τελευταίες εξελίξεις σε αυτούς τους τομείς επικεντρώνονται στην αύξηση της αποδοτικότητας και της ευελιξίας των πομποδεκτών, ώστε να μπορούν να διαχειριστούν ταυτόχρονα τόσο τις λειτουργίες ανίχνευσης όσο και τις λειτουργίες επικοινωνίας.

Οι νέες γενιές πομποδεκτών βασίζονται σε τεχνολογίες που επιτρέπουν την προσαρμογή των χαρακτηριστικών του σήματος σε πραγματικό χρόνο, όπως η προσαρμοστική ενίσχυση (adaptive amplification) και η φασματική απομόνωση (spectral isolation). Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν στα συστήματα ISAC να διαχειρίζονται τις παρεμβολές και να αποφεύγουν τη μείωση της ποιότητας του σήματος. Στις περιπτώσεις όπου οι παρεμβολές είναι ιδιαίτερα έντονες, η χρήση των RF front-ends επιτρέπει την εφαρμογή τεχνικών φασματικής καθαρότητας, διασφαλίζοντας ότι τα σήματα που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση δεν επηρεάζουν την επικοινωνία, και αντίστροφα.

3.1.3 Συστήματα Συστοιχιών Κεραιών Σωμάτων (Body Array Systems):

Η ανάπτυξη των συστημάτων συστοιχιών κεραιών σωμάτων (Body Array Systems) προσφέρει νέες δυνατότητες στα ISAC συστήματα, ειδικά όσον αφορά την ανάλυση υψηλής ακρίβειας και την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο. Οι συστοιχίες κεραιών σώματος επιτρέπουν στα ISAC συστήματα να κατευθύνουν δυναμικά την εκπομπή και λήψη του σήματος, ενισχύοντας έτσι την ανίχνευση αντικειμένων και τη μετάδοση δεδομένων με μεγάλη ακρίβεια. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για εφαρμογές που απαιτούν αυξημένη ευαισθησία στην αλλαγή περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπως τα αυτόνομα οχήματα και τα έξυπνα αστικά περιβάλλοντα.

Οι συστοιχίες κεραιών σωμάτων, σχεδιασμένες να λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, μπορούν να προσαρμόζονται σε δυναμικές αλλαγές του περιβάλλοντος, διατηρώντας την απόδοση του συστήματος ακόμη και σε υψηλές ταχύτητες. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει στα συστήματα ISAC να επικοινωνούν με πολλαπλά αντικείμενα ταυτόχρονα και να επιτυγχάνουν ανάλυση υψηλής ακρίβειας στην ανίχνευση, ακόμη και σε δύσκολες συνθήκες. Επίσης, με την προσαρμογή της κατεύθυνσης του σήματος και τη μείωση των παρεμβολών, τα Body Array Systems συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση της απόδοσης σε περιβάλλοντα με πυκνότητα συσκευών και υψηλό ρυθμό επικοινωνίας, όπως οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις και τα συστήματα υγειονομικής περίθαλψης.

3.2 Προκλήσεις Επεξεργασίας Σήματος και Τεχνολογίες MIMO και UM-MIMO.

Η επεξεργασία σήματος σε ένα σύστημα ISAC είναι μια ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία, καθώς περιλαμβάνει την ταυτόχρονη διαχείριση διαφορετικών τύπων δεδομένων και την εξασφάλιση της ακεραιότητας τόσο των σημάτων ανίχνευσης όσο και των σημάτων επικοινωνίας. Οι τεχνικές MIMO και UM-MIMO, παρά τις ευκαιρίες που προσφέρουν, εγείρουν σημαντικές προκλήσεις σε επίπεδο αλγορίθμων και επεξεργασίας.

3.2.1 Πολυκαναλική Επεξεργασία και Αλγόριθμοι Συγχρονισμού:

Η πολυκαναλική επεξεργασία απαιτεί προηγμένους αλγόριθμους που μπορούν να διαχειρίζονται πολλά σήματα ταυτόχρονα, εξασφαλίζοντας την ακρίβεια και την αξιοπιστία της ανίχνευσης. Οι αλγόριθμοι συγχρονισμού είναι κρίσιμοι για την επίτευξη αυτής της ταυτόχρονης λειτουργίας, καθώς διασφαλίζουν ότι τα κανάλια ανίχνευσης και επικοινωνίας παραμένουν συγχρονισμένα και οι λειτουργίες εκτελούνται σε πραγματικό χρόνο. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο αλγόριθμος συγχρονισμού των φάσεων (Phase Synchronization Algorithm), ο οποίος εξασφαλίζει ότι οι μεταβολές στη φάση του σήματος δεν διαταράσσουν την ακρίβεια της ανίχνευσης.

Στις σύγχρονες εφαρμογές, οι αλγόριθμοι συγχρονισμού χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με αλγόριθμους υπολογιστικής πολλαπλών καναλιών, όπως οι αλγόριθμοι FFT (Fast Fourier Transform), οι οποίοι επιτρέπουν την ανάλυση των δεδομένων σε διάφορα κανάλια συχνοτήτων και την αποδοτική κατανομή του φάσματος στα συστήματα ISAC. Η εφαρμογή τέτοιων αλγορίθμων επιτρέπει την ταυτόχρονη επικοινωνία με διαφορετικά σημεία ενδιαφέροντος και εξασφαλίζει ότι το σύστημα μπορεί να αναγνωρίζει πολλαπλά αντικείμενα σε δυναμικά περιβάλλοντα.

3.2.2 Location computing και Mobile Edge Computing:

Η location computing και η mobile edge computing αποτελούν κρίσιμες τεχνολογίες για την ενίσχυση της απόδοσης των ISAC συστημάτων, επιτρέποντας την επεξεργασία των δεδομένων τοπικά, κοντά στην πηγή τους. Αυτή η προσέγγιση εξαλείφει την ανάγκη για κεντρική επεξεργασία των δεδομένων, μειώνοντας τις καθυστερήσεις και βελτιώνοντας τη συνολική ταχύτητα απόκρισης του συστήματος.

Η location computing είναι ιδανική για εφαρμογές όπου η αμεσότητα στην επεξεργασία των δεδομένων είναι κρίσιμη, όπως τα αυτόνομα οχήματα και τα drones, που χρειάζονται ταχύτατη ανατροφοδότηση και ακρίβεια στον εντοπισμό. Από την άλλη πλευρά, η mobile edge computing εξασφαλίζει ότι οι αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος μπορούν να λειτουργούν τοπικά στις ίδιες τις συσκευές, χωρίς εξάρτηση από κεντρικές μονάδες επεξεργασίας. Αυτή η προσέγγιση ενισχύει την ευελιξία του συστήματος, επιτρέποντας την προσαρμογή σε αλλαγές του περιβάλλοντος και βελτιστοποιώντας την απόδοση ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής.

Αναγνώριση Μοτίβων και Αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης

Η ενσωμάτωση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης (machine learning) και αναγνώρισης μοτίβων (pattern recognition) στα συστήματα προσφέρει σημαντικές δυνατότητες για την αυτόματη ανάλυση και αναγνώριση αντικειμένων και συνθηκών. Οι αλγόριθμοι αυτοί επιτρέπουν στα συστήματα να αναλύουν τα δεδομένα ανίχνευσης και επικοινωνίας και να προσαρμόζονται σε νέες καταστάσεις και προφίλ χρηστών χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.

Με την χρήση τεχνικών όπως τα Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks) και οι Αναλυτές Κλασικής Μάθησης (Classical Learning Models), τα συστήματα μπορούν να επιτύχουν υψηλούς βαθμούς ακρίβειας στην αναγνώριση μοτίβων και στην ανάλυση δεδομένων. Ειδικά στα αυτόνομα οχήματα και στις εφαρμογές ασφάλειας, η αναγνώριση μοτίβων βοηθά τα συστήματα να λαμβάνουν γρήγορες και ακριβείς αποφάσεις βασισμένες στις πληροφορίες που συλλέγουν από το περιβάλλον.

3.3 Προκλήσεις και Λύσεις σε Δυναμικά Περιβάλλοντα και Παρεμβολές.

Η ταυτόχρονη λειτουργία των λειτουργιών ανίχνευσης και επικοινωνίας στα συστήματα δημιουργεί μια σειρά από τεχνολογικές προκλήσεις, ιδιαίτερα όταν τα συστήματα λειτουργούν σε περιβάλλοντα με υψηλή κινητικότητα και πολυπλοκότητα. Οι παρεμβολές, οι ανακλάσεις, και οι περιβαλλοντικές αλλαγές μπορούν να μειώσουν σημαντικά την απόδοση των συστημάτων, καθιστώντας αναγκαία την ανάπτυξη λύσεων που μπορούν να αντιμετωπίσουν αυτές τις προκλήσεις.

3.3.1 Διαχείριση Παρεμβολών και Τεχνικές Interference Mitigation:

Η διαχείριση των παρεμβολών αποτελεί κρίσιμο σημείο για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των ISAC συστημάτων. Σε περιβάλλοντα όπου οι παρεμβολές είναι έντονες, όπως οι πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές και οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις, οι ISAC συσκευές πρέπει να είναι σε θέση να απομονώνουν τα σήματα ανίχνευσης και επικοινωνίας από ανεπιθύμητους θορύβους και παρεμβολές. Ένας δημοφιλής τρόπος για τη διαχείριση των παρεμβολών είναι η χρήση τεχνικών διαμόρφωσης, όπως το Adaptive Beamforming και το Spatial Filtering, που βοηθούν στην εστίαση του σήματος προς συγκεκριμένες κατευθύνσεις, αποφεύγοντας τις παρεμβολές.

Επιπλέον, η τεχνολογία Interference Cancellation επιτρέπει στα συστήματα να απομονώνουν τα σήματα ανίχνευσης από τις παρεμβολές, διατηρώντας τη συνολική ποιότητα του σήματος και την ακεραιότητα της επικοινωνίας. Αυτή η τεχνική είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε δυναμικά περιβάλλοντα, όπου οι πηγές των παρεμβολών μπορούν να μεταβάλλονται συνεχώς. Με την εφαρμογή της Interference Cancellation, τα ISAC συστήματα μπορούν να προσαρμόζουν τη λειτουργία τους και να αποφεύγουν την απώλεια δεδομένων.

3.3.2 Τεχνολογίες SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) και Χαρτογράφηση:

Η τεχνολογία SLAM αποτελεί θεμελιώδες εργαλείο για τα ISAC συστήματα που λειτουργούν σε δυναμικά περιβάλλοντα. Μέσω της ταυτόχρονης εντοπισμού και χαρτογράφησης (Simultaneous Localization and Mapping), τα ISAC συστήματα μπορούν να ανιχνεύουν το περιβάλλον τους, να καταγράφουν δυναμικές αλλαγές και να προσαρμόζουν τη λειτουργία τους αναλόγως. Η χρήση του SLAM είναι απαραίτητη για εφαρμογές όπως η αυτόνομη οδήγηση και η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

Το SLAM επιτρέπει στα ISAC συστήματα να εντοπίζουν και να χαρτογραφούν αντικείμενα και δομές με ακρίβεια, ακόμα και σε συνθήκες χαμηλής ορατότητας ή σε περιβάλλοντα με έντονες αντανakλάσεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η χρήση της χαρτογράφησης επιτρέπει τη δημιουργία δυναμικών μοντέλων που βοηθούν τα συστήματα να προβλέπουν τις αλλαγές στο περιβάλλον και να διατηρούν τη σταθερότητα της επικοινωνίας.

Η εκτενής χρήση του SLAM και άλλων τεχνικών χαρτογράφησης σε ISAC συστήματα, όπως η Περιβαλλοντική Σάρωση (Environmental Scanning) και η Προβλεπόμενη Ανάλυση (Predictive Analytics), προσφέρουν την δυνατότητα για συνεχή ανάλυση και προσαρμογή των παραμέτρων του συστήματος. Αυτό επιτρέπει την απόδοση και των δύο λειτουργιών – ανίχνευσης και επικοινωνίας – με υψηλή αξιοπιστία και σε περιβάλλοντα με μεταβλητές συνθήκες, εξασφαλίζοντας την αποτελεσματικότητα και την ασφάλεια των συστημάτων.

Κεφάλαιο 4 : Σχεδιασμός και Βελτιστοποίηση Δεκτών.

Ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση των δεκτών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επίτευξη υψηλής απόδοσης και την εξασφάλιση της ταυτόχρονης ανίχνευσης και επικοινωνίας. Οι δέκτες πρέπει να είναι ικανοί να διαχειρίζονται ταυτόχρονα σήματα ανίχνευσης και επικοινωνίας, εξασφαλίζοντας ότι δεν υπάρχουν παρεμβολές και ότι τα δεδομένα επεξεργάζονται αποτελεσματικά.

4.1 Φυσικά Συστήματα Συνύπαρξης (Physical Co-existing Systems).

Τα φυσικά συστήματα συνύπαρξης (Physical Co-existing Systems) επιτρέπουν την ταυτόχρονη λειτουργία των τεχνολογιών ανίχνευσης και επικοινωνίας στο ίδιο φυσικό περιβάλλον. Η αρχιτεκτονική τους απαιτεί ειδικό σχεδιασμό, ώστε να διασφαλίζεται η ακεραιότητα των σημάτων, η ελαχιστοποίηση των παρεμβολών και η βέλτιστη χρήση του φάσματος.

Ο σχεδιασμός των δεκτών που υποστηρίζουν τη συνύπαρξη σημάτων είναι ιδιαίτερα περίπλοκος, καθώς απαιτεί τη διαχείριση σημάτων που μπορεί να έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιούνται προηγμένες τεχνικές φιλτραρίσματος και προσαρμοστικής ενίσχυσης, οι οποίες επιτρέπουν τη διατήρηση της ποιότητας του σήματος για κάθε λειτουργία. Οι δέκτες αυτοί είναι

σχεδιασμένοι να διαφοροποιούν μεταξύ των σημάτων ανίχνευσης και επικοινωνίας, χρησιμοποιώντας αλγόριθμους ανίχνευσης φάσης και τεχνικές φασματικής απομόνωσης. Αυτή η προσέγγιση διασφαλίζει ότι τα σήματα ανίχνευσης και επικοινωνίας δεν επηρεάζονται από τη συνύπαρξή τους, επιτρέποντας τη λειτουργία των συστημάτων χωρίς απώλεια της απόδοσης.

Οι παρεμβολές είναι μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για τα φυσικά συστήματα συνύπαρξης. Οι παρεμβολές μεταξύ των σημάτων ανίχνευσης και επικοινωνίας μπορούν να μειώσουν την ποιότητα του σήματος και να επηρεάσουν την απόδοση των δεκτών. Για τη μείωση των παρεμβολών, εφαρμόζονται τεχνικές όπως το interference cancellation και το adaptive filtering, που επιτρέπουν στους δέκτες να απομονώνουν τα σήματα ανίχνευσης και επικοινωνίας.

Επιπλέον, η χρήση δυναμικών αλγορίθμων ελέγχου φάσματος και η τεχνολογία cognitive radio επιτρέπουν στους δέκτες να προσαρμόζονται στις μεταβολές του φάσματος και να αποφεύγουν περιοχές με υψηλές παρεμβολές, ενισχύοντας έτσι τη συνολική απόδοση των συστημάτων.

Η interference cancellation είναι μια τεχνική που εφαρμόζεται σε συστήματα επικοινωνίας για τη μείωση ή την εξάλειψη παρεμβολών από σήματα που μοιράζονται το ίδιο μέσο μετάδοσης. Στα π συστήματα multi-antenna systems, όπως τα δίκτυα πολλαπλών εισόδων-πολλαπλών εξόδων (MIMO), και στα πολυ-χρηστικά κανάλια (multi-user channels), αυτό επιτυγχάνεται με συνδυασμό τεχνικών επεξεργασίας σήματος και σχεδιασμού precoding.

Η ακύρωση παρεμβολών υλοποιείται με διάφορες τεχνικές, που περιλαμβάνουν:

α. Χρήση Πολλαπλών Κεραιών

- Οι κεραιές λήψης (receive antennas) αξιοποιούνται για να διαχωρίσουν τα σήματα διαφορετικών χρηστών.
- Χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως η επεξεργασία δέσμης (beamforming), το σήμα κατευθύνεται προς συγκεκριμένους χρήστες ενώ απομονώνεται από άλλους
- β. Σχεδιασμός (Precoding)
- Στα συστήματα μετάδοσης, εφαρμόζεται precoding για να διασφαλιστεί ότι τα σήματα διαφορετικών χρηστών εκπέμπονται σε σχεδόν ορθογώνιες κατευθύνσεις.
- Αυτό μειώνει τις παρεμβολές και επιτρέπει στους δέκτες να αναγνωρίζουν και να αποκωδικοποιούν τα σήματα ανεξάρτητα.

γ. Ανάδραση Καναλιού (Channel Feedback)

- Η γνώση του καναλιού στον πομπό επιτρέπει τη χρήση τεχνικών ακύρωσης όπως η ευθυγράμμιση παρεμβολών (Interference Alignment), που εξασφαλίζει ότι τα σήματα παρεμβολών από διαφορετικούς χρήστες ευθυγραμμίζονται σε ένα περιορισμένο υποχώρο, αφήνοντας καθαρό χώρο για το επιθυμητό σήμα.

δ. Κωδικοποίηση Χώρου-Χρόνου (Space-Time Coding)

- Ειδικά στους MIMO πομπούς, η ορθογώνια σχεδίαση χώρου-χρόνου (Orthogonal Space-Time Block Codes) χρησιμοποιείται για να εξασφαλιστεί ότι τα σήματα παραμένουν ορθογώνια σε κάθε στιγμή.

ε. Ποσοτικοποιημένη Ανάδραση (Quantized Feedback)

- Σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει τέλεια γνώση του καναλιού, οι ποσοτικοποιημένες πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθοδηγήσουν τη σχεδίαση των precoding.

Το adaptive filtering αφορά τεχνικές και συστήματα φιλτραρίσματος που επιτρέπουν στις παραμέτρους των φίλτρων να μεταβάλλονται δυναμικά κατά τη διάρκεια λειτουργίας. Αυτό είναι χρήσιμο όταν οι συνθήκες του περιβάλλοντος αλλάζουν ή όταν η βέλτιστη απόκριση του φίλτρου δεν είναι προκαθορισμένη. Σε αντίθεση με τα κλασικά φίλτρα με σταθερούς συντελεστές, τα προσαρμοστικά φίλτρα προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν το αποτέλεσμα σε πραγματικό χρόνο. ασίζεται σε ένα δυναμικό σύστημα που περιλαμβάνει ένα φίλτρο, έναν επιθυμητό στόχο (desired signal) και μια διαδικασία προσαρμογής για την ελαχιστοποίηση της διαφοράς (σφάλμα) μεταξύ της εξόδου του φίλτρου και του στόχου. Η διαδικασία στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Mean Square Error, MSE), που αντιστοιχεί στη μέση τιμή του τετραγώνου της διαφοράς μεταξύ του επιθυμητού σήματος και της εξόδου. Οι πιο γνωστοί προσαρμοστικοί αλγόριθμοι περιλαμβάνουν τον LMS (Least Mean Squares), που χρησιμοποιεί απλή και σταδιακή προσέγγιση, τον RLS (Recursive Least Squares), που είναι ταχύτερος αλλά πιο σύνθετος, και τον Adaptive Lattice, που εξασφαλίζει φυσική συσχέτιση μεταξύ των σταδίων του φίλτρου.

4.2 Συστήματα Διπλής Λειτουργικότητας (Dual-functional Systems).

Τα συστήματα διπλής λειτουργικότητας είναι αυτά που εκτελούν τόσο τις λειτουργίες ανίχνευσης όσο και επικοινωνίας σε μία μόνο συσκευή ή δέκτη. Η ανάπτυξη αυτών των συστημάτων απαιτεί έναν ιδιαίτερο σχεδιασμό, ώστε οι δύο λειτουργίες να μπορούν να εκτελούνται ταυτόχρονα χωρίς να επηρεάζεται η απόδοση.

Ο σχεδιασμός της αρχιτεκτονικής των συστημάτων διπλής λειτουργικότητας περιλαμβάνει τη χρήση πολλαπλών κεραίων και τη δημιουργία μιας κοινής υποδομής σήματος για την ανίχνευση και την επικοινωνία. Οι δέκτες διπλής λειτουργικότητας είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να κατευθύνουν τα σήματα ανίχνευσης και επικοινωνίας μέσω διαφορετικών καναλιών, επιτρέποντας την αποδοτική χρήση του φάσματος και την εξάλειψη των παρεμβολών.

Η χρήση τεχνικών beamforming και spatial multiplexing επιτρέπει την ταυτόχρονη κατεύθυνση των σημάτων ανίχνευσης και επικοινωνίας, χωρίς να απαιτείται η χρήση ξεχωριστών συσκευών για κάθε λειτουργία. Αυτές οι τεχνικές καθιστούν τα συστήματα διπλής λειτουργικότητας ιδανικά για περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους, όπως οι εφαρμογές IoT και τα έξυπνα δίκτυα.

Η βελτιστοποίηση της επεξεργασίας σήματος είναι κρίσιμη για την αποτελεσματική λειτουργία των συστημάτων διπλής λειτουργικότητας. Οι αλγόριθμοι επεξεργασίας πρέπει να είναι ικανοί να επεξεργάζονται τα σήματα ανίχνευσης και επικοινωνίας ταυτόχρονα, χωρίς να αυξάνεται η υπολογιστική πολυπλοκότητα ή η κατανάλωση ενέργειας.

Οι αλγόριθμοι για τα συστήματα διπλής λειτουργικότητας περιλαμβάνουν τεχνικές όπως το fast Fourier transform (FFT) και το wavelet transform, που επιτρέπουν τη γρήγορη ανάλυση των σημάτων. Επιπλέον, οι τεχνολογίες όπως το software-defined radio (SDR) προσφέρουν τη δυνατότητα προσαρμογής της επεξεργασίας ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος, επιτρέποντας την ευελιξία και τη βελτιστοποίηση των ISAC δεκτών.

Κεφάλαιο 5: Τεχνικές Εξελίξεις και Εφαρμογές στα PMNs.

Η βελτιστοποίηση των σημάτων και η διαμόρφωση δεσμών (beamforming) αποτελούν βασικούς παράγοντες για την επιτυχία των Perceptive Mobile Networks (PMNs), καθώς επιτρέπουν την αποτελεσματική λειτουργία ανίχνευσης και επικοινωνίας. Το beamforming και οι σχετικές τεχνικές βελτιστοποίησης συμβάλλουν στη μεγιστοποίηση της χρήσης των πόρων και στην ελαχιστοποίηση των παρεμβολών μεταξύ των λειτουργιών.

Το beamforming είναι μια τεχνική που χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραίες για τη διαμόρφωση του σχήματος και της κατεύθυνσης του σήματος που μεταδίδεται ή λαμβάνεται. Στα PMNs, το beamforming εξυπηρετεί διπλό σκοπό:

- Βελτίωση της ανίχνευσης: Εστιάζει την ενέργεια προς τους στόχους ανίχνευσης, αυξάνοντας την ακρίβεια και την εμβέλεια.
- Βελτίωση της επικοινωνίας: Ελαχιστοποιεί την παρεμβολή μεταξύ των χρηστών επικοινωνίας (User Equipment - UEs) και ενισχύει την ποιότητα του σήματος.

Η εφαρμογή beamforming στα PMNs είναι πιο πολύπλοκη από ό,τι στα παραδοσιακά συστήματα επικοινωνίας, καθώς απαιτείται να λαμβάνει υπόψη τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σημάτων επικοινωνίας και ανίχνευσης.

Στα PMNs, έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές τεχνικές beamforming, κάθε μία με διαφορετικά πλεονεκτήματα και περιορισμούς.

(α) Zero Forcing (ZF):

Περιγραφή: Το ZF χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση της παρεμβολής μεταξύ των χρηστών επικοινωνίας και των στόχων ανίχνευσης. Δημιουργεί ορθογώνιες δέσμες που αποτρέπουν την υπερβολική ενέργεια σε ανεπιθύμητες κατευθύνσεις.

- *Πλεονεκτήματα:*

1. Αποτελεσματική διαχείριση παρεμβολών.
2. Βελτιώνει την ποιότητα του σήματος στους χρήστες επικοινωνίας.

- *Μειονεκτήματα:*

1. Υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα για δίκτυα με πολλούς χρήστες ή στόχους.
2. Μειωμένη απόδοση σε περιβάλλοντα με πυκνό clutter

(β) Beam Synthesis (B-Syn):

- *Περιγραφή:* Η μέθοδος B-Syn εστιάζει στη μεγιστοποίηση της διαρροής ενέργειας προς τον στόχο ανίχνευσης. Αντί να απομονώνει τις παρεμβολές, σχεδιάζει τις δέσμες ώστε να επιτυγχάνουν υψηλή ανάλυση και ακρίβεια.

- *Πλεονεκτήματα:*

1. Ιδανικό για εφαρμογές ανίχνευσης υψηλής ακρίβειας.
2. Απαιτεί λιγότερους πόρους για την ανίχνευση συγκριτικά με άλλες τεχνικές.

- *Μειονεκτήματα:*

1. Περιορισμένη απόδοση σε περιβάλλοντα με πολλαπλούς στόχους.
2. Μπορεί να μειώσει την αποδοτικότητα επικοινωνίας σε δυναμικά περιβάλλοντα.

(γ) Alternating Optimization (AO):

- *Περιγραφή:* Η AO είναι μια μέθοδος που επιλύει το πρόβλημα βελτιστοποίησης μέσω εναλλαγών μεταξύ του σχεδιασμού πομπού και δέκτη. Προσπαθεί να βελτιώσει την ισορροπία μεταξύ ανίχνευσης και επικοινωνίας.

• *Πλεονεκτήματα:*

1. Προσφέρει τη βέλτιστη ισορροπία απόδοσης μεταξύ ανίχνευσης και επικοινωνίας.
2. Ικανή να προσαρμόζεται σε δυναμικά περιβάλλοντα.

• *Μειονεκτήματα:*

3. Απαιτεί περισσότερη επεξεργαστική ισχύ.
4. Η σύγκλιση μπορεί να είναι αργή σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας.

(δ) Υβριδικό Beamforming:

- *Περιγραφή:* Το υβριδικό beamforming συνδυάζει αναλογική και ψηφιακή επεξεργασία. Εστιάζει στην εξοικονόμηση πόρων και την ενεργειακή αποδοτικότητα.

• *Πλεονεκτήματα:*

1. Χαμηλότερο κόστος υλοποίησης σε σύγκριση με πλήρως ψηφιακά συστήματα.
2. Υψηλή αποδοτικότητα σε περιβάλλοντα χαμηλής παρεμβολής.

• *Μειονεκτήματα:*

2. Περιορισμένη ευελιξία στην προσαρμογή των δεσμών.
3. Χαμηλότερη ακρίβεια ανίχνευσης σε πυκνά περιβάλλοντα.

Η βελτιστοποίηση σημάτων είναι κρίσιμη για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης στα PMNs. Περιλαμβάνει στρατηγικές σχεδίασης σημάτων που υποστηρίζουν τόσο την επικοινωνία όσο και την ανίχνευση.

Διαρροή Ενέργειας (Energy Leakage):

- Τα σήματα επικοινωνίας σχεδιάζονται ώστε να "διαρρέουν" ενέργεια προς τους στόχους ανίχνευσης, αντί να χρησιμοποιούνται ξεχωριστά σήματα για ραντάρ.
- Αυτή η προσέγγιση μειώνει την πολυπλοκότητα και την κατανάλωση πόρων.

Χρήση Ευρυζωνικών Σημάτων:

- Η χρήση σημάτων υψηλής συχνότητας επιτρέπει μεγαλύτερη ακρίβεια στην ανίχνευση.

Ευνοεί τη συνύπαρξη πολλών χρηστών επικοινωνίας χωρίς παρεμβολές.

5.2 Διαχείριση Παρεμβολών στα PMNs.

Η διαχείριση παρεμβολών αποτελεί μια από τις πιο κρίσιμες προκλήσεις για τα Perceptive Mobile Networks (PMNs), καθώς αυτά συνδυάζουν ανίχνευση και επικοινωνία στο ίδιο σύστημα. Η ταυτόχρονη λειτουργία και των δύο αυτών υποσυστημάτων, χρησιμοποιώντας κοινό φάσμα και πόρους, δημιουργεί διάφορους τύπους παρεμβολών που μπορούν να μειώσουν την απόδοση και την ακρίβεια τόσο της ανίχνευσης όσο και της επικοινωνίας.

Οι παρεμβολές στα PMNs μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

(α) Αυτοπαρεμβολή (Self-Interference - SI):

- *Περιγραφή:* Στην αρχιτεκτονική Mono-Static DFRC, οι σταθμοί βάσης (BS) λειτουργούν ως πομποί και δέκτες ταυτόχρονα, προκαλώντας αυτοπαρεμβολή, δηλαδή η ισχύς του εξερχόμενου σήματος επηρεάζει το λαμβανόμενο σήμα.

- *Προβλήματα:*

1. Μειωμένη ευαισθησία του δέκτη.
2. Επηρεασμένη ανάλυση των ανακλώμενων σημάτων (echoes), που είναι κρίσιμη για την ανίχνευση στόχων.

- *Λύσεις:*

- A. Τεχνικές Ακύρωσης SI: Χρήση φίλτρων ακύρωσης όπως Adaptive Filters ή Recursive Least Squares (RLS), που μειώνουν την ισχύ της αυτοπαρεμβολής σε πραγματικό χρόνο.
- B. Διαχωρισμός Πομπού-Δέκτη: Αρχιτεκτονικές όπως οι PMN-RRU και PMN-TMT αποφεύγουν την αυτοπαρεμβολή, διαχωρίζοντας γεωγραφικά τον πομπό από τον δέκτη.

(β) Παρεμβολές Ενδοσυστήματος (Intra-System Interference):

- *Περιγραφή:* Οι παρεμβολές που δημιουργούνται μεταξύ των λειτουργιών ανίχνευσης και επικοινωνίας, καθώς τα σήματα χρησιμοποιούν το ίδιο φάσμα ή πόρους.

- *Προβλήματα:*

- ο Τα σήματα επικοινωνίας μπορεί να λειτουργήσουν ως clutter για τα σήματα ανίχνευσης.
- ο Οι ακτίνες (beams) που προσανατολίζονται σε στόχους ανίχνευσης μπορεί να επηρεάσουν τους χρήστες επικοινωνίας.

- *Λύσεις:*

- Beamforming: Τεχνικές όπως το Zero Forcing (ZF) απομονώνουν τα σήματα επικοινωνίας και ανίχνευσης μέσω κατευθυντικών δεσμών.

Δυναμική Κατανομή Πόρων: Εφαρμογή αλγορίθμων που κατανέμουν πόρους (εύρος ζώνης, ισχύς) ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε λειτουργίας

(γ) Παρεμβολές Περιβάλλοντος (Environmental Interference):

- *Περιγραφή:* Τα σήματα που ανακλώνται από το περιβάλλον (clutter) μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την ακρίβεια της ανίχνευσης.
- *Προβλήματα:*
 - Το clutter μειώνει την ευκρίνεια των στόχων που ανιχνεύονται.
 - Η δυναμική φύση του περιβάλλοντος (π.χ. κινούμενα αντικείμενα) επιδεινώνει το πρόβλημα.
- *Λύσεις:*
 - Εκτίμηση Περιβάλλοντος (Environment Estimation): Χρήση περιόδων εκτίμησης (environment estimation periods) για την ανάλυση του clutter και την προσαρμογή της ανίχνευσης.

Μηχανική Μάθηση: Αξιοποίηση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης (machine learning) για την αναγνώριση και καταστολή των clutter σημάτων.

5.2.2 Τεχνικές Διαχείρισης Παρεμβολών.

Η διαχείριση παρεμβολών στα PMNs επιτυγχάνεται μέσω μιας σειράς τεχνικών που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων επιπτώσεων.

(α) Προσαρμοστικές Τεχνικές Ακύρωσης Παρεμβολών:

- Χρήση Adaptive Filtering για την ακύρωση των ανεπιθύμητων σημάτων σε πραγματικό χρόνο.
- Προσαρμοστική Προσαρμογή Δεσμών (Beam Adaptation):
- Οι δεσμοί προσαρμόζονται δυναμικά ώστε να αποφεύγουν περιοχές υψηλής παρεμβολής.
- Εφαρμογή υβριδικού beamforming για εξοικονόμηση πόρων

(β) Χρήση Πρωτοκόλλων Διπλής Στάσης:

- Περιγραφή: Χωρίζει τον χρόνο λειτουργίας σε δύο φάσεις:
- Φάση Εκτίμησης Περιβάλλοντος (Environment Estimation Period): Ο σταθμός βάσης συλλέγει δεδομένα για το clutter.
- Φάση Ανίχνευσης Στόχου (Target Sensing Period): Τα δεδομένα από την πρώτη φάση χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση στόχων, λαμβάνοντας υπόψη το clutter.
- Πλεονεκτήματα: Αυτή η προσέγγιση βελτιώνει την ακρίβεια ανίχνευσης μειώνοντας τις περιβαλλοντικές παρεμβολές

(γ) Συνδυαστική Χρήση Δεσμών και Φάσματος:

- Multi-Beam Transmission: Ταυτόχρονη χρήση πολλαπλών δεσμών για την εξυπηρέτηση τόσο των λειτουργιών επικοινωνίας όσο και των λειτουργιών ανίχνευσης.
- Dynamic Spectrum Allocation: Δυναμική προσαρμογή της κατανομής φάσματος ανάλογα με τις τρέχουσες συνθήκες και απαιτήσεις.

5.3 Συνεργατική Ανίχνευση στα PMNs.

Η συνεργατική ανίχνευση (Collaborative Sensing) είναι ένας από τους βασικούς μηχανισμούς που καθιστούν τα Perceptive Mobile Networks (PMNs) ιδιαίτερα αποδοτικά και ευέλικτα σε σύνθετα περιβάλλοντα. Βασίζεται στην ανταλλαγή και συλλογή δεδομένων από πολλαπλούς κόμβους ανίχνευσης, όπως σταθμοί βάσης (Base Stations - BSs), τερματικά παρακολούθησης στόχων (Target Monitoring Terminals - TMTs), και απομακρυσμένες ραδιομονάδες (Remote Radio Units - RRUs). Η συνεργατική ανίχνευση ενισχύει την ακρίβεια, την απόδοση και την ανθεκτικότητα των PMNs σε δυναμικά περιβάλλοντα. Εκμεταλλεύεται την κατανομημένη φύση των κόμβων στα PMNs, συνδυάζοντας δεδομένα από πολλαπλές πηγές για τη δημιουργία μιας ενιαίας εικόνας του περιβάλλοντος. Οι κόμβοι ανίχνευσης, οι οποίοι είναι διασυνδεδεμένοι μέσω ενός κεντρικού ή κατανομημένου συστήματος, μοιράζονται πληροφορίες όπως:

- Τις γωνίες αντανάκλασης.
- Τις αποστάσεις στόχων.
- Τη σχετική κίνηση ή ταχύτητα στόχων

Αυτός ο συνδυασμός δεδομένων βοηθά στη βελτίωση της ακρίβειας ανίχνευσης, μειώνοντας τα σφάλματα που μπορεί να προκύψουν από μεμονωμένους κόμβους

Η συνεργατική ανίχνευση στα PMNs παρέχει τα εξής πλεονεκτήματα:

1. Ακρίβεια και Αξιοπιστία:

- ο Οι πολλαπλές προοπτικές από διαφορετικούς κόμβους μειώνουν την πιθανότητα λανθασμένων ανιχνεύσεων και αυξάνουν την ανάλυση του περιβάλλοντος.

Η συνεργασία μεταξύ κόμβων μπορεί να εξαλείψει τα φαινόμενα clutter ή θορύβου που μπορεί να προκύψουν από μεμονωμένα σήματα

2. Εκτεταμένη Κάλυψη:

- ο Οι κόμβοι είναι διασκορπισμένοι γεωγραφικά, προσφέροντας ανίχνευση σε μεγαλύτερη περιοχή.
- ο Οι κατανεμημένες μονάδες ανίχνευσης (TMTs) μπορούν να καλύψουν τυφλές γωνίες ή περιοχές που βρίσκονται εκτός της εμβέλειας ενός μεμονωμένου σταθμού βάσης.

3. Δυναμική Προσαρμοστικότητα:

- ο Σε δυναμικά περιβάλλοντα, όπως η αυτόνομη οδήγηση, η συνεργατική ανίχνευση επιτρέπει στους κόμβους να προσαρμόζονται γρήγορα σε αλλαγές, όπως η κίνηση στόχων ή η αλλαγή των περιβαλλοντικών συνθηκών.

4. Μείωση Ενεργειακής Κατανάλωσης:

Αντί να λειτουργούν όλοι οι κόμβοι συνεχώς, η συνεργατική ανίχνευση επιτρέπει την ενεργοποίηση μόνο των απαραίτητων κόμβων, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας.

5.3.2 Βασικές Τεχνικές Συνεργατικής Ανίχνευσης.

Για να επιτευχθεί η συνεργατική ανίχνευση στα PMNs, απαιτούνται προηγμένες τεχνικές και πρωτόκολλα:

α) Ανταλλαγή Δεδομένων (Data Fusion):

- Οι κόμβοι συλλέγουν δεδομένα από τις ανιχνεύσεις τους και τα αποστέλλουν σε έναν κεντρικό κόμβο ή ένα κατανεμημένο σύστημα για ενοποίηση.
- Οι τεχνικές συγχώνευσης δεδομένων περιλαμβάνουν:
 - ο Bayesian Fusion: Ενσωμάτωση δεδομένων με βάση πιθανοτικά μοντέλα.
 - ο Kalman Filtering: Δυναμική συγχώνευση δεδομένων για την πρόβλεψη της κίνησης των στόχων.

- (β) Κατανεμημένη Ανίχνευση (Distributed Sensing):
- Σε περιβάλλοντα με μεγάλη γεωγραφική έκταση, οι κόμβοι λειτουργούν αυτόνομα, λαμβάνοντας αποφάσεις τοπικά.
- Ορισμένοι κόμβοι λειτουργούν ως cluster heads, συλλέγοντας δεδομένα από γειτονικούς κόμβους και διαβιβάζοντάς τα στο κεντρικό σύστημα.

(γ) Συγχρονισμός Δικτύου (Network Synchronization):

- Ο συγχρονισμός είναι κρίσιμος για την ακριβή ανίχνευση και την αποφυγή παρεμβολών.
- Οι τεχνικές συγχρονισμού περιλαμβάνουν:
 - GPS-based Synchronization: Χρήση δορυφόρων για ακριβή χρονική ευθυγράμμιση.
 - Precision Time Protocol (PTP): Τοπικός συγχρονισμός με ακρίβεια σε επίπεδο χιλιοστού του δευτερολέπτου.

(δ) Δυναμική Κατανομή Πόρων (Dynamic Resource Allocation):

- Οι κόμβοι προσαρμόζουν την κατανάλωση πόρων, όπως εύρος ζώνης και ισχύς μετάδοσης, ανάλογα με τις απαιτήσεις ανίχνευσης.

Η συνεργατική ανίχνευση στα PMNs βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς τομείς:

1. Αυτόνομη Οδήγηση:

- Τα PMNs συνεργάζονται με αισθητήρες LIDAR και radar για την ακριβή παρακολούθηση εμποδίων και πεζών.
- Η συνεργατική ανίχνευση επιτρέπει την ανίχνευση τυφλών σημείων και τη δημιουργία δυναμικών χαρτών σε πραγματικό χρόνο.

2. Βιομηχανικό Διαδίκτυο Πραγμάτων (Industrial IoT):

- Σε εργοστάσια, οι κόμβοι συνεργάζονται για την παρακολούθηση εξοπλισμού και περιβαλλοντικών παραμέτρων.
- Η συνεργασία των κόμβων μειώνει την πιθανότητα βλαβών και αυξάνει την παραγωγικότητα.

3. Δημόσια Ασφάλεια:

- Κατά τη διάρκεια καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, όπως φυσικές καταστροφές, οι κόμβοι συνεργάζονται για την εντοπισμό ατόμων και την αποστολή πληροφοριών σε ομάδες διάσωσης.
- Τα PMNs επιτρέπουν την ταχεία αναγνώριση και παρακολούθηση ύποπτων κινήσεων σε αστικές περιοχές.

Κεφάλαιο 6 : Εισαγωγή στις RIS-Υποστηριζόμενες Ενσωματωμένες Λειτουργίες Ανίχνευσης και Επικοινωνίας (RIS-Enabled ISAC).

6.1 Βασικές Αρχές

Η ανάπτυξη των δικτύων 6G επιφέρει νέες απαιτήσεις για ολοκληρωμένες και πολυλειτουργικές λύσεις που υποστηρίζουν ταυτόχρονα επικοινωνία και ανίχνευση, επιτρέποντας τη δημιουργία ενός δυναμικού και έξυπνου περιβάλλοντος που ενσωματώνει το Internet of Things (IoT), την επαυξημένη πραγματικότητα (AR), και την αυτόνομη κίνηση. Σε αυτό το πλαίσιο, οι RIS παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την τεχνολογία ISAC, καθώς προσφέρουν ένα τρόπο ελέγχου του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος, καθιστώντας δυνατή τη δυναμική αλλαγή της πορείας των σημάτων χωρίς την ανάγκη ενεργητικής εκπομπής από τους ίδιους τους ανακλαστήρες.

Οι RIS αποτελούνται από εξαιρετικά λεπτά και χαμηλής κατανάλωσης ηλεκτρονικά πλαίσια, που είναι επενδεδυμένα με ελεγχόμενα ανακλαστικά στοιχεία (μετα-επιφάνειες). Αυτά τα στοιχεία μπορούν να διαμορφώνουν την ανάκλαση, τη διάχυση ή τη διάθλαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, κατευθύνοντας τα σήματα προς συγκεκριμένες κατευθύνσεις ή διαμορφώνοντας την πορεία τους έτσι ώστε να επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση του σήματος στο επιθυμητό σημείο. Η RIS τεχνολογία επιτρέπει την προσαρμογή της μετάδοσης και της λήψης σήματος σε περιβάλλοντα με υψηλές απαιτήσεις, όπως είναι οι αστικοί κόμβοι και οι εσωτερικοί χώροι με πολυάριθμα εμπόδια.

Η ενσωμάτωση ανίχνευσης και επικοινωνίας σε μία ενιαία πλατφόρμα προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, αλλά συνοδεύεται από πολυάριθμες προκλήσεις. Ένας από τους κύριους στόχους είναι να ελαχιστοποιηθεί η χρήση φάσματος και ενέργειας, καθώς και να επιτευχθεί ακριβής ανίχνευση και γρήγορη επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο. Η τεχνολογία είναι σε θέση να ανιχνεύει αντικείμενα, να εκτιμά την ταχύτητά τους και να υπολογίζει την απόστασή τους, διατηρώντας παράλληλα ποιοτική επικοινωνία. Ωστόσο, οι προκλήσεις περιλαμβάνουν:

- Περιορισμένη απόσταση και υψηλή ευαισθησία σε παρεμβολές: Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται για ακριβή ανίχνευση, όπως οι mmWave και THz, παρουσιάζουν υψηλές απώλειες διαδρομής και ευαισθησία σε φυσικά εμπόδια, γεγονός που απαιτεί τεχνολογίες όπως οι RIS για την ενίσχυση του σήματος.
- Απαιτήση για υψηλή ακρίβεια και σταθερότητα σήματος: Σε περιπτώσεις όπως η αυτόνομη οδήγηση ή η παρακολούθηση ζωτικών σημείων, είναι απαραίτητη η ακρίβεια και η αξιοπιστία του συστήματος ISAC, κάτι που συχνά απαιτεί τη

συνεργασία με άλλες τεχνολογίες, όπως η τεχνητή νοημοσύνη (AI) και οι εξελιγμένες τεχνικές επεξεργασίας σήματος

6.2 Τεχνολογίες Επεξεργασίας Σήματος για RIS-Enabled ISAC.

6.2.1 Απόκτηση Πληροφοριών Γωνίας (AoA):

Η τεχνολογία RIS επιτρέπει την εκμετάλλευση της πληροφορίας γωνίας άφιξης (AoA), καθιστώντας δυνατή την ακριβή ανίχνευση θέσης σε πολυκαναλικά περιβάλλοντα. Η AoA πληροφορία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της γωνίας με την οποία φθάνει ένα σήμα σε ένα συγκεκριμένο σημείο λήψης, επιτρέποντας την τοποθέτηση και την κατηγοριοποίηση των στόχων με ακρίβεια.

Η εκτίμηση της AoA ενισχύεται με τη χρήση RIS, καθώς τα ανακλαστικά στοιχεία μπορούν να προσαρμόσουν τις γωνίες ανάκλασης ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη απόδοση στη λήψη σήματος. Η τεχνολογία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε εφαρμογές παρακολούθησης και ασφάλειας, όπου απαιτείται ακρίβεια στον προσδιορισμό της θέσης ενός κινούμενου αντικειμένου.

6.2.2 Εκτίμηση Καθυστέρησης και Doppler:

Η εκτίμηση καθυστέρησης και η ανάλυση Doppler είναι κρίσιμες για την παρακολούθηση της ταχύτητας και της θέσης των αντικειμένων, ιδιαίτερα σε δυναμικά περιβάλλοντα όπως είναι η κυκλοφορία στους δρόμους και τα αεροδρόμια. Ενισχύουν την εκτίμηση αυτών των παραμέτρων μέσω της προσαρμογής των χαρακτηριστικών τους, επιτρέποντας τον υπολογισμό των διαδρομών πολλαπλών σημάτων και τη μείωση της καθυστέρησης του σήματος.

Η ικανότητα των RIS να προσαρμόζουν την κατεύθυνση των σημάτων σε πραγματικό χρόνο βελτιώνει την ποιότητα της ανίχνευσης σε σύνθετα περιβάλλοντα και επιτρέπει την εκτίμηση των ταχυτήτων με ακρίβεια, βελτιώνοντας έτσι τις δυνατότητες εντοπισμού στόχων και την παρακολούθηση αντικειμένων.

6.3 : Τεχνικές Σχεδιασμού και Βελτιστοποίησης των RIS

Ο σχεδιασμός των RIS απαιτεί τη λεπτομερή κατανόηση των αρχών λειτουργίας τους και των αναγκών σε επίπεδο υλικού και λογισμικού. Βασίζονται σε μετα-επιφάνειες με δυνατότητα ελέγχου, οι οποίες αποτελούνται από πλήθος επαναδιαμορφώσιμων στοιχείων που μπορούν να προσαρμόζουν την ανάκλαση ή τη διάθλαση των σημάτων με ελεγχόμενο τρόπο. Κάθε στοιχείο λειτουργεί ως ένας ανακλαστήρας φάσης που μπορεί να ρυθμιστεί, ώστε να προσαρμόζει τη γωνία και την ένταση του ανακλώμενου σήματος για να επιτυγχάνεται ο επιθυμητός σκοπός.

Σημαντικές τεχνικές πτυχές που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό των RIS περιλαμβάνουν:

- Έλεγχος φάσης και κατεύθυνσης: Η ρύθμιση της φάσης και της γωνίας κάθε στοιχείου είναι κρίσιμη για την ακριβή κατεύθυνση του σήματος, καθώς και για τη μείωση των παρεμβολών. Ο έλεγχος αυτός επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής εξειδικευμένων αλγορίθμων που καθοδηγούν τη φάση του κάθε στοιχείου.

Για τη μετατόπιση φάσης έχουμε:

- ο *Συνάρτηση Παραγωγής Στιγμών (MGF)*: Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την παραγωγή της πρώτης έκφρασης του εργοδικού συνολικού ρυθμού, αξιοποιώντας τις ιδιότητες των καναλιών εξασθένησης Rician για να ληφθούν υπόψη τα μη γραμμικά και γραμμικά συστατικά του σήματος.
 - ο *Ανισότητα του Jensen*: Η δεύτερη μέθοδος απλοποιεί την έκφραση του συνολικού ρυθμού χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση, προσφέροντας μια πιο απλή λύση για βελτιστοποίηση.
- Ενεργειακή απόδοση: Δεδομένου ότι οι επιφάνειες είναι σχεδιασμένες για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι ενεργειακά αποδοτικοί, ελαχιστοποιώντας τις απαιτήσεις ισχύος, ενώ παράλληλα μεγιστοποιούν την απόδοση του συστήματος.

Για τη ενεργειακή απόδοση – κατανομή ισχύος

- Ισχύς για το κοινό μήνυμα: Σχεδιασμένη να μεγιστοποιεί την απόδοση του συστήματος συνολικά, προς όφελος όλων των χρηστών.
- Ισχύς για τα ιδιωτικά μηνύματα: Κατανέμεται ειδικά σε μεμονωμένους χρήστες για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών και τη διασφάλιση αξιοπιστίας επικοινωνίας.

Τα συστήματα RIS επηρεάζονται και από παράγοντες όπως είναι :

- Τοποθεσία του RIS: Η φυσική τοποθέτηση του RIS σε σχέση με τους σταθμούς βάσης και τους χρήστες έχει σημαντική επίδραση στον συνολικό ρυθμό. Ένα

RIS που βρίσκεται κοντά στους χρήστες βελτιώνει την ισχύ και την ποιότητα του σήματος.

- Αριθμός Στοιχείων του RIS: Η αύξηση του αριθμού των στοιχείων του RIS ενισχύει την ικανότητα του συστήματος να ανακλά και να κατευθύνει τα σήματα βέλτιστα, οδηγώντας σε υψηλότερους συνολικούς ρυθμούς.
- Αριθμός Κεραιών του Σταθμού Βάσης: Όσο περισσότερες κεραίες έχει ένας σταθμός βάσης, τόσο καλύτερα μπορεί να διαχειριστεί τις παρεμβολές μεταξύ χρηστών, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με το RSMA και το RIS.

Η λειτουργία απαιτεί τη χρήση εξειδικευμένων αλγορίθμων που επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση του σήματος για διαφορετικές εφαρμογές. Οι αλγόριθμοι αυτοί περιλαμβάνουν:

- Αλγόριθμοι προσαρμοστικού beamforming: Αυτοί οι αλγόριθμοι ελέγχουν τη δέσμη των σημάτων, διασφαλίζοντας ότι η ισχύς του σήματος εστιάζεται σε συγκεκριμένες περιοχές. Το beamforming είναι κρίσιμο για τη μείωση των απωλειών και των παρεμβολών σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας, όπως τα αστικά κέντρα.
- Αλγόριθμοι φιλτραρίσματος πολλαπλών διαδρομών: Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση του φαινομένου της πολλαπλής διαδρομής (multipath), το οποίο προκαλεί παρεμβολές και καθυστερήσεις. Το φιλτράρισμα πολλαπλών διαδρομών επιτρέπει τη λήψη του σήματος από την πιο βέλτιστη διαδρομή, διασφαλίζοντας τη σταθερότητα της σύνδεσης.
- Αλγόριθμοι δυναμικής κατανομής πόρων: Αυτοί οι αλγόριθμοι προσαρμόζουν τη χρήση του φάσματος και των διαθέσιμων πόρων ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου, επιτρέποντας ταυτόχρονη υποστήριξη πολλαπλών χρηστών και εφαρμογών ISAC.

Βάση των παραπάνω καταλαβαίνουμε ότι για να σχεδιάσης ένα σύστημα ISAC με RIS δεν χρειάζεται να λάβουμε υπ όψην μόνο τα τεχνικά θέματα όπως αλγόριθμοι , υλικά , σχεδίαση αλλά χρειάζεται να έχουμε μια ευρύτερη εικόνα του περιβάλλοντος και προσομοίωσης ώστε να πετύχουμε την βέλτιστη λύση .

Κεφάλαιο 7: Συχνότητες και Ασύρματα Συστήματα Millimeter Wave (mmWave) και Terahertz (THz):

Οι mmWave συχνότητες, οι οποίες κυμαίνονται από 30 έως 300 GHz, προσφέρουν πολλές δυνατότητες για την ανάπτυξη ασύρματων δικτύων υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης, οι mmWave συχνότητες χρησιμοποιούνται για την ταυτόχρονη ανίχνευση και επικοινωνία, καθώς παρέχουν επαρκή εύρος ζώνης για τη μετάδοση δεδομένων και βελτιώνουν την ακρίβεια της ανίχνευσης.

Τετοιες συχνότητες παρέχουν υψηλή χωρητικότητα και μπορούν να υποστηρίξουν τη μετάδοση δεδομένων με ταχύτητες που πλησιάζουν ή ξεπερνούν το 1 Gbps. Αυτό τις καθιστά ιδανικές για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη μετάδοση δεδομένων, όπως οι αυτόνομες οδήγησης και τα δίκτυα 5G. Στα ISAC συστήματα, αυτή η υψηλή ταχύτητα επιτρέπει τη διαχείριση μεγάλων όγκων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, βελτιώνοντας την απόκριση και την ακρίβεια της ανίχνευσης.

Επιπλέον, η υψηλή χωρητικότητα των mmWave συχνοτήτων επιτρέπει τη χρήση των συστημάτων σε περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα συσκευών, όπως οι έξυπνες πόλεις και τα έξυπνα εργοστάσια, όπου απαιτείται ταυτόχρονη επικοινωνία και ανίχνευση από πολλαπλές συσκευές. Παρά τα πλεονεκτήματα της υψηλής χωρητικότητας, οι mmWave συχνότητες έχουν περιορισμένη εμβέλεια, καθώς τα σήματα εξασθενούν γρήγορα κατά τη διάδοσή τους. Η εξασθένιση αυτή οφείλεται στην απορρόφηση των σημάτων από τα φυσικά εμπόδια και την ατμόσφαιρα, γεγονός που μπορεί να περιορίσει την απόδοση των συστημάτων σε αστικά περιβάλλοντα με πολλά εμπόδια. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, εφαρμόζουν τεχνικές beamforming και αναμετάδοσης σημάτων για την ενίσχυση της εμβέλειας και την αποφυγή των παρεμβολών. Επίσης, η χρήση πολλαπλών σταθμών βάσης μπορεί να βελτιώσει την κάλυψη των mmWave συχνοτήτων, εξασφαλίζοντας την αδιάλειπτη μετάδοση των δεδομένων.

7.2 Χαρακτηριστικά και Προκλήσεις THz Συχνοτήτων:

Οι THz συχνότητες, που καλύπτουν το φάσμα από 0,3 έως 10 THz, βρίσκονται σε ένα νέο και ανεξερεύνητο φάσμα που προσφέρει σημαντικές δυνατότητες. Αυτές οι συχνότητες επιτρέπουν την εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας μετάδοση δεδομένων και την ανίχνευση με εξαιρετική ανάλυση. Παρά τα πλεονεκτήματά τους, η χρήση των THz συχνοτήτων αντιμετωπίζει πολλαπλές προκλήσεις που σχετίζονται με την εξασθένιση του σήματος και την ανάπτυξη του κατάλληλου υλικού.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των THz συχνοτήτων είναι η ικανότητά τους να προσφέρουν ακριβή ανίχνευση και υψηλή ανάλυση. Τα σήματα THz έχουν πολύ μικρότερο μήκος κύματος σε σύγκριση με τα σήματα mmWave, επιτρέποντας την ανίχνευση μικρότερων αντικειμένων και τη λεπτομερή απεικόνιση του περιβάλλοντος. Αυτή η δυνατότητα καθιστά τις THz συχνότητες ιδανικές για εφαρμογές που απαιτούν λεπτομερή χαρτογράφηση, όπως η βιομηχανική ανίχνευση και η ασφάλεια.

Ωστόσο, η ακριβής ανίχνευση με THz συχνότητες απαιτεί υψηλής ακρίβειας δέκτες και πομποδέκτες, καθώς και τη χρήση ειδικών αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος για την ανάλυση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Η εξασθένιση του σήματος είναι πιο έντονη στις THz συχνότητες, γεγονός που περιορίζει την εμβέλεια των συστημάτων και απαιτεί τη χρήση εξελιγμένου υλικού για την ενίσχυση του σήματος. Η εξασθένιση προκαλείται από την απορρόφηση των σημάτων από την ατμόσφαιρα και τους φυσικούς φραγμούς, κάτι που επηρεάζει σημαντικά την απόδοση.

Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη νέων υλικών και εξειδικευμένων συσκευών, όπως πομποδέκτες THz και δέκτες υψηλής απόδοσης. Η χρήση μεταϋλικών (metamaterials) και νανοϋλικών μπορεί να βελτιώσει την απόδοση των THz συστημάτων, επιτρέποντας την καλύτερη διαχείριση των σημάτων και την ενίσχυση της εμβέλειας.

Η επιλογή μεταξύ των mmWave και THz συχνοτήτων εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής και τις ιδιαιτερότητες του περιβάλλοντος. Οι mmWave συχνότητες προσφέρουν καλύτερη εμβέλεια και είναι πιο ανθεκτικές στις εξωτερικές παρεμβολές, ενώ οι THz συχνότητες παρέχουν καλύτερη ανάλυση και λεπτομερέστερη ανίχνευση. Οι mmWave συχνότητες είναι κατάλληλες για εφαρμογές όπου η ταχύτητα μετάδοσης και η αξιοπιστία είναι πρωταρχικές ανάγκες, όπως στα δίκτυα 5G και στις εφαρμογές έξυπνης πόλης. Η καλύτερη εμβέλεια των mmWave συχνοτήτων και η αντοχή τους σε περιβάλλοντα με φυσικούς φραγμούς τις καθιστά ιδανικές για ευρύτερη κάλυψη και για εφαρμογές που απαιτούν σταθερή επικοινωνία.

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, οι mmWave συχνότητες έχουν περιορισμένη ανάλυση σε σύγκριση με τις THz συχνότητες, κάτι που τις καθιστά λιγότερο κατάλληλες για εφαρμογές ακριβούς ανίχνευσης. Ωστόσο, για εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερη κάλυψη και ευελιξία, οι mmWave συχνότητες αποτελούν τη βέλτιστη επιλογή.

Οι THz συχνότητες προσφέρουν εξαιρετική ανάλυση και δυνατότητα ανίχνευσης μικροσκοπικών λεπτομερειών, καθιστώντας τις ιδανικές για εφαρμογές που απαιτούν λεπτομερή απεικόνιση και υψηλή ακρίβεια, όπως η ιατρική απεικόνιση, η ασφάλεια και η βιομηχανική παρακολούθηση. Η χρήση των THz συχνοτήτων επιτρέπει την καλύτερη ανάλυση του περιβάλλοντος, αλλά αντιμετωπίζει σοβαρά προβλήματα εξασθένισης και περιορισμένης εμβέλειας.

Λόγω της υψηλής απορρόφησης και εξασθένισης, οι THz συχνότητες είναι πιο αποτελεσματικές σε μικρές αποστάσεις και σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα. Η περιορισμένη εμβέλειά τους αποτελεί εμπόδιο για εφαρμογές ευρείας κάλυψης, και ως εκ τούτου, η χρήση τους είναι πιο αποτελεσματική για εφαρμογές που απαιτούν ακρίβεια σε μικρές αποστάσεις.

Κεφάλαιο 8: Ασύρματα Αισθητήρια με WiFi, 4G, και 5G Δίκτυα.

Η ασύρματη ανίχνευση μέσω δικτύων WiFi, 4G και 5G αποτελεί έναν ταχέως αναπτυσσόμενο τομέα που συνδυάζει τις δυνατότητες επικοινωνίας αυτών των δικτύων με την ανίχνευση αντικειμένων και την παρακολούθηση δραστηριοτήτων. Η εξέλιξη των δικτύων επικοινωνίας επιτρέπει τη χρήση των υπαρχουσών υποδομών για τη συλλογή πληροφοριών που αφορούν το περιβάλλον, όπως η ανίχνευση κίνησης και η αναγνώριση συμπεριφορών, ενισχύοντας τις δυνατότητες των εφαρμογών IoT και των έξυπνων πόλεων. Η ασύρματη αισθητήρια τεχνολογία χρησιμοποιεί τα υπάρχοντα ασύρματα δίκτυα για να συλλέγει πληροφορίες από το περιβάλλον και να ανιχνεύει δραστηριότητες, θέσεις και συμπεριφορές. Τα WiFi, 4G και 5G δίκτυα παρέχουν τα βασικά χαρακτηριστικά που επιτρέπουν την ακριβή και ταυτόχρονη ανίχνευση και επικοινωνία, μετατρέποντας τις δικτυακές υποδομές σε αισθητήρια συστήματα.

Το 5G, με τις υψηλές ταχύτητες και τη χαμηλή καθυστέρηση, προσφέρει νέες δυνατότητες για την ασύρματη ανίχνευση σε πραγματικό χρόνο. Τα WiFi και 4G δίκτυα συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές ανίχνευσης, όπως η αναγνώριση δραστηριότητας και η παρακολούθηση αντικειμένων, αξιοποιώντας τις δυνατότητές τους για την ανάλυση των σημάτων με χαμηλό κόστος και ευρεία κάλυψη.

Η τεχνολογία Channel State Information (CSI) διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στην ασύρματη ανίχνευση, καθώς προσφέρει δεδομένα σχετικά με την κατάσταση του καναλιού επικοινωνίας. Η CSI παρέχει πληροφορίες που αφορούν τις παραμέτρους διάδοσης του σήματος, όπως η απόσταση, οι παρεμβολές και τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος. Αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και την αναγνώριση αντικειμένων, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει άμεση οπτική επαφή. Το Channel State Information (CSI) είναι μια θεμελιώδης έννοια στις ασύρματες επικοινωνίες, η οποία περιγράφει τα φυσικά χαρακτηριστικά του καναλιού επικοινωνίας μεταξύ ενός πομπού και ενός δέκτη. Η γνώση του CSI επιτρέπει την προσαρμοστική διαχείριση των πόρων, τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του φάσματος και την αύξηση της αξιοπιστίας της επικοινωνίας. Στο κεφάλαιο αυτό, διερευνώνται σε βάθος οι μέθοδοι απόκτησης, οι αλγόριθμοι επεξεργασίας, οι προκλήσεις και οι μελλοντικές εφαρμογές του CSI.

Αυτή η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση της κίνησης των χρηστών και τον προσδιορισμό της θέσης τους. Η ανάλυση των παραμέτρων της CSI επιτρέπει τον εντοπισμό μικρών μεταβολών στο περιβάλλον, οι οποίες μπορούν να αντιστοιχηθούν σε συγκεκριμένες κινήσεις ή θέσεις. Αυτή η δυνατότητα είναι πολύτιμη για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια, όπως η αυτόνομη οδήγηση και η παρακολούθηση της ασφάλειας.

Το CSI μπορεί να διαχωριστεί σε δύο επίπεδα:

1. Instantaneous CSI: Περιλαμβάνει λεπτομέρειες για την άμεση κατάσταση του καναλιού σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, απαραίτητο για εφαρμογές όπως το beamforming.

2. Statistical CSI: Ενσωματώνει στατιστικά στοιχεία μακροχρόνιας εκτίμησης, όπως η μέση ισχύς σήματος και ο θόρυβος.

Η ακριβής ταξινόμηση και χρήση του CSI εξαρτάται από τον τύπο της επικοινωνίας, το προφίλ του χρήστη και την κίνηση δεδομένων στο δίκτυο.

Επιπλέον οι μέθοδοι εκτίμησης του είναι οι εξής :

- Pilots/Reference Signals: Η χρήση προκαθορισμένων σημάτων αναφοράς.
- Least Squares (LS) και Minimum Mean Square Error (MMSE) εκτιμητές: Βελτιώνουν την ακρίβεια εκτίμησης με ελάχιστο θόρυβο.
- Kalman Filtering: Για παρακολούθηση και πρόβλεψη του καναλιού σε περιβάλλοντα με υψηλή κινητικότητα.

Η ασύρματη ανίχνευση με τη χρήση WiFi, 4G και 5G προσφέρει πολυάριθμες εφαρμογές, οι οποίες ποικίλλουν από την αναγνώριση δραστηριότητας έως την παρακολούθηση του χώρου. Ορισμένες χαρακτηριστικές περιπτώσεις χρήσης περιλαμβάνουν:

- Αναγνώριση Δραστηριότητας: Η ασύρματη ανίχνευση χρησιμοποιείται για την αναγνώριση της ανθρώπινης δραστηριότητας, όπως η κίνηση ή οι αλλαγές στη θέση, χωρίς την ανάγκη για ειδικές συσκευές. Αυτή η δυνατότητα είναι πολύτιμη για εφαρμογές υγείας και ασφάλειας.
- Ανίχνευση Θέσης και Παρακολούθηση Κίνησης: Η χρήση των δικτύων WiFi, 4G και 5G για την ανίχνευση της θέσης και της κίνησης αντικειμένων ή χρηστών διευκολύνει τη διαχείριση των χώρων, ιδίως σε βιομηχανικούς ή εμπορικούς χώρους.

Ασφάλεια και Παρακολούθηση: Τα δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση απειλών ή την παρακολούθηση εισόδων σε κρίσιμες εγκαταστάσεις, ενισχύοντας την ασφάλεια με τη χρήση μη παρεμβατικών μεθόδων.

Κεφάλαιο 9: Εισαγωγή στα Δίκτυα Αντίληψης για Κινητές Συσκευές (Perceptive Mobile Networks - PMNs).

Τα Δίκτυα Αντίληψης για Κινητές Συσκευές (PMNs) αποτελούν μια πρωτοποριακή εξέλιξη στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών, ενσωματώνοντας ικανότητες ανίχνευσης στο υπάρχον δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Αυτή η ενσωμάτωση βασίζεται στο πλαίσιο Ενοποιημένης Ανίχνευσης και Επικοινωνίας (Integrated Sensing and Communication - ISAC), επιτρέποντας την ταυτόχρονη επικοινωνία και παρακολούθηση του περιβάλλοντος. Η τεχνολογία αυτή παρέχει πλεονεκτήματα σε τομείς όπως η αυτόνομη πλοήγηση, η βιομηχανική παρακολούθηση και η δημόσια ασφάλεια.

Τα παραδοσιακά ασύρματα συστήματα επικοινωνίας εστιάζουν αποκλειστικά στη μεταφορά δεδομένων, ενώ τα συστήματα ανίχνευσης, όπως τα ραντάρ, στοχεύουν στην αντίληψη του περιβάλλοντος. Τα PMNs συγχωνεύουν αυτές τις λειτουργίες, αξιοποιώντας την πυκνή υποδομή των δικτύων κινητής τηλεφωνίας για την επίτευξη και των δύο στόχων. Ως υποκατηγορία του ISAC, τα PMNs εκμεταλλεύονται την τεχνολογία 5G και πέραν αυτής, συμπεριλαμβανομένων των επικοινωνιών κυμάτων mmWave, για την παροχή υψηλής ανάλυσης ανίχνευσης και αποδοτικής επικοινωνίας.

9.1 Αρχιτεκτονική των Δικτύων Αντίληψης για Κινητές Συσκευές (PMNs).

Η αρχιτεκτονική των Perceptive Mobile Networks (PMNs) αποτελεί τον πυρήνα της λειτουργικότητας αυτών των συστημάτων, καθώς καθορίζει τον τρόπο ενσωμάτωσης των λειτουργιών ανίχνευσης και επικοινωνίας στις υπάρχουσες υποδομές δικτύου. Οι αρχιτεκτονικές προσεγγίσεις που έχουν προταθεί εστιάζουν σε διαφορετικές μεθόδους για την επίτευξη αυτής της ενσωμάτωσης, λαμβάνοντας υπόψη προκλήσεις όπως η αυτοπαρεμβολή, ο συγχρονισμός και η απόδοση.

Υπάρχουν τρεις κύριες αρχιτεκτονικές για τα PMNs, καθεμία από τις οποίες προτείνει διαφορετική στρατηγική διαχείρισης πόρων και παρεμβολών.

- Μονοστατική Διπλή Λειτουργία Ραντάρ και Επικοινωνίας (Mono-Static DFRC)

Η μονοστατική προσέγγιση υλοποιείται με τη χρήση των ίδιων σταθμών βάσης (BS) για τη μετάδοση σημάτων επικοινωνίας και τη λήψη σημάτων ανίχνευσης (echoes). Πρόκειται για την πιο απλή και άμεση αρχιτεκτονική, καθώς χρησιμοποιεί την υπάρχουσα υποδομή χωρίς την ανάγκη επιπρόσθετων αισθητήρων ή τερματικών.

Πλεονεκτήματα:

- Μειώνει την ανάγκη για προσθήκη εξειδικευμένων κόμβων ή συσκευών.
- Αξιοποιεί πλήρως τις κεραίες και την υποδομή των σταθμών βάσης.

Μειονεκτήματα:

- Αυτοπαρεμβολή (Self-Interference - SI): Οι σταθμοί βάσης λειτουργούν σε πλήρη διπλή κατεύθυνση (full-duplex), εκπέμποντας και λαμβάνοντας σήματα ταυτόχρονα, κάτι που προκαλεί ισχυρές αυτοπαρεμβολές.

Απαιτεί προηγμένες τεχνικές ακύρωσης παρεμβολών, όπως Recursive Least Squares (RLS) ή Least Mean Squares (LMS), οι οποίες αυξάνουν την υπολογιστική πολυπλοκότητα.

- PMN-RRU (Remote Radio Units)

Η αρχιτεκτονική PMN-RRU ενσωματώνει απομακρυσμένες ραδιομονάδες (RRUs), οι οποίες είναι τοπικά τοποθετημένες και λειτουργούν ως αποκλειστικοί δέκτες σημάτων ανίχνευσης.

Πλεονεκτήματα:

- Αποφυγή Αυτοπαρεμβολών: Οι RRU λειτουργούν σε διαχωρισμένη κατεύθυνση (half-duplex), αναλαμβάνοντας τον ρόλο του δέκτη για τα σήματα ανίχνευσης.
- Υψηλή Πυκνότητα Κόμβων: Η πυκνή κατανομή των RRU επιτρέπει την κάλυψη μεγάλων περιοχών και τη βελτίωση της ακρίβειας ανίχνευσης.

Μειονεκτήματα:

- Απαιτήση Συγχρονισμού: Απαιτείται συγχρονισμός μεταξύ των RRU και των BS για τη διασφάλιση της ακρίβειας των ληφθέντων δεδομένων.
- Αυξάνει την πολυπλοκότητα του δικτύου λόγω της ανάγκης για επιπρόσθετη υποδομή.
- PMN-TMT (Target Monitoring Terminals)

Η αρχιτεκτονική PMN-TMT εισάγει μία νέα κατηγορία παθητικών τερματικών παρακολούθησης στόχων (TMTs). Αυτά τα τερματικά είναι IoT συσκευές με αποκλειστικές δυνατότητες ανίχνευσης, όπως ραντάρ ή αισθητήρες εικόνας, και είναι διασυνδεδεμένα με τους σταθμούς βάσης μέσω συνδέσεων χαμηλής καθυστέρησης.

Πλεονεκτήματα:

- Χαμηλό Κόστος: Τα TMT είναι φθηνότερα σε σχέση με τα RRU, καθιστώντας τα ιδανικά για εκτεταμένη χρήση.
- Ανεξαρτησία Από Διπλή Λειτουργία: Οι σταθμοί βάσης λειτουργούν μόνο ως πομποί, ενώ οι TMT λειτουργούν ως δέκτες.
- Βελτιωμένη Ανίχνευση: Η κατανομημένη τοποθέτηση των TMT παρέχει πολλαπλές γωνίες παρακολούθησης, αυξάνοντας την ανάλυση και την ακρίβεια.

Μειονεκτήματα:

- Απαιτεί επιπλέον συγχρονισμό μεταξύ των TMT και των BS.
- Εξαρτάται από την ποιότητα και την πυκνότητα της τοποθέτησης των TMT για την κάλυψη μεγάλων περιοχών.

Η επιλογή αρχιτεκτονικής εξαρτάται από τις απαιτήσεις του συστήματος:

- Αυτόνομη Οδήγηση: Η PMN-TMT αρχιτεκτονική είναι ιδανική για δυναμικά περιβάλλοντα, όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια ανίχνευσης.
- Δημόσια Ασφάλεια: Τα Mono-Static DFRC μπορούν να προσφέρουν λύσεις χαμηλού κόστους σε εφαρμογές μεσαίας κλίμακας.
- Βιομηχανικό IoT: Η PMN-RRU προσφέρει καλύτερη απόδοση σε σταθερά περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα κόμβων.

Η ανάπτυξη αυτών των αρχιτεκτονικών παρέχει τη βάση για τη λειτουργία των PMNs, τα οποία αποτελούν θεμέλιο λίθο για τα δίκτυα επικοινωνίας επόμενης γενιάς.

Αρχιτεκτονική	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Mono-Static DFRC	Χαμηλή πολυπλοκότητα υποδομής	Ισχυρή αυτοπαρεμβολή
PMN-RRU	Αποφυγή αυτοπαρεμβολών	Υψηλή ανάγκη συγχρονισμού
PMN-TMT	Χαμηλό κόστος, βελτιωμένη ανίχνευση	Εξάρτηση από τοποθέτηση και συγχρονισμό

9.2 Τεχνολογικά Χαρακτηριστικά των Δικτύων Αντίληψης για Κινητές Συσκευές (PMNs).

Τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά των PMNs είναι αυτά που καθιστούν δυνατή την ταυτόχρονη ενσωμάτωση των λειτουργιών ανίχνευσης και επικοινωνίας. Αυτή η ενότητα αναλύει τις βασικές πτυχές των PMNs, περιλαμβάνοντας τη διαχείριση πόρων, τις τεχνικές επεξεργασίας σημάτων, τη βελτιστοποίηση δεσμών (beamforming), και τις τεχνικές για την ενίσχυση της απόδοσης.

Η κατανομή πόρων είναι κρίσιμη για τη λειτουργία των PMNs, καθώς τα ίδια φυσικά κανάλια χρησιμοποιούνται για ανίχνευση και επικοινωνία. Η αποτελεσματική κατανομή εξαρτάται από την ισορροπία μεταξύ της απόδοσης ανίχνευσης και της ποιότητας επικοινωνίας.

Κύρια Στοιχεία:

- Κατανομή Εύρους Ζώνης: Η διαθέσιμη συχνότητα πρέπει να καταναμεθεί έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η παρεμβολή μεταξύ επικοινωνίας και ανίχνευσης. Η χρήση ευρέως φάσματος σε mmWave μειώνει τις πιθανότητες αλληλοπαρεμβολών.
- Διαχείριση Ισχύος: Οι πομποί ρυθμίζουν την ισχύ μετάδοσης για να εξασφαλίζουν επαρκή ισχύ για την ανίχνευση, ενώ παράλληλα διατηρούν την ποιότητα του σήματος επικοινωνίας.

Διαχείριση Πόρων σε Πολλαπλούς Κόμβους: Τα PMNs συχνά λειτουργούν σε δικτυακές διαμορφώσεις, με πολλαπλούς κόμβους να μοιράζονται δεδομένα. Αυτό απαιτεί προηγμένα πρωτόκολλα για την εναρμόνιση της χρήσης πόρων μεταξύ των κόμβων.

Ένα από τα κεντρικά χαρακτηριστικά των PMNs είναι η χρήση κοινών σημάτων για επικοινωνία και ανίχνευση. Τα σήματα αυτά σχεδιάζονται έτσι ώστε:

- Να είναι γνωστά στους σταθμούς βάσης, διευκολύνοντας την ανίχνευση στόχων μέσω της ανάλυσης των ανακλώμενων σημάτων.
- Να μειώνουν την ανάγκη για επιπρόσθετα σήματα ραντάρ, εξοικονομώντας εύρος ζώνης και ισχύ.

Κύρια Τεχνικά Εργαλεία:

- Διαρροή Ενέργειας (Energy Leakage): Χρησιμοποιείται η διαρροή ενέργειας από σήματα επικοινωνίας προς τους στόχους για ανίχνευση. Αυτή η μέθοδος μειώνει την ανάγκη για ξεχωριστή μετάδοση σημάτων ανίχνευσης.
- Συνδυασμένα Σήματα ISAC (Integrated Sensing and Communication): Τα σήματα αυτά είναι ειδικά σχεδιασμένα για να εξυπηρετούν και τις δύο λειτουργίες.

9.3 Βελτιστοποίηση και Παρεμβολές.

Το beamforming αποτελεί τη βάση για την ελαχιστοποίηση της παρεμβολής και τη βελτίωση της απόδοσης. Οι σταθμοί βάσης χρησιμοποιούν προηγμένες τεχνικές για να διαμορφώσουν τα σήματα έτσι ώστε να εξυπηρετούν ταυτόχρονα πολλαπλές λειτουργίες.

Τεχνικές Beamforming:

1. Zero Forcing (ZF):

- Αποτρέπει την παρεμβολή μεταξύ των χρηστών.
- Χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ορθογώνιων δεσμών, απομονώνοντας τα σήματα ανίχνευσης από τα σήματα επικοινωνίας.

2. Beam Synthesis (B-Syn):

- Εστιάζει στη μεγιστοποίηση της ενέργειας προς τον στόχο ανίχνευσης.
- Κατάλληλο για περιβάλλοντα με υψηλή απαίτηση ακρίβειας ανίχνευσης.

3. Alternating Optimization (AO):

- Επιλύει το πρόβλημα βελτιστοποίησης μέσω εναλλαγής μεταξύ της προσαρμογής του πομπού και του δέκτη.

Προσφέρει τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ ανίχνευσης και επικοινωνίας.

Υβριδικό Beamforming:

- Συνδυάζει την αναλογική και την ψηφιακή επεξεργασία, μειώνοντας το κόστος υλοποίησης και εξοικονομώντας ενέργεια.

Η διαχείριση παρεμβολών είναι θεμελιώδης, καθώς η κοινή χρήση συχνοτήτων δημιουργεί αλληλοπαρεμβολές μεταξύ των λειτουργιών ανίχνευσης και επικοινωνίας.

Τύποι Παρεμβολών:

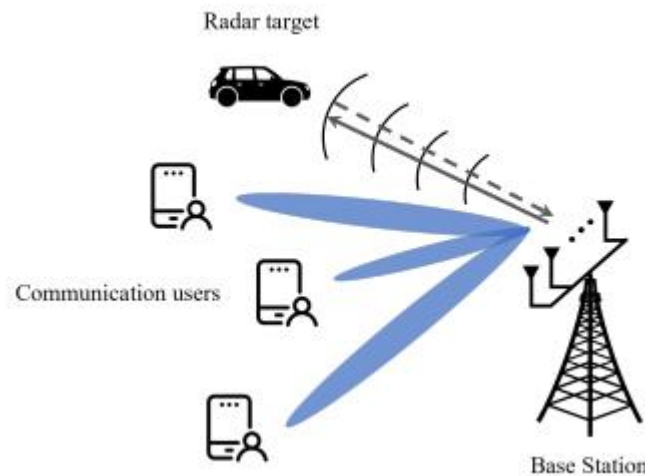
1. Αυτοπαρεμβολή (Self-Interference - SI): Προκύπτει από τη λειτουργία πλήρους διπλής κατεύθυνσης στους σταθμούς βάσης. Τεχνικές ακύρωσης όπως η Recursive Least Squares (RLS) χρησιμοποιούνται για τη μείωση του προβλήματος.
2. Παρεμβολές Σήματος: Η ανάκλαση των σημάτων επικοινωνίας στο περιβάλλον μπορεί να δημιουργήσει παρασιτικά σήματα (clutter) που επηρεάζουν την ανίχνευση.

Παρεμβολές Περιβάλλοντος: Το περιβάλλον ενδέχεται να αλλάξει τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ανίχνευσης, επηρεάζοντας την ακρίβεια των δεδομένων.

Επιπλέον τέτοιου είδους συστήματα αξιοποιούν σύγχρονους αλγορίθμους επεξεργασίας για τη βελτιστοποίηση της ανίχνευσης και επικοινωνίας:

- Cramér-Rao Bound (CRB): Χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό σημάτων με βάση την ελαχιστοποίηση του ορίου σφάλματος στην ανίχνευση στόχων.

- Αλγόριθμοι Δυναμικής Κατανομής Πόρων: Προσαρμόζουν την κατανομή πόρων ανάλογα με τις απαιτήσεις της επικοινωνίας και της ανίχνευσης.



Yiqiu Wang , Meixia Tao : Cramer-Rao Bound Analysis and Beamforming ' Design for Integrated Sensing and Communication with Extended Targets pg.3

Cramér-Rao Bound (CRB) και τα συστήματα Integrated Sensing and Communication (ISAC) είναι δύο θεμελιώδεις έννοιες που συνδέονται στενά σε σύγχρονες εφαρμογές ανίχνευσης και επικοινωνίας. Το CRB παρέχει ένα κατώτατο όριο στην ακρίβεια εκτίμησης παραμέτρων, όπως η απόσταση, η κατεύθυνση και ο προσανατολισμός στόχων, θέτοντας το θεωρητικό όριο για τη διακύμανση κάθε αμερόληπτου εκτιμητή. Στα συστήματα ISAC, όπου η ανίχνευση και η επικοινωνία συνυπάρχουν και λειτουργούν στον ίδιο φυσικό πόρο, το CRB χρησιμοποιείται ως βασικό εργαλείο για την αξιολόγηση της απόδοσης ανίχνευσης. Ο σχεδιασμός ακτινοβολίας (beamforming) και οι τεχνικές βελτιστοποίησης σε ISAC στοχεύουν στη μείωση του CRB για τη βελτίωση της ακρίβειας ανίχνευσης, ενώ παράλληλα διασφαλίζεται η ποιότητα της επικοινωνίας. Αυτή η σύνθεση ενισχύει την αποτελεσματικότητα των συστημάτων ISAC, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές όπως αυτόνομα οχήματα, παρακολούθηση στόχων και επικοινωνίες επόμενης γενιάς.

9.4 Προκλήσεις και Ερευνητικές Κατευθύνσεις για τα Δίκτυα Αντίληψης για Κινητές Συσκευές (PMNs).

Η ανάπτυξη των Perceptive Mobile Networks (PMNs), αν και φέρνει τεράστιες δυνατότητες, συνοδεύεται από σημαντικές τεχνικές και λειτουργικές προκλήσεις. Η επίλυση αυτών των προκλήσεων απαιτεί εστιασμένη έρευνα και ανάπτυξη. Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζονται οι κυριότερες προκλήσεις και οι κατευθύνσεις έρευνας για τη μελλοντική εξέλιξη.

Η ενσωμάτωση ανίχνευσης και επικοινωνίας σε ένα κοινό σύστημα δημιουργεί εγγενείς παρεμβολές που πρέπει να διαχειριστούν προσεκτικά.

Αυτοπαρεμβολή (Self-Interference - SI):

- *Πρόβλημα:* Στην αρχιτεκτονική Mono-Static DFRC, οι σταθμοί βάσης (BS) λειτουργούν ως πομποί και δέκτες ταυτόχρονα, προκαλώντας αυτοπαρεμβολή.
- *Λύσεις:*
 1. Χρήση προηγμένων τεχνικών ακύρωσης SI, όπως φίλτρα ανάδρασης (feedback filters) ή προσαρμοστικά φίλτρα (adaptive filters).
 2. Εναλλακτικά, αρχιτεκτονικές όπως οι PMN-RRU και PMN-TMT αποφεύγουν εντελώς την αυτοπαρεμβολή μέσω διαχωρισμού πομπού και δέκτη.

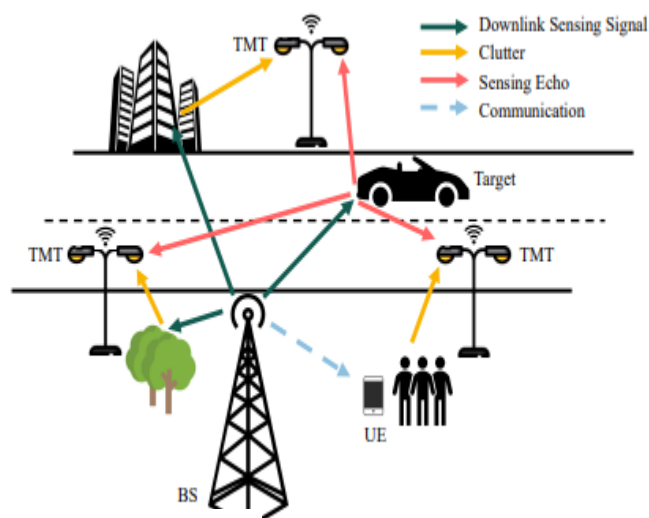
Το PMN-RRU (Perceptive Mobile Network - Remote Radio Unit) είναι μια αρχιτεκτονική δικτύου, η οποία είναι μέρος της ευρύτερης έννοιας των ενσωματωμένων συστημάτων αισθητήρων και επικοινωνίας (ISAC).

Στην αρχιτεκτονική PMN-RRU:

1. Remote Radio Units (RRUs): Οι RRU είναι απομακρυσμένες μονάδες ραδιοσυχνοτήτων που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση και λήψη σημάτων.
2. Λειτουργίες Αισθητήρων: Ορισμένες RRU χρησιμοποιούνται αποκλειστικά ως δέκτες για αισθητήρες κατά τη διάρκεια του χρόνου ανίχνευσης, εξαλείφοντας την ανάγκη για λειτουργία πλήρους duplex.
3. Συγχρονισμός: Απαιτείται υψηλή ακρίβεια συγχρονισμού μεταξύ των μονάδων για την επίτευξη αποτελεσματικής ανίχνευσης και επικοινωνίας.

Το PMN-RRU αποφεύγει τη λειτουργία πλήρους duplex, μειώνοντας την πολυπλοκότητα, και προσφέρει ευκαιρίες για συνεργατική ανίχνευση με τη χρήση πολλαπλών σημείων ανίχνευσης. Ωστόσο, προκύπτουν προκλήσεις στον συγχρονισμό και τη διαχείριση των παρεμβολών.

Το PMN-TMT (Perceptive Mobile Network - Target Monitoring Terminal) είναι μια αρχιτεκτονική που σχεδιάστηκε για την ενσωμάτωση δυνατοτήτων ανίχνευσης (sensing) σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Η αρχιτεκτονική αυτή προσθέτει έναν επιπλέον στρώμα από Target Monitoring Terminals (TMTs) στο δίκτυο. Οι TMTs είναι παθητικοί κόμβοι με δυνατότητες ανίχνευσης, όπως ραντάρ, οπτικά συστήματα και άλλες λειτουργίες αισθητήρων.



Lei Xie , S.H Song : Collaborative Sensing in Perceptive Mobile Networks : Opportunities and Challenges pg.2

Η σύγκριση των αρχιτεκτονικών PMN-RRU και PMN-TMT σε Perceptive Mobile Networks (PMNs) μπορεί να γίνει βάσει των κύριων χαρακτηριστικών τους, πλεονεκτημάτων και περιορισμών:

Χαρακτηριστικό	PMN-RRU	PMN-TMT
Βασική Ιδέα	Χρήση Remote Radio Units (RRUs) για ανίχνευση και επικοινωνία.	Χρήση Target Monitoring Terminals (TMTs) ως παθητικούς αισθητήρες.
Τύπος κόμβων	Δραστήριοι κόμβοι (εκπέμπουν και λαμβάνουν σήματα).	Παθητικοί κόμβοι (λαμβάνουν μόνο σήματα).
Πλήρης Duplex Λειτουργία	Απαιτείται συγχρονισμός για την αποφυγή παρεμβολών.	Δεν απαιτείται λειτουργία πλήρους duplex στους σταθμούς βάσης.
Πολυπλοκότητα Συγχρονισμού	Υψηλή, λόγω της ανάγκης συγχρονισμού πολλαπλών RRUs.	Απαιτείται συγχρονισμός μεταξύ TMTs και BSs, αλλά η απαίτηση είναι χαμηλότερη.

Κόστος Υλοποίησης	Υψηλότερο λόγω των ενεργών μονάδων και της ανάγκης για πιο σύνθετο εξοπλισμό.	Χαμηλότερο, καθώς οι TMTs είναι απλές παθητικές συσκευές.
Περιοχή Ανίχνευσης	Εξαρτάται από τη διασπορά και τη δυναμική των RRUs.	Μεγαλύτερη κάλυψη λόγω της ευελιξίας και της διασποράς των TMTs.
Συνεργατική Ανίχνευση	Υποστηρίζεται, αλλά περιορίζεται από την απόδοση των RRUs.	Ισχυρότερη, λόγω (macro-diversity) των TMTs.
Ενσωμάτωση με IoT	Περιορισμένη, καθώς τα RRUs είναι σχεδιασμένα κυρίως για επικοινωνία.	Εύκολη ενσωμάτωση με IoT λόγω της απλότητας και της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας των TMTs.
Παρεμβολές	Υψηλότερες πιθανότητες παρεμβολών μεταξύ αισθητήρων και επικοινωνίας.	Χαμηλότερες παρεμβολές λόγω του διαχωρισμού λειτουργιών ανίχνευσης και επικοινωνίας.

Πλεονεκτήματα PMN-RRU:

- Υψηλότερη ακρίβεια ανίχνευσης κοντά στα RRUs.
- Δυνατότητα πλήρους εκμετάλλευσης υφιστάμενων υποδομών επικοινωνίας.

Πλεονεκτήματα PMN-TMT:

- Χαμηλότερο κόστος και πολυπλοκότητα υλοποίησης.
- Κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη κάλυψη και συνεργατική ανίχνευση.
- Ευκολότερη ενσωμάτωση με IoT.

Παρεμβολές Περιβάλλοντος:

- Πρόβλημα: Οι ανακλάσεις των σημάτων σε σταθερά ή κινούμενα αντικείμενα δημιουργούν παρασιτικά σήματα (clutter), επηρεάζοντας την ακρίβεια της ανίχνευσης.
- Λύσεις:
 - Υπολογισμός του στατιστικού περιβάλλοντος μέσω περιόδων εκτίμησης (environment estimation periods).

Παρεμβολές μεταξύ Επικοινωνίας και Ανίχνευσης:

- Πρόβλημα: Η κοινή χρήση του ίδιου φάσματος από σήματα επικοινωνίας και ανίχνευσης μπορεί να μειώσει την απόδοση και των δύο λειτουργιών.

Λύσεις:

- Χρήση τεχνικών beamforming, όπως Zero Forcing (ZF) και Beam Synthesis (B-Syn), για την απομόνωση των σημάτων.
- Χρήση μηχανικών μάθησης για την ανίχνευση και καταστολή των clutter σημάτων.

Τα σήματα clutter αποτελούν ανεπιθύμητες επιστροφές από σήματα , που προέρχονται από φυσικά αντικείμενα ή επιφάνειες και παρεμβαίνουν στην ανίχνευση στόχων ενδιαφέροντος. Ειδικότερα:

1. Ορισμός:

- ο Clutter ονομάζονται τα σήματα που επιστρέφουν από αντικείμενα όπως το έδαφος, η θάλασσα, τα δέντρα ή η βροχή, τα οποία δεν είναι στόχοι του ραντάρ αλλά προκαλούν παρεμβολές. Αυτές οι επιστροφές είναι συχνά ανεπιθύμητες για ραντάρ ανίχνευσης στόχων αλλά μπορεί να είναι επιθυμητές σε εφαρμογές τηλεπισκόπησης.

2. Χαρακτηριστικά:

- ο Επιφανειακό Clutter: Επιστροφές από επιφάνειες όπως έδαφος ή θάλασσα. Η έντασή τους εξαρτάται από την ανακλαστικότητα της επιφάνειας και την περιοχή που καλύπτει η δέσμη του ραντάρ.
- ο Ογκομετρικό Clutter: Επιστροφές από τον όγκο της ατμόσφαιρας, όπως σταγονίδια βροχής ή χιονιού, που φωτίζονται από τη δέσμη.
- ο Τα χαρακτηριστικά του clutter εξαρτώνται από την τοποθεσία, τη γωνία σάρωσης, τη συχνότητα λειτουργίας, καθώς και τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

3. Διαφορές από Θόρυβο:

- ο Το clutter έχει μεγαλύτερη συσχέτιση ανάμεσα σε παλμούς (δηλαδή, μπορεί να είναι στατιστικά συνδεδεμένο), ενώ ο θόρυβος είναι ανεξάρτητος. Επίσης, το clutter μπορεί να ποικίλλει έντονα με την αλλαγή θέσης ή περιβαλλοντικών συνθηκών.

4. Προβλήματα και Διαχείριση:

- ο Το clutter επηρεάζει την ανίχνευση κινούμενων στόχων, καθώς μπορεί να επικαλύψει το σήμα τους. Για τη μείωση της παρεμβολής του clutter, χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως η επεξεργασία Doppler για την απομάκρυνση των στατικών επιστροφών.

9.4.2 Προκλήσεις στη Δυναμική Ανίχνευση και κατανομή πόρων.

Δυναμικά Περιβάλλοντα:

- Πρόβλημα: Η ανίχνευση σε περιβάλλοντα με ταχέως μεταβαλλόμενες συνθήκες, όπως η αυτόνομη οδήγηση, απαιτεί ταχύτατη και προσαρμοστική ανάλυση.
- Λύσεις:
 - ο Χρήση συνεργατικής ανίχνευσης μέσω κατανεμημένων κόμβων (distributed sensing nodes), οι οποίοι ανταλλάσσουν δεδομένα για να βελτιώσουν την ακρίβεια.
 - ο Ανάπτυξη αλγορίθμων με χαμηλό χρόνο επεξεργασίας, βασισμένων σε μηχανική μάθηση (machine learning) ή τεχνητή νοημοσύνη (AI).

Παρακολούθηση Υψηλής Ταχύτητας:

- Πρόβλημα: Στόχοι που κινούνται γρήγορα, όπως οχήματα ή drones, απαιτούν συνεχείς ενημερώσεις και ακριβείς υπολογισμούς τροχιάς.
- Λύσεις:
 - ο Ανάπτυξη αλγορίθμων πρόβλεψης θέσης, βασισμένων σε φίλτρα Kalman ή Deep Learning.

Τα φίλτρα Kalman είναι ένας αλγόριθμος επεξεργασίας σήματος που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της κατάστασης ενός συστήματος, με βάση θορυβώδεις ή ελλιπείς μετρήσεις.

Τα φίλτρα Kalman βασίζονται σε:

1. Μοντέλο δυναμικής του συστήματος: Περιγράφει πώς εξελίσσεται η κατάσταση του συστήματος στον χρόνο.
2. Μοντέλο μέτρησης: Περιγράφει πώς οι αισθητήρες καταγράφουν την κατάσταση, συνήθως επηρεασμένα από θόρυβο.

Το φίλτρο εκτελεί δύο βασικά βήματα:

1. Πρόβλεψη (Prediction):

- Υπολογίζει την εκτίμηση της κατάστασης στην επόμενη χρονική στιγμή, με βάση το μοντέλο του συστήματος.
- Υπολογίζει την αβεβαιότητα της πρόβλεψης.

2. Ενημέρωση (Update):

- Ενσωματώνει νέες μετρήσεις για τη βελτίωση της πρόβλεψης.
- Χρησιμοποιεί το λεγόμενο "Κέρδος Kalman" για την ισορροπία μεταξύ της πρόβλεψης και των μετρήσεων.

Ιδιότητες:

- Βέλτιστη εκτίμηση: Το φίλτρο Kalman παρέχει την καλύτερη εκτίμηση της κατάστασης, ελαχιστοποιώντας το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE).
- Προσαρμοστικότητα: Δυναμική ενημέρωση εκτιμήσεων καθώς λαμβάνονται νέες πληροφορίες.
- Γραμμικότητα: Το κλασικό φίλτρο Kalman εφαρμόζεται μόνο σε γραμμικά συστήματα με Gaussian θόρυβο.

Η κατανομή πόρων στα PMNs πρέπει να είναι αποδοτική ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες τόσο της ανίχνευσης όσο και της επικοινωνίας.

Πρόκληση στην Κατανομή Φάσματος:

- *Πρόβλημα:* Ο περιορισμένος αριθμός καναλιών πρέπει να εξυπηρετήσει ταυτόχρονα τις λειτουργίες επικοινωνίας και ανίχνευσης.
- *Λύσεις:*
 - Ανάπτυξη πρωτοκόλλων προτεραιοποίησης για τη δυναμική διαχείριση φάσματος.
 - Εφαρμογή τεχνικών multiple-input multiple-output (MIMO) για καλύτερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης.

Ενεργειακή Απόδοση:

- *Πρόβλημα:* Οι αισθητήρες και τα δίκτυα TMT έχουν περιορισμένη ενεργειακή δυνατότητα, ειδικά σε περιπτώσεις εκτεταμένης χρήσης.
- *Λύσεις:*
- Ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών πρωτοκόλλων που μειώνουν τη συχνότητα επικοινωνίας και την κατανάλωση ισχύος.
- Χρήση υβριδικών συστημάτων beamforming που συνδυάζουν αναλογική και ψηφιακή επεξεργασία για ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης.

Κεφάλαιο 10: Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Προοπτικές για τα Συστήματα ISAC.

Η ταχεία ανάπτυξη των τεχνολογιών ανίχνευσης και επικοινωνίας έχει δημιουργήσει ένα δυναμικό περιβάλλον, όπου τα μπορούν να διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο στη διαμόρφωση των βιομηχανικών, κοινωνικών και επιστημονικών εξελίξεων. Το μέλλον των ISAC συστημάτων είναι γεμάτο προοπτικές, με τις εφαρμογές τους να επεκτείνονται σε ακόμη πιο περίπλοκα και απαιτητικά περιβάλλοντα. Ωστόσο, οι τεχνολογικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι πολλές, και το κεφάλαιο αυτό θα εξετάσει τις πιθανές κατευθύνσεις ανάπτυξης για τα ISAC συστήματα, τις προκλήσεις που πρέπει ξεπεραστούν και τις βασικές τάσεις που θα διαμορφώσουν το μέλλον τους.

10.1.1 Δίκτυα 6G και THz Επικοινωνία:

Η ανάπτυξη των δικτύων 6G αναμένεται να αλλάξει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν τα συστήματα επικοινωνίας και ανίχνευσης, ενσωματώνοντας νέες τεχνολογίες και φάσματα συχνοτήτων. Σε αυτό το πλαίσιο, τα ISAC συστήματα θα έχουν τη δυνατότητα να αξιοποιήσουν τις υπερυψηλές συχνότητες (THz) για τη βελτίωση της ακρίβειας και της ταχύτητας στην ανίχνευση και την επικοινωνία. Τα δίκτυα 6G θα εισάγουν τη χρήση των συχνοτήτων THz (τεχνολογίες TeraHertz), οι οποίες προσφέρουν πολύ υψηλές ταχύτητες μετάδοσης και ανάλυση στην ανίχνευση. Η αυξημένη χωρητικότητα του φάσματος THz επιτρέπει την παράλληλη μετάδοση πολλαπλών σημάτων, μειώνοντας την καθυστέρηση και βελτιώνοντας τη συνολική ποιότητα της επικοινωνίας. Για τα συστήματα ISAC, αυτό σημαίνει δυνατότητα λεπτομερούς απεικόνισης του περιβάλλοντος, αυξημένη ανάλυση στη χαρτογράφηση και την ανίχνευση αντικειμένων, και βελτιστοποιημένη απόδοση σε εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις.

Ωστόσο, η εφαρμογή των THz συχνοτήτων έρχεται με τεχνικές προκλήσεις, όπως η ανάγκη για νέα υλικά και τεχνολογίες επεξεργασίας, η αυξημένη κατανάλωση

ενέργειας και η αντιμετώπιση της εξασθένησης του σήματος. Ειδικά για τις εφαρμογές ISAC, η διαχείριση της εξασθένησης και η αποτελεσματική εκπομπή στα δίκτυα 6G αποτελεί σημαντική προτεραιότητα.

10.1.2 ISAC και Δίκτυα των Πραγμάτων (IoT):

Η ενοποίηση των ISAC συστημάτων με το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) θα επιτρέψει την ανάπτυξη των έξυπνων πόλεων και την παρακολούθηση των υποδομών σε πραγματικό χρόνο. Με την αυξανόμενη διασύνδεση των συσκευών IoT, τα συστήματα ISAC μπορούν να προσφέρουν ταυτόχρονη ανίχνευση και επικοινωνία για τη διαχείριση πόρων, την παρακολούθηση των δικτύων και την πρόβλεψη συντήρησης σε κρίσιμες υποδομές.

Αυτός ο συνδυασμός IoT και ISAC θα επιτρέψει τη δημιουργία δικτύων χαμηλής ισχύος, τα οποία θα συλλέγουν και θα αναλύουν δεδομένα χωρίς να απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση. Ωστόσο, η αύξηση των συνδεδεμένων συσκευών δημιουργεί πιέσεις στο φάσμα και την ασφάλεια των δεδομένων, γεγονός που απαιτεί καινοτόμες λύσεις για την προστασία της ιδιωτικότητας και τη διαχείριση της κατανάλωσης ενέργειας.

10.2 ISAC και Τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης και Μηχανικής Μάθησης:

Η ενσωμάτωση αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης (AI) και μηχανικής μάθησης (ML) στα ISAC συστήματα προσφέρει δυνατότητες για προσαρμοστικότητα, ευελιξία και μεγαλύτερη αυτονομία στη λήψη αποφάσεων. Η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να διαδραματίσει βασικό ρόλο στη διαχείριση και την ανάλυση δεδομένων, επιτρέποντας στα συστήματα ISAC να αναγνωρίζουν μοτίβα και να βελτιώνουν την ακρίβεια τους σε απαιτητικές εφαρμογές.

Οι αλγόριθμοι βαθιάς μάθησης (deep learning) επιτρέπουν στα ISAC συστήματα να βελτιώνουν συνεχώς την απόδοσή τους στην ανίχνευση και αναγνώριση μοτίβων. Στις εφαρμογές όπου απαιτείται η ανίχνευση συγκεκριμένων αντικειμένων ή η αναγνώριση δραστηριότητας, οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να επεξεργάζονται μεγάλα σύνολα δεδομένων, αναγνωρίζοντας ακόμη και τις πιο λεπτομερείς διαφορές.

Η βαθιά μάθηση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στις εφαρμογές ασφαλείας και επιτήρησης, όπου η ακρίβεια και η ταχύτητα αντίδρασης είναι κρίσιμες. Με την ενσωμάτωση αυτών των αλγορίθμων, τα ISAC συστήματα μπορούν να αναγνωρίζουν ύποπτες συμπεριφορές ή αλλαγές στο περιβάλλον, λαμβάνοντας προληπτικά μέτρα για την ασφάλεια των εγκαταστάσεων.

Επιπλέον Τα συστήματα ISAC σε συνδυασμό με την προβλεπτική ανάλυση έχουν τη δυνατότητα να επιτρέπουν την προγνωστική συντήρηση σε διάφορους τομείς, όπως η βιομηχανία και οι μεταφορές. Με τη χρήση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, τα συστήματα ISAC μπορούν να αναλύουν ιστορικά δεδομένα και να προβλέπουν πότε μια μηχανή ή ένας εξοπλισμός θα χρειαστεί συντήρηση, αποφεύγοντας τις δαπανηρές διακοπές της παραγωγικής διαδικασίας.

Αυτό το είδος συντήρησης επιτρέπει στις επιχειρήσεις να μειώσουν τα κόστη και να αυξήσουν την απόδοση του εξοπλισμού τους. Επιπλέον, η προβλεπτική ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα των συστημάτων και μειώνοντας το ενεργειακό αποτύπωμα.

10.3 Ανάπτυξη Υλικού και Νέων Υλικών για ISAC.

Η πρόοδος των ISAC συστημάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εξέλιξη του υλικού και την ανάπτυξη νέων υλικών που μπορούν να υποστηρίξουν την ταυτόχρονη ανίχνευση και επικοινωνία με αυξημένη αποδοτικότητα. Οι νέες τεχνολογίες υλικού επιτρέπουν τη λειτουργία των ISAC συστημάτων σε υψηλότερες συχνότητες, ενώ βελτιώνουν την ανθεκτικότητα και την ακρίβεια των αισθητήρων και των πομποδεκτών.

Ένα τέτοιο υλικό είναι τα μεταυλικά τα οποία είναι ειδικά υλικά που έχουν κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να παρουσιάζουν μοναδικές ιδιότητες, οι οποίες δεν παρατηρούνται στα συμβατικά υλικά. Στην περίπτωση των ISAC συστημάτων, τα μεταυλικά προσφέρουν τη δυνατότητα ελέγχου των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, επιτρέποντας τη βελτίωση της ποιότητας του σήματος και της ακρίβειας στην ανίχνευση. Επιπλέον χρησιμοποιούνται σε μικροκατασκευές όπου μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση των συστημάτων σε περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα συσκευών, προσφέροντας αυξημένη ευελιξία και προσαρμοστικότητα. Ειδικά στις εφαρμογές ασφαλείας και επιτήρησης, η χρήση μεταυλικών μπορεί να ενισχύσει την ανθεκτικότητα των συστημάτων στις παρεμβολές και να βελτιώσει την ακρίβεια των μετρήσεων.

Τα νέα υλικά προσφέρουν καινοτόμες λύσεις στην κατασκευή των ISAC συστημάτων, καθώς επιτρέπουν τη μείωση του μεγέθους των αισθητήρων και την ταυτόχρονη αύξηση της ευαισθησίας τους. Επιπλέον, η χρήση τους μειώνει την κατανάλωση ενέργειας των συστημάτων, καθιστώντας τα ISAC συστήματα πιο αποδοτικά και βιώσιμα. Η ενεργειακή αποδοτικότητα είναι κρίσιμη για τις εφαρμογές ISAC που απαιτούν συνεχή λειτουργία, όπως οι έξυπνες πόλεις και τα δίκτυα IoT. Προσφέρουν λύσεις για τη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος των συστημάτων, ενώ παράλληλα εξασφαλίζουν υψηλή απόδοση στις πιο απαιτητικές συνθήκες.

10.4 Βελτίωση της Ιδιωτικότητας και Ασφάλειας Δεδομένων στα ISAC Συστήματα.

Με την αυξημένη χρήση των συστημάτων σε κρίσιμους τομείς, όπως η ασφάλεια, οι μεταφορές και η υγειονομική περίθαλψη, η ανάγκη για προστασία της ιδιωτικότητας και της ασφάλειας των δεδομένων γίνεται πιο επιτακτική. Η δυνατότητα τετοιων συστημάτων να συλλέγουν και να επεξεργάζονται μεγάλες ποσότητες δεδομένων απαιτεί νέες προσεγγίσεις για την προστασία των δεδομένων και τη διασφάλιση της ιδιωτικότητας των χρηστών. Η κρυπτογράφηση των δεδομένων αποτελεί βασικό εργαλείο για την προστασία των ευαίσθητων πληροφοριών που συλλέγονται από τα συστήματα. Η χρήση τεχνικών κρυπτογράφησης σε επίπεδο συσκευών και δικτύων εξασφαλίζει ότι τα δεδομένα παραμένουν ασφαλή, ενώ παράλληλα επιτρέπει την ασφαλή μετάδοση των πληροφοριών μεταξύ των συστημάτων.

Προηγμένες μέθοδοι ασφάλειας, όπως το homomorphic encryption και το blockchain, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προστασία των δεδομένων που μεταδίδονται και αποθηκεύονται από τα C συστήματα. Η ανάπτυξη τέτοιων τεχνολογιών συμβάλλει στη διασφάλιση της ιδιωτικότητας των χρηστών και προστατεύει τις κρίσιμες υποδομές από πιθανές επιθέσεις.

Το homomorphic encryption είναι μια προηγμένη κρυπτογραφική τεχνική που επιτρέπει την εκτέλεση υπολογισμών σε κρυπτογραφημένα δεδομένα χωρίς την ανάγκη αποκρυπτογράφησης τους. Με άλλα λόγια, οι υπολογισμοί που πραγματοποιούνται στα κρυπτογραφημένα δεδομένα αντικατοπτρίζονται στα

αντίστοιχα αποκρυπτογραφημένα δεδομένα, χωρίς να εκτίθεται το περιεχόμενο των δεδομένων σε καμία φάση της διαδικασίας.

Χαρακτηριστικά:

1. Απόρρητο και ασφάλεια: Τα δεδομένα παραμένουν ασφαλή καθ' όλη τη διάρκεια της επεξεργασίας τους.
2. Υπολογιστική λειτουργικότητα: Οι αλγόριθμοι επιτρέπουν πράξεις όπως πρόσθεση, πολλαπλασιασμό ή άλλες λειτουργίες σε κρυπτογραφημένα δεδομένα.
3. Διαφάνεια αποτελεσμάτων: Τα αποτελέσματα των υπολογισμών διατηρούν την ακρίβεια που θα είχαν σε μη κρυπτογραφημένα δεδομένα.

Είδη Ομομορφικής Κρυπτογράφησης:

1. Partial Homomorphic Encryption (Μερική Ομομορφική Κρυπτογράφηση):
 - ο Επιτρέπει μόνο έναν συγκεκριμένο τύπο πράξης (π.χ. μόνο πρόσθεση ή μόνο πολλαπλασιασμό).
 - ο Παράδειγμα: RSA, ElGamal.
2. Somewhat Homomorphic Encryption (Περιορισμένη Ομομορφική Κρυπτογράφηση):
 - ο Υποστηρίζει περιορισμένο αριθμό πράξεων, όπως μια μικτή σειρά προσθέσεων και πολλαπλασιασμών.
3. Fully Homomorphic Encryption (Πλήρης Ομομορφική Κρυπτογράφηση):
 - ο Υποστηρίζει απεριόριστες προσθέσεις και πολλαπλασιασμούς, εξασφαλίζοντας τη δυνατότητα πολύπλοκων υπολογισμών.
 - ο Είναι η καλύτερη μορφή κρυπτογράφησης, αλλά είναι εξαιρετικά υπολογιστικά απαιτητικό.

Κεφάλαιο 11: Προκλήσεις και Ηθικά Ζητήματα στα Συστήματα ISAC.

Καθώς τα συστήματα (ISAC) γίνονται ολοένα και πιο διαδεδομένα, ανακύπτουν σημαντικές προκλήσεις και ηθικά ζητήματα που αφορούν την ασφάλεια, την ιδιωτικότητα και την επίδραση στην κοινωνία. Οι τεχνολογίες ISAC διαθέτουν εξαιρετική δυναμική και συμβάλλουν στην πρόοδο πολλών τομέων, αλλά ταυτόχρονα εγείρουν ανησυχίες σχετικά με την κατάχρηση των δεδομένων, την προστασία της ιδιωτικότητας και τον κοινωνικό αντίκτυπο. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα εξετάσουμε τις κύριες προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα ISAC συστήματα και τα ηθικά ζητήματα που συνδέονται με την ανάπτυξη και την εφαρμογή τους.

11.1 Προκλήσεις Ασφάλειας στα ISAC Συστήματα.

Η ασφάλεια των συστημάτων αποτελεί μία από τις κύριες προκλήσεις που σχετίζονται με την εφαρμογή τους. Τα συστήματα είναι συχνά ευάλωτα σε κυβερνοεπιθέσεις και υποκλοπές, καθώς η φύση τους απαιτεί την ταυτόχρονη συλλογή και μετάδοση μεγάλων όγκων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Η παραβίαση της ασφάλειας των ISAC συστημάτων μπορεί να οδηγήσει σε διαρροή ευαίσθητων πληροφοριών και να επηρεάσει κρίσιμες υποδομές. Συλλέγουν και επεξεργάζονται μεγάλες ποσότητες δεδομένων, τα οποία συχνά περιέχουν ευαίσθητες πληροφορίες για τους χρήστες και το περιβάλλον. Η προστασία της ιδιωτικότητας των δεδομένων αυτών αποτελεί

πρωταρχική πρόκληση, ιδιαίτερα σε εφαρμογές που σχετίζονται με την υγεία, την ασφάλεια και την παρακολούθηση.

Η ανάπτυξη τεχνικών ανωνυμοποίησης και η εφαρμογή πολιτικών περιορισμένης πρόσβασης είναι απαραίτητες για την προστασία των δεδομένων που συλλέγονται από τα συστήματα. Επιπλέον, η ενσωμάτωση τεχνικών ασφαλείας, όπως το homomorphic encryption και οι πρωτόκολλοι πρόσβασης, μπορεί να βελτιώσει την προστασία των δεδομένων και να διασφαλίσει ότι οι πληροφορίες παραμένουν απόρρητες. Ακόμα φέρνουν σημαντικά ηθικά διλήμματα, καθώς η δυνατότητά τους για συλλογή και ανάλυση δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε παραβίαση της ιδιωτικότητας και της αυτονομίας των χρηστών. Η χρήση τεχνολογιών στην αναγνώριση προσώπου, την παρακολούθηση δραστηριότητας και την αναγνώριση συμπεριφορών προκαλεί ανησυχίες σχετικά με την παρακολούθηση και την κατάχρηση των δεδομένων.

Οι κυβερνοεπιθέσεις αποτελούν μία από τις σοβαρότερες απειλές, καθώς η παραβίαση της ασφάλειας μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τα προσωπικά δεδομένα των χρηστών και την ασφάλεια των δικτύων. Η αντιμετώπιση των κυβερνοεπιθέσεων απαιτεί την ανάπτυξη προηγμένων μεθόδων προστασίας και την ενσωμάτωση τεχνολογιών κρυπτογράφησης και ανίχνευσης επιθέσεων. Η ενσωμάτωση αλγορίθμων κρυπτογράφησης και η συνεχής παρακολούθηση των συστημάτων σε πραγματικό χρόνο μπορούν να βοηθήσουν στην αποτροπή των επιθέσεων και στη μείωση των απειλών. Ωστόσο, οι τεχνολογίες κρυπτογράφησης ενδέχεται να μειώσουν την ταχύτητα απόκρισης των συστημάτων, γεγονός που αποτελεί πρόκληση για εφαρμογές με απαιτήσεις χαμηλής καθυστέρησης, όπως η αυτόνομη οδήγηση και τα δίκτυα επικοινωνίας.

11.2 Η Επίδραση στην Αγορά Εργασίας.

Η εφαρμογή στην αυτοματοποίηση και τον ψηφιακό μετασχηματισμό της παραγωγής επηρεάζει σημαντικά την αγορά εργασίας και δημιουργεί προκλήσεις για την απασχόληση. Τα συστήματα συμβάλλουν στην αυτοματοποίηση πολλών εργασιών, μειώνοντας την ανάγκη για ανθρώπινη παρέμβαση και ενισχύοντας την παραγωγικότητα. Ωστόσο, η αντικατάσταση των ανθρώπων από αυτοματοποιημένα συστήματα μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια θέσεων εργασίας και κοινωνικές επιπτώσεις. Στις βιομηχανικές και εμπορικές εφαρμογές οδηγεί σε μείωση της ανάγκης για ανθρώπινη εργασία σε πολλές θέσεις, ειδικά σε εκείνες που αφορούν επαναλαμβανόμενες εργασίες καθώς μπορούν να εκτελούν αυτές τις εργασίες με μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα, αυξάνοντας την παραγωγικότητα και μειώνοντας το κόστος. Ωστόσο, η αντικατάσταση των ανθρώπων από συστήματα αυτοματοποίησης μπορεί να έχει σημαντικές κοινωνικές συνέπειες, οδηγώντας σε ανεργία και κοινωνική ανισότητα.

Επιπλέον, πρέπει να αναφέρουμε ότι η χρήση τέτοιων συστημάτων δεν θα οδηγήσει μόνο σε απώλεια θέσεων εργασίας, αλλά και σε δημιουργία νέων θέσεων που απαιτούν

εξειδικευμένες δεξιότητες διότι η διαχείριση των δεδομένων που συλλέγονται, απαιτούν γνώσεις στους τομείς της τεχνολογίας, της μηχανικής μάθησης και της ανάλυσης δεδομένων.

Η εκπαίδευση και η επανακατάρτιση των εργαζομένων σε αυτές τις νέες δεξιότητες αποτελεί βασική πρόκληση, καθώς οι οργανισμοί και οι κυβερνήσεις πρέπει να επενδύσουν στην ανάπτυξη ενός εκπαιδευτικού πλαισίου που θα υποστηρίζει τη μετάβαση των εργαζομένων στις νέες θέσεις εργασίας. Αυτή η προσέγγιση θα επιτρέψει τη δημιουργία μιας ανθεκτικής και προσαρμόσιμης αγοράς εργασίας, εξασφαλίζοντας ότι οι εργαζόμενοι θα μπορούν να αναπτύξουν νέες δεξιότητες και να διατηρήσουν την ενασχόληση τους.

Λόγω των νέων τεχνολογιών κρίνεται απαραίτητή και η θέσπιση ρυθμιστικού πλαισίου για την ασφαλή και υπεύθυνη ανάπτυξή τους. Οι ρυθμιστικοί οργανισμοί και οι κυβερνήσεις πρέπει να διασφαλίσουν ότι οι τεχνολογίες- συστήματα τηρούν συγκεκριμένα πρότυπα ασφαλείας και προστασίας της ιδιωτικότητας, ενώ ταυτόχρονα ενισχύουν την καινοτομία και να συμμορφώνεται με τους νόμους και τους κανονισμούς για την προστασία των δεδομένων, όπως ο Γενικός Κανονισμός για την Προστασία Δεδομένων (GDPR) στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Οι κανονισμοί αυτοί διασφαλίζουν ότι οι οργανισμοί τηρούν συγκεκριμένα πρότυπα για τη συλλογή, αποθήκευση και επεξεργασία δεδομένων.

Οι ρυθμιστικές αρχές πρέπει να εξετάσουν την ανάπτυξη ειδικών κατευθυντήριων γραμμών, λαμβάνοντας υπόψη τις μοναδικές προκλήσεις που σχετίζονται με την ταυτόχρονη ανίχνευση και επικοινωνία. Οι κατευθυντήριες αυτές γραμμές θα ενισχύσουν την ασφάλεια των χρηστών και την εμπιστοσύνη των καταναλωτών, εξασφαλίζοντας ότι οι οργανισμοί δρουν με υπευθυνότητα.

Κεφάλαιο 12 : Ενεργειακή Αποδοτικότητα και Βιωσιμότητα.

Η ενσωμάτωση σε ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς αποτελεί έναν βασικό παράγοντα για την υλοποίηση των πράσινων και βιώσιμων επικοινωνιακών υποδομών. Η συνεχής αύξηση της ζήτησης για μεγαλύτερο εύρος ζώνης, αυξημένη υπολογιστική ισχύ και υψηλότερες απαιτήσεις μετάδοσης δεδομένων, οδηγεί σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών μεθόδων διαχείρισης πόρων .

Η ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών έχει συνοδευτεί από εκρηκτική αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης, γεγονός που αποδίδεται στην υιοθέτηση τεχνολογιών αυξημένων απαιτήσεων για να πετύχουμε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και την εξάπλωση του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT).

Η συνολική ενεργειακή κατανάλωση ενός δικτύου ασύρματων επικοινωνιών μπορεί να αναλυθεί σε διάφορες επιμέρους συνιστώσες, οι οποίες περιλαμβάνουν τις εξής κύριες κατηγορίες:

1. Βάσεις Σταθμών (Base Stations - BSs)

- Οι βάσεις σταθμών είναι οι κύριες πηγές ενεργειακής κατανάλωσης στα κινητά δίκτυα, καταναλώνοντας περίπου 60-80% της συνολικής ενέργειας.
- Η κατανάλωση ενέργειας των BSs αποτελείται από:
 - Ισχύ εκπομπής (Transmission Power): Χρησιμοποιείται για την εκπομπή σημάτων προς τους τελικούς χρήστες.
 - Κυκλωματική κατανάλωση (Circuit Power): Αφορά την ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία των ηλεκτρονικών στοιχείων, όπως ενισχυτές ισχύος, μετατροπείς αναλογικού-ψηφιακού σήματος (ADC/DAC), και επεξεργαστές σήματος.
 - Ψύξη και υποστήριξη συστημάτων (Cooling & Support Systems): Οι σταθμοί βάσης απαιτούν πρόσθετη ενέργεια για την ψύξη των εξαρτημάτων τους και τη διατήρηση της σταθερής λειτουργίας τους.

2. Δίκτυα κορμού (Core Networks)

- Οι διακομιστές δεδομένων και οι cloud υποδομές που διαχειρίζονται τη δρομολόγηση δεδομένων και την αποθήκευση πληροφορίας συνεισφέρουν σημαντικά στην κατανάλωση ενέργειας.
- Τα κέντρα δεδομένων (data centers) χρειάζονται υψηλή υπολογιστική ισχύ και μεγάλες ποσότητες ενέργειας για την υποστήριξη τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης (AI), ανάλυσης δεδομένων και κρυπτογράφησης.

3. Τερματικές Συσκευές και Internet of Things (IoT)

- Οι χρήστες αλληλεπιδρούν με τα δίκτυα μέσω κινητών τηλεφώνων, φορητών υπολογιστών και έξυπνων συσκευών IoT.
- Οι συσκευές αυτές καταναλώνουν σημαντική ενέργεια για τη μετάδοση και λήψη δεδομένων, ενώ πολλές από αυτές απαιτούν συνεχή σύνδεση με το δίκτυο.
- Η αυξημένη χρήση των έξυπνων αισθητήρων και των συστημάτων αυτοματοποιημένης επικοινωνίας μηχανής-προς-μηχανή (M2M) ενισχύει την ενεργειακή επιβάρυνση.

Η εισαγωγή των δικτύων 5G βελτίωσε σημαντικά τις επιδόσεις επικοινωνίας, αλλά παράλληλα αύξησε δραματικά την ενεργειακή ζήτηση. Οι κύριες αιτίες αυτής της αύξησης περιλαμβάνουν:

- Υψηλότερες συχνότητες λειτουργίας: Το 5G χρησιμοποιεί φάσμα από τα 3,5 GHz έως και τα 100 GHz (κύματα χιλιοστομέτρου – mmWave), που απαιτούν μεγαλύτερη ισχύ εκπομπής λόγω των υψηλών απωλειών διάδοσης.
- Πολλαπλές κεραίες (Massive MIMO): Τα συστήματα πολλαπλών κεραιών επιτρέπουν μεγαλύτερη χωρητικότητα, αλλά αυξάνουν σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας λόγω της ανάγκης για πολλαπλούς ενισχυτές ισχύος και προηγμένους αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος.

- Μικροκυψέλες (Small Cells): Τα 5G δίκτυα απαιτούν μεγάλο αριθμό μικροκυψελών, οι οποίες βελτιώνουν την κάλυψη αλλά αυξάνουν τον αριθμό των ενεργών σταθμών βάσης.

Για να μειωθεί η ενεργειακή επιβάρυνση στα σύγχρονα δίκτυα, απαιτούνται καινοτόμες τεχνολογικές λύσεις, όπως:

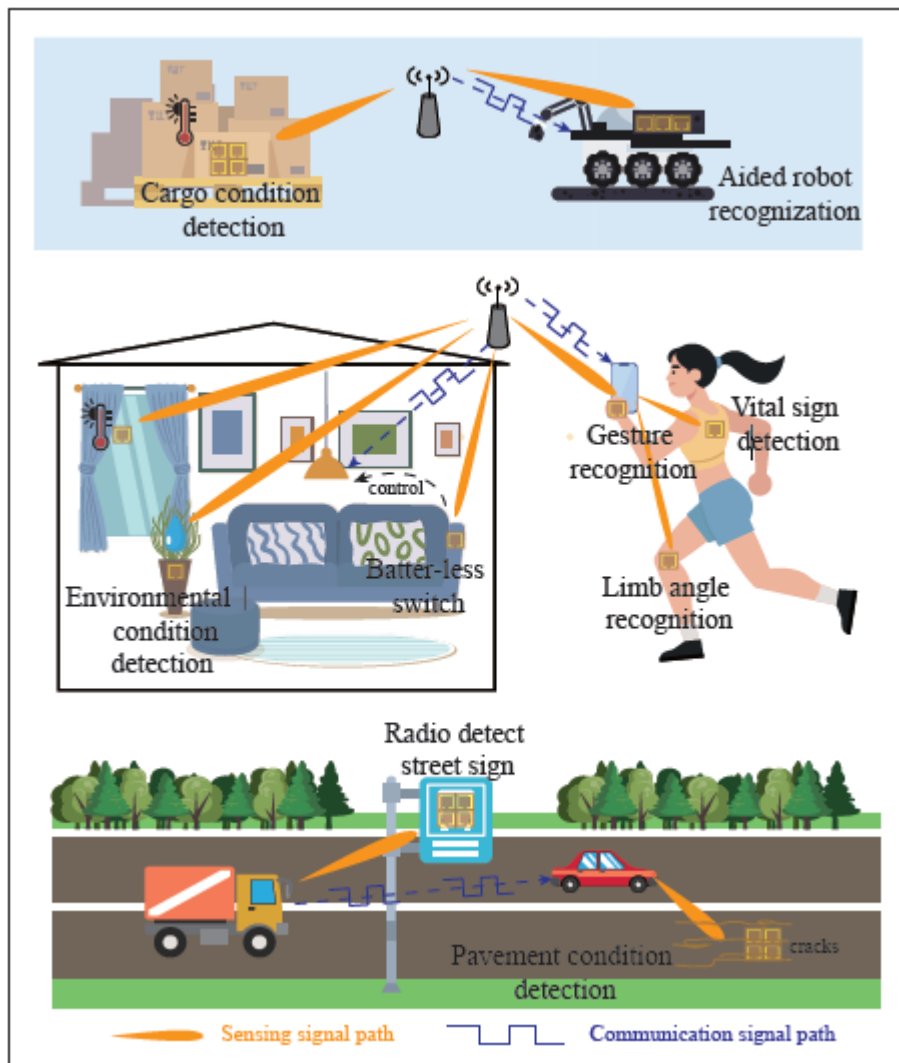
1. Ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα επικοινωνίας: Η χρήση προσαρμοστικής διαμόρφωσης και δυναμικής εκχώρησης πόρων μπορεί να μειώσει την περιττή ενεργειακή κατανάλωση.
2. Αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης (AI) για διαχείριση ισχύος: Οι AI-driven τεχνικές επιτρέπουν την έξυπνη βελτιστοποίηση των συχνοτήτων εκπομπής και της διαχείρισης φόρτου εργασίας, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας.
3. Χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας: Η ενσωμάτωση ηλιακών και αιολικών συστημάτων σε τηλεπικοινωνιακές υποδομές μπορεί να μειώσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των δικτύων.
4. Υβριδικές αρχιτεκτονικές ISAC: Η ταυτόχρονη εκπομπή σημάτων για επικοινωνία και αίσθηση μέσω του ίδιου καναλιού μπορεί να εξοικονομήσει ενέργεια μέχρι και 50%, μειώνοντας τον αριθμό των απαραίτητων πομπών.

12.1 Case Studies

- Meta-Backscatter για IoT χωρίς Μπαταρίες:

Η επικοινωνία μέσω meta-backscatter αξιοποιεί παθητικούς αισθητήρες μεταλλικών, οι οποίοι τροποποιούν τις ηλεκτρομαγνητικές τους ιδιότητες ανάκλασης ως απάντηση σε φυσικά ερεθίσματα. Οι συσκευές αυτές δεν απαιτούν εσωτερική πηγή ισχύος, καθώς λειτουργούν ανακλώντας τα υπάρχοντα σήματα ISAC. Το σύστημα περιλαμβάνει τρία βασικά στοιχεία: έναν πομπό που εκπέμπει σήματα ISAC, έναν αισθητήρα μεταλλικού που αντανάκλα το σήμα με τροποποιημένα χαρακτηριστικά και έναν δέκτη που ερμηνεύει τις μεταβολές του σήματος για εξαγωγή πληροφορίας. Η καινοτομία έγκειται στη χρήση υπο-μηκοκυματικών δομών (metasurfaces) που ενισχύουν την ευαισθησία του αισθητήρα σε φυσικές μεταβολές, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και η παρουσία χημικών ουσιών. Σε αντίθεση με παραδοσιακούς αισθητήρες, οι μεταλλικοί αισθητήρες μπορούν να κατασκευαστούν μαζί με χαμηλό κόστος και να λειτουργούν παθητικά, χωρίς μπαταρίες. Οι δέκτες χρησιμοποιούν εξελιγμένους αλγόριθμους, όπως compressive sensing, time-frequency analysis και adaptive filtering, ώστε να ανιχνεύσουν και να αναλύσουν μικρές αποκλίσεις στο σήμα ανάκλασης. Αυτό επιτρέπει τη λειτουργία ακόμα και σε σενάρια χαμηλού SNR.

Το πεδίο εφαρμογής είναι η γεωργία, υγειονομική φροντίδα, έξυπνα κτήρια. Στη γεωργία ως αισθητήρες εδάφους για υγρασία και θρεπτικά στοιχεία στη υγειονομική φροντίδα ως αισθητήρες θερμοκρασίας και για παρακολούθηση άλλων βιοδεικτών και στις έξυπνες κατασκευές για την παρακολούθηση στατικών δοκιμών.



Xu Liu , Hongliang Zhang : Meta-Backscatter: A New ISAC Paradigm for Battery-Free Internet of Things pg 107

Στη παραπάνω εικόνα βλέπουμε πως ο συνδυασμός ISAC και μεταϋλικών παρέχει μια νέα προσέγγιση για την υλοποίηση χαμηλής ενέργειας και υψηλής ευφυΐας δικτύων αισθητήρων σε IoT εφαρμογές (πχ. Ανίχνευση ρωγμών , έλεγχος φορτίων , ανίχνευση περιβαλλοντικών συνθηκών.)

- Σταθμοί Βάσης Ανίχνευσης για Έξυπνες Πόλεις

Οι σταθμοί βάσεις αποτελούν κόμβους πολλαπλής λειτουργίας που εκτελούν ταυτόχρονα επικοινωνία και περιβαλλοντική ανίχνευση, χρησιμοποιώντας κοινό σήμα. Συνδυάζουν beamforming, διαχείριση παρεμβολών και καταναεμημένη ανάλυση.

Η αρχιτεκτονική τους περιλαμβάνει:

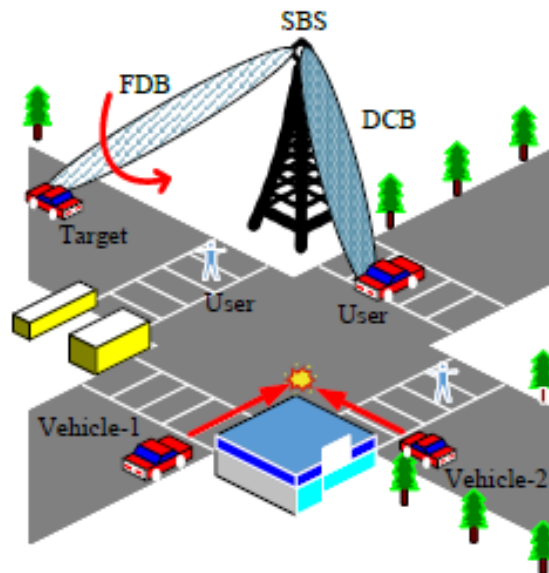
- Διπλής σύζευξης κεραίες για ταυτόχρονη αποστολή/λήψη.
- Αλγόριθμους FDB/DCB για διαχωρισμό μεταξύ σάρωσης και επικοινωνίας.

- Πρωτόκολλα TSFDMA που εξασφαλίζουν ότι οι λειτουργίες ανίχνευσης και μετάδοσης δε συγκρούονται.

Μέσα από προσομοιώσεις και πειραματικές δοκιμές, προκύπτουν:

- Χωρική ανάλυση ~ 5 cm,
- Ποσοστό ανίχνευσης αντικειμένων $>95\%$ σε αστικά σενάρια,
- Υποστήριξη >25 χρηστών/σταθμό με ταχύτητες >150 Mbps.

Το ενδεικτικό πεδίο εφαρμογής είναι τα έξυπνα φανάρια (διαχείριση πεζών/οχημάτων σε real-time) , επιτηρηση σε περιοχές υψηλού κινδύνου και υποστήριξη σε καταστάσεις έκτακτου κινδύνου όπως πχ. Σεισμοί , με την αποτύπωση των περιοχών σε real-time .



Jiang Wangjun , Wei Zhiqing : ISAC Enabled Sensing Base Station : System Design , Beamforming , Interference Cancellation and Performance Analysis pg113

Στη παραπάνω εικόνα βλέπουμε ένα σενάριο έξυπνης κυκλοφορίας όπου ένας Σταθμός Βάσης Ανίχνευσης (Sensing Base Station - SBS) παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο την κυκλοφορία και επικοινωνεί με διερχόμενα οχήματα με στόχο την αποτροπή συγκρούσεων. Το SBS είναι εγκατεστημένο πάνω από τον δρόμο, εξασφαλίζοντας ευρεία οπτική γωνία και μειώνοντας τα «τυφλά σημεία». Χρησιμοποιεί τεχνολογία ISAC εκπέμποντας σήματα που λειτουργούν ταυτόχρονα για ανίχνευση και επικοινωνία.

Βιβλιογραφία

1. Mark A. Richards, William L. Melvin, *Principles of Modern Radar, Vol. I: Basic Principles*, second edition, The Institution of Engineering and Technology, 2022
2. R. E. Kalman, *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*, Research Institute for Advanced Study, Baltimore, Md., March 1960.
3. Feng Li, *Interference Cancellation Using Space- Time Processing and Precoding Design*, Department of Operations Research and Information Engineering, Cornell University, Springer, USA, 2013
4. Has Li, Hongwei Wang, Kaiyu Wang, Tongue Qu, Xunhuan Red, Jun Ma, *An energy efficient clustering algorithm based on density and fitness for mobile crowd- sensing network*, Journal of Engineering Research, Elsevier
5. Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Sköld, *4G, LTE- Advanced Pro and The Road to 5G*, 3rd edition, Elsevier, 2016
6. Fan Liu, Yuanhao Cui, Christos Masouros, Jie Xu, Tony Xiao Han, Yonina C. Eldar, Stefano Buzzi, *Intergrated Sensing and Communications: Towards Dual- functional Wireless Networks for 6G and Beyond*, 16 August 2021
7. Lei Xie, Peilan Wang, S.H Song, Khaled B. Letaief, *Perceptive Mobile Network with Distributed Target Monitoring Terminals: Leaking Communication Energy for Sensing*, 19 April 2022
8. Lei Xie, S.H. Song, Yonina C. Eldar, Khaled B. Letaief, *Collaborative Sensing in Perceptive Mobile Networks: Opportunities and Challenges*, 31 May 2022
9. Guanine Wu, Yuan Fang, Jie Xu, Zhiyong Feng, Shuguang Cui, *Energy- Efficient MIMO Integrated Sensing and Communications with On-Off Non- transmission Power*, 27 June 2023
10. Nuria Gonsalez- Prelcic, Musa Furkan Keskin, Ossi Kaltiokallio, Mikko Valkana, Davide Dardari, Xiao Shen, Yuan Shen, Murat Bayraktar, Henk Wymeersch, *The Intergrated Sensing and Communication Revolution for 6G: Vison, Techniques, and Applications*, 3 May 2024
11. Yaqui Wang, Meixia Tao, Shu Sun, *Cramer- Rao Bound Analysis and Beamforming Design for Intergrated Sensing and Communication with Extended Targets*, 4 June 2024
12. Peishi Li, Ming Li, Rang Liu, Qian Liu, A.Lee Swindlehurst, *MIMO- OFDM ISAC Waveform Design for Range- Doppler Sideline Suppression*, 25 June 2024

13. AbdelHamid Salem, Kai- Kit Wong, Chan- Byoung Chae, Yangyang Zhang, *Modeling and Design of RIS-Assisted Multi-cell Multi-band Networks with RSMA*, 4 August 2024
14. Aaron Young, Nevindu M. Batagoda, Harry Zhang, Akshat Dave, Adithya Pediredla, Dan Negrut, Ramesh Raskar, *Enhancing Autonomous Navigation by Imaging Hidden Objects using Single-Photon LiDAR*, 4 October 2024
15. Jiaqi Zou, Songlin Sun, Christos Masouros, Yuanhao Cui, Ya-Feng Liu, Derrick Wing Kwan Ng, *Energy-Efficient Beamforming Design for Integrated Sensing and Communications Systems*, 8 July 2023
16. Fan Liu, Christos Masouros, Yonina C. Eldar, *Intergrated Sensing and Communications*, Springer, Singapore 2023
17. Jie Yang, Xi Yang, Chao-Kai Wen, and Shi Jin, *Integrated Sensing and Communication with Multi-Domain Cooperation*, 7 May 2021
18. Wen-Qin Wang , Zhi Zheng , and Shunsheng Zhang, *OFDM Chirp Waveform Diversity For Co-Designed Radar-Communication System*, China
19. Claude Oestges , Bruno Clerckx – MIMO Wireless Communication _From Real-World Propagation to Space-Time Code Design 4 June 2007
20. Xu Liu , Hongliang Zhang , Meta-Backscatter: A New ISAC Paradigm for Battery-Free Internet of Things September 2024
21. Jiang Wangjun , Wei Zhiqing , Feng Zhiyong and Chen Xu , ISAC Enabled Sensing Base Station : System Design , Beamforming , Interference Cancellation and Performance Analysis
22. Mudassir Masood : Efficient Beamforming Design for Cell-Free Integrated Sensing and Communication Systems