



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

Διαδίκτυο των Πραγμάτων: Ευφυή Περιβάλλοντα σε Δίκτυα Νέας Γενιάς

**Ενοποίηση Συστημάτων Επικοινωνίας και Ανίχνευσης στα
Δίκτυα 6^{ης} Γενιάς (6G)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΜΑΥΡΟΔΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

Επιβλέπων : Σκούτας Δημήτριος, Αν. Καθηγητής

Μέλη εξεταστικής επιτροπής:

Σκιάνης Χαράλαμπος, Καθηγητής

Κορμέντζας Γεώργιος, Καθηγητής

Σάμος, Φεβρουάριος 2025

Πρόλογος και ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη ραγδαία εξελισσόμενη τεχνολογία των Joint Communications and Sensing (JCaS), η οποία αποτελεί μια καινοτόμο προσέγγιση για την ενοποίηση των συστημάτων επικοινωνίας και ανίχνευσης σε ένα κοινό πλαίσιο. Η ανάπτυξη των JCaS τεχνολογιών έχει καταστεί ιδιαίτερα σημαντική με την εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας από το 1G στο 5G και τη σταδιακή μετάβαση στα δίκτυα έκτης γενιάς (6G). Το JCaS υπόσχεται να επαναπροσδιορίσει τη διαχείριση του φάσματος, να ενισχύσει την αποδοτικότητα των πόρων και να εισαγάγει νέες εφαρμογές σε τομείς όπως το Internet of Things (IoT), τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAVs), και η μηχανική μάθηση. Η εργασία αυτή αποτελεί μια συστηματική προσέγγιση στη μελέτη των JCaS τεχνολογιών. Ξεκινά με μια ιστορική αναδρομή της εξέλιξης των δικτύων και τις προοπτικές της έκτης γενιάς, αναλύοντας τις βασικές διαφορές μεταξύ επικοινωνίας και ανίχνευσης. Στη συνέχεια, εστιάζει σε τεχνολογικές εφαρμογές, όπως το Joint Radar and Communication (JRaC), την ενσωμάτωση της μηχανικής μάθησης και τη χρήση JCaS σε UAVs. Η μελέτη ολοκληρώνεται με μια συνολική επισκόπηση, συμπεράσματα και μελλοντικές κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα στον τομέα.

Η ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς τη βοήθεια και τη στήριξη πολλών ανθρώπων, στους οποίους οφείλω βαθιά ευγνωμοσύνη. Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Σκούτα Δημήτριο, για την πολύτιμη καθοδήγηση, την επιστημονική του υποστήριξη και την ενθάρρυνση σε κάθε στάδιο αυτής της έρευνας. Η εμπειρία του και οι χρήσιμες παρατηρήσεις του υπήρξαν καθοριστικές για την ολοκλήρωση της εργασίας. Επιπλέον, ευχαριστώ την οικογένειά μου για την αμέριστη στήριξή τους, την υπομονή τους και την κατανόησή τους κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Η υποστήριξή τους ήταν το θεμέλιο που μου επέτρεψε να συνεχίσω με αυτοπεποίθηση. Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους και συναδέλφους μου, οι οποίοι συνέβαλαν με ιδέες, συζητήσεις και ενθάρρυνση, καθιστώντας αυτή τη διαδικασία πιο δημιουργική και ευχάριστη.

© 2025

του

ΜΑΥΡΟΔΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Πίνακας περιεχομένων

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ JOINT COMMUNICATIONS AND SENSING (JCAS)	14
1.1	Αντικείμενο διπλωματικής.....	14
1.2	Εξέλιξη των Δικτύων από 1G σε 6G	15
1.3	Η προοπτική των Δικτύων έκτης γενιάς 6G.....	18
1.3.1	Τεχνολογία πολλαπλών κεραιών	19
1.3.2	Αναδιαμορφώσιμες Έξυπνες Ανακλαστικές Επιφάνειες	20
1.3.3	Νέα χρήση φάσματος και σχεδιασμός ραδιοσυχνοτήτων	21
1.3.4	Σύστημα Ασύρματης, Εντός Ζώνης, Αμφίδρομης Επικοινωνίας.....	22
1.3.5	Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης και Διαμόρφωσης	23
1.4	Διαφορές μεταξύ Επικοινωνίας και Ανίχνευσης	27
1.4.1	Δίκτυα Δεδομένων.....	29
1.4.2	Ραντάρ στα Δίκτυα 6G	30
1.4.3	Light Detection and Ranging - LIDAR	30
1.4.4	Μικροκυματικοί Αισθητήρες.....	32
1.5	Ο ρόλος των JCaS στα μελλοντικά δίκτυα 6G.....	33
1.5.1	Ο Ρόλος του JCaS στην Ενίσχυση της Αποδοτικότητας του Φάσματος	33
1.5.2	Υψηλή Ακρίβεια Τοποθέτησης και Εφαρμογές σε Αυτόνομα Συστήματα	33
1.5.3	Ενίσχυση του Διαδικτύου των Πάντων (IoE)	34
1.5.4	Ενίσχυση της Ασφάλειας και της Ιδιωτικότητας των Δικτύων.....	34
1.5.5	Εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) και Προσαρμοστικότητα των Δικτύων.....	35
1.5.6	Υποστήριξη Καινοτόμων Υπηρεσιών και Εφαρμογών	35
1.5.7	Βιομηχανικές Εφαρμογές και Υγειονομική Περίθαλψη.....	35
1.6	Εφαρμογές JCaS σε IoT Συστήματα	37
1.6.1	Έξυπνες Πόλεις	37
1.6.2	Αυτόματα Οχήματα	37
1.6.3	Έξυπνα Σπίτια	38
1.6.4	Υγειονομική Περίθαλψη	39
1.6.5	IoT στις Βιομηχανίες	39
2	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ JOINT COMMUNICATIONS AND SENSING	40
2.1	Κατηγορίες των JCaS Συστημάτων.....	47
2.1.1	Συνεργατικά JCaS Συστήματα.....	47

2.1.2	Ανεξάρτητα JCaS Συστήματα	47
2.1.3	Υβριδικά JCaS Συστήματα	48
2.2	Code-Division Orthogonal Frequency-Division Multiplex σε JCaS Συστήματα	48
2.2.1	Τι προσφέρει η CD-OFDM σε JCaS Συστήματα;	48
2.2.2	Λειτουργία CD-OFDM	49
2.2.3	Πλεονεκτήματα CD-OFDM σε JCaS Συστήματα	49
2.2.4	Προκλήσεις CD-OFDM σε JCaS Συστήματα	50
2.2.5	Βασικές Ιδιότητες του CD-OFDM σε JCS Συστήματα	50
2.2.6	Ταυτόχρονη λειτουργία επικοινωνίας και ανίχνευσης	51
2.3	Orthogonal Time-Frequency Space σε JCaS Συστήματα	55
2.3.1	Τι προσφέρει η OTFS σε JCaS Συστήματα;	55
2.3.2	Λειτουργία OTFS	56
2.3.3	Πλεονεκτήματα OTFS σε JCaS Συστήματα	56
2.3.4	Προκλήσεις OTFS	57
2.4	Χρήση Multiple-Input and Multiple-Output σε JCaS Συστήματα	57
2.4.1	Η Ενσωμάτωση JCAS και MIMO	61
3	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ JOINT RADAR AND COMMUNICATION	64
3.1	Συνύπαρξη ραντάρ και επικοινωνιών	64
3.2	Dual-Functional Radar-Communication (DFRC)	66
3.2.1	Τεχνολογίες Ραντάρ: CW και Παλμικό Ραντάρ:	67
3.2.2	Κυματομορφές DFRC: Συνδυάζοντας Ραντάρ και Επικοινωνίες	68
3.2.3	Επικοινωνία και Ανίχνευση σε Περιβάλλοντα με Πολλαπλούς Στόχους	70
4	JOINT COMMUNICATION AND SENSING ΚΑΙ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΗ	72
4.1	Πλεονεκτήματα του JCaS με UAVs	73
4.1.1	Βελτίωση Κάλυψης και Ποιότητας Υπηρεσιών	73
4.1.2	Συνεργασία Πολλαπλών UAVs	74
4.1.3	Μειωμένο Κόστος Υποδομής	75
4.2	Τεχνικές Προκλήσεις	75
4.2.1	Σχεδιασμός Πορείας και Κατανομή Πόρων	75
4.2.2	Παρεμβολές και Ασφάλεια	77
4.2.3	Πολυπλοκότητα Υπολογισμών	78
4.3	Εφαρμογές	79

4.3.1	Επιτήρηση και Ασφάλεια.....	79
4.3.2	Καταστροφές και Αντιμετώπιση Έκτακτων Αναγκών.....	80
4.3.3	Έξυπνες Πόλεις	82
4.3.4	Συνεργασία UAVs για Βελτιστοποίηση Κάλυψης.....	83
5	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΑΘΗΣΗΣ ΣΕ JCAS ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	85
5.1.1	Οι Προκλήσεις της Ενοποίησης Συστήματος.....	85
5.1.2	Ο Ρόλος της Μηχανικής Μάθησης	86
5.1.3	Σημασία της Μηχανικής Μάθησης για το Μέλλον των JCAS	86
5.2	Αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης για Επεξεργασία Δεδομένων	87
5.2.1	Βασικές Κατηγορίες Αλγορίθμων	87
5.3	Επεξεργασία Δεδομένων σε Συστήματα JCAS	91
5.3.1	Πολυπλοκότητα Σημάτων και Παρεμβολές	91
5.4	Συγχώνευση Δεδομένων από Πολλαπλές Πηγές.....	92
5.5	Χρήση Μηχανικής Μάθησης για Επεξεργασία Σήματος.....	93
5.5.1	Εργαλεία και Τεχνικές Μηχανικής Μάθησης για Επεξεργασία Σήματος	94
5.6	Παραδείγματα Εφαρμογής	96
5.6.1	Οπτική Αναπαράσταση και Διαγράμματα Εφαρμογών	96
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		99

Λίστα Σχημάτων

Εικόνα 1	Βασικά χαρακτηριστικά ασύρματων δικτύων 1G έως 5G	18
Εικόνα 2	Διάγραμμα που απεικονίζει την περιοχή των δικτύων 6G	19
Εικόνα 3	Reconfigurable intelligent reflecting surfaces	21
Εικόνα 4	Βασική ιδέα σε IBFD συστήματα	23
Εικόνα 5	Διάγραμμα που απεικονίζει Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης και Διαμόρφωσης	24
Εικόνα 6	Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας με δυνατότητα ανίχνευσης και επικοινωνίας	28
Εικόνα 7	Διάγραμμα που απεικονίζει τον ρόλο του JCaS στα 6G δίκτυα	36
Εικόνα 8	Διάγραμμα τεχνικών JCaS συστημάτων	40
Εικόνα 9	Εφαρμογή JCaS σε διαφορετικά περιβάλλοντα	43
Εικόνα 10	Ροή λειτουργίας ενός συστήματος JCAS με βάση Code Division OFDM	53
Εικόνα 11	Σύστημα MIMO με πολλαπλές κεραίες στον πομπό (Tx) και τον δέκτη (Rx)	58
Εικόνα 12	Η Αρχιτεκτονική του Συστήματος JCAS Multi-User MIMO	63
Εικόνα 13	JCaS και μη επανδρωμένα αεροσκάφη Uav's	72
Εικόνα 14	Εκπαίδευση ενός CNN για την αναγνώριση αντικειμένων σε δεδομένα ραντάρ	87
Εικόνα 15	Χρήση SVM για την ταξινόμηση ανακλώμενων σημάτων σε κινητά ή σταθερά αντικείμενα	88
Εικόνα 16	Διάγραμμα Ομαδοποίησης Δεδομένων με K-means Clustering	89
Εικόνα 17	Διάγραμμα Βελτιστοποίησης Beamforming με Ενισχυτική Μάθηση	90
Εικόνα 18	Τρισδιάστατο μοντέλο περιβάλλοντος από δεδομένα ανίχνευσης	91
Εικόνα 19	Διάγραμμα Λειτουργίας JCaS με Εφαρμογές ML	97
Εικόνα 20	Διάγραμμα Ανάλυσης Δεδομένων Υψηλής Πυκνότητας μέσω Super-Resolution	98
Εικόνα 21	Διάγραμμα Εκτίμησης Δυναμικής Καναλιών μέσω RNN	98

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1	Σύγκριση MIMO και Massive MIMO	20
Πίνακας 2	Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα του MIMO	60

Ακρωνύμια

ΑΚΡΩΝΥΜΙΟ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
4G	Fourth Generation
5G	Fifth Generation
6G	Sixth Generation
ADC	Analog to Digital Converter
AI	Artificial Intelligence
AR	Augmented Reality
BS	Base Station
CD-OFDM	Clustered Dense Orthogonal Frequency Division Multiplexing
CDMA	Code-Division Multiple Access
CNN	Convolutional Neural Network
CP	Cyclic Prefix
CRB	Cramér-Rao Bound
CW	Continuous Wave
DAC	Digital to Analog Converter
DFRC	Dual-Functional Radar-Communication
DSSS	Direct-Sequence Spread Spectrum
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FDD	Frequency Division Duplex
FFT	Fast Fourier Transform
FM	Frequency Modulation
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave
FSO	Free Space Optical
GANs	Generative Adversarial Networks
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GNNs	Graph Neural Networks
GSM	Global System for Mobile Communications ;
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access

HSPA	High-Speed Packet Access
IBFD	In-Band Full Duplex
ICSI	Interference Channel State Information
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
INR	Interference-to-Noise Ratio
IoE	Internet of Everything
IoT	Internet of Things
JCaS	Joint Communications and Sensing
JRaC	Joint Radar and Communication
LiDAR	Light Detection and Ranging
LDS	Low Density Spreading
LFM	Linear Frequency Modulation
LOS	Line of Sight
LS	Least Squares
ML	Machine Learning
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMSE	Minimum Mean Squared Error
mmWave	Millimeter-Wave
MRC	Maximum Ratio Combining
MU-MIMO	Multi-User MIMO
MUSA	Multi-User Shared Access
NFV	Network Function Virtualization
NLOS	Non-Line of Sight
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
OCC	Optical Camera Communication
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OTFS	Orthogonal Time Frequency Space
PC	Pulse Compression
PDMA	Pattern Division Multiple Access
PIM	Pulse Interval Modulation
PRB	Physical Resource Block
PU	Primary User

RF	Radio Frequency
RIS	Reconfigurable Intelligent Surfaces
RNNs	Recurrent Neural Networks
Rx	Receiver
SCMA	Sparse Code Multiple Access
SDMA	Spatial Division Multiple Access
SDN	Software-Defined Networking
SIC	Successive Interference Cancellation
SINR	Signal-to-Interference-and-Noise Ratio
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SU	Secondary User
SVM	Support Vector Machine
TD	Time Division
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
THz	Terahertz
TWT	Target Wake Time
Tx	Transmitter
UAVs	Unmanned Aerial Vehicles
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2P	Vehicle-to-Pedestrian
V2V	Vehicle-to-Vehicle
V2X	Vehicle-to-Everything
VLC	Visible Light Communication
VR	Virtual Reality
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει το Joint Communications and Sensing (JCaS), μια πρωτοποριακή τεχνολογία που ενοποιεί τις λειτουργίες επικοινωνίας και ανίχνευσης, προσφέροντας νέες δυνατότητες για τα σύγχρονα και μελλοντικά δίκτυα. Η μελέτη ξεκινά με μια αναδρομή στην εξέλιξη των δικτύων από την πρώτη γενιά (1G) έως την πέμπτη (5G) και εξετάζει τις προοπτικές της έκτης γενιάς (6G), εστιάζοντας στον ρόλο των JCaS τεχνολογιών ως κρίσιμου στοιχείου για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και τη μείωση της φασματικής συμφόρησης. Αναλύονται οι διαφορές μεταξύ επικοινωνίας και ανίχνευσης και περιγράφεται πώς οι JCaS εφαρμογές ενισχύουν το IoT μέσω έξυπνων και συνεργατικών δικτύων.

Η εργασία εστιάζει επίσης σε τεχνολογίες αιχμής που υποστηρίζουν τα JCaS συστήματα, όπως οι κυματομορφές CD-OFDM και OTFS, καθώς και η χρήση MIMO τεχνολογιών για την ταυτόχρονη υποστήριξη πολλαπλών λειτουργιών. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στο σχεδιασμό των Joint Radar and Communication (JRaC) συστημάτων, που συνδυάζουν ανίχνευση και επικοινωνία σε κοινή πλατφόρμα, καθώς και στη χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAVs) ως κινητές μονάδες JCaS. Τέλος, παρουσιάζεται η εφαρμογή τεχνικών μηχανικής μάθησης για την επεξεργασία δεδομένων και σημάτων, ενισχύοντας την αυτονομία και την αποδοτικότητα των JCaS συστημάτων.

Η εργασία καταλήγει με μια συνολική επισκόπηση, όπου συνοψίζονται οι βασικές τεχνολογίες και εφαρμογές, ενώ προτείνονται μελλοντικές κατευθύνσεις για την περαιτέρω ανάπτυξη των JCaS.

Λέξεις Κλειδιά: Joint Communications and Sensing, JCaS, 6G Δίκτυα, MIMO, CD-OFDM, OTFS, Μηχανική Μάθηση, UAVs, IoT, Joint Radar and Communication.

Abstract

This thesis examines the emerging field of Joint Communications and Sensing (JCaS), a groundbreaking technology that integrates communication and sensing functionalities into a unified framework. The study begins with an overview of the evolution of networks from the first generation (1G) to the fifth generation (5G) and explores perspectives on sixth-generation (6G) networks, focusing on the role of JCaS technologies in addressing spectrum congestion and enhancing resource efficiency. It discusses the differences between communication and sensing, highlighting how JCaS applications improve IoT systems through intelligent and cooperative networks.

The thesis further explores state-of-the-art technologies that support JCaS systems, such as CP-OFDM and OTFS waveforms, along with MIMO technologies that enable simultaneous support for multiple functions. Special emphasis is placed on the design of Joint Radar and Communication (JRaC) systems, which integrate detection and communication into a shared platform, as well as the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) as mobile JCaS units. Additionally, the application of machine learning techniques for data and signal processing is examined, demonstrating how these approaches enhance the autonomy and efficiency of JCaS systems. The thesis concludes with a comprehensive summary of key technologies and applications, along with proposed future directions for advancing JCaS.

Keywords: Joint Communications and Sensing, JCaS, 6G Networks, MIMO, CD-OFDM, OTFS, Machine Learning, UAVs, IoT, Joint Radar and Communication.

1

Εισαγωγή στο Joint Communications and Sensing (JCaS)

Το Joint Communications and Sensing (JCaS) αποτελεί μια καινοτόμο τεχνολογία που συνδυάζει την επικοινωνία δεδομένων με την ανίχνευση και παρακολούθηση αντικειμένων μέσω αισθητήρων. Στόχος της είναι η βελτίωση της απόδοσης των δικτύων και η δημιουργία νέων εφαρμογών και υπηρεσιών. Η ενσωμάτωση αυτών των δύο λειτουργιών επιτρέπει την αποδοτικότερη χρήση των διαθέσιμων πόρων, ενώ παράλληλα βελτιώνει την ακρίβεια και την αξιοπιστία τόσο των επικοινωνιών όσο και των λειτουργιών ανίχνευσης καθώς και της εξοικονόμησης ενέργειας. Αυτή η διασύνδεση τεχνολογιών αναμένεται να ανοίξει νέους ορίζοντες στις τηλεπικοινωνίες και την ανίχνευση, οδηγώντας σε σημαντικές προόδους σε τομείς όπως οι έξυπνες πόλεις, τα αυτόνομα οχήματα και οι ασύρματες βιομηχανικές εφαρμογές. Στόχος της τεχνολογίας αυτής είναι η ενσωμάτωση της επικοινωνίας και της ανίχνευσης στους ίδιους κόμβους μετάδοσης/λήψης.

1.1 Αντικείμενο διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως κύριο στόχο την ανάλυση και τη μελέτη των τεχνολογιών Joint Communications and Sensing (JCaS) και της εφαρμογής τους στα μελλοντικά δίκτυα, με έμφαση στις δυνατότητες που προσφέρουν για την επίτευξη αποδοτικότητας και την εξοικονόμηση πόρων. Σκοπός είναι η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο η συνδυασμένη επικοινωνία και ανίχνευση μπορεί να ενισχύσει την απόδοση των δικτύων και να ανοίξει νέους δρόμους για την ανάπτυξη καινοτόμων εφαρμογών σε τομείς όπως οι έξυπνες πόλεις, τα αυτόνομα οχήματα και η ασύρματη βιομηχανία.

Πιο συγκεκριμένα, οι στόχοι της διπλωματικής είναι οι εξής:

1. **Μελέτη της εξέλιξης των δικτύων και της προοπτικής τους με την ενσωμάτωση JCaS τεχνολογιών:**
 - Ανάλυση της εξέλιξης των δικτύων από 1G έως 5G και η εκτίμηση του τρόπου με τον οποίο τα JCaS μπορούν να επηρεάσουν τη μετάβαση στη 6η γενιά (6G).
 - Εξέταση του ρόλου της τεχνολογίας JCaS στη βελτίωση της αποδοτικότητας των δικτύων και στη μείωση της συμφόρησης του φάσματος.
2. **Διερεύνηση των βασικών τεχνολογιών που στηρίζουν τα JCaS συστήματα:**
 - Εμβάθυνση στις τεχνολογίες όπως το CD-OFDM και OTFS για την υποστήριξη της επικοινωνίας και ανίχνευσης σε κοινές πλατφόρμες.

- Εξέταση της χρήσης τεχνολογίας MIMO για την ταυτόχρονη υποστήριξη πολλαπλών λειτουργιών και την αύξηση της αποτελεσματικότητας των συστημάτων JCaS.

3. Μελέτη και ανάλυση των Joint Radar and Communication (JRaC) συστημάτων:

- Εξερεύνηση των προκλήσεων που προκύπτουν από την ενοποίηση ανίχνευσης και επικοινωνίας σε κοινή πλατφόρμα.
- Προτάσεις για τη βελτίωση του σχεδιασμού αυτών των συστημάτων και των δυνατοτήτων τους σε σύγκριση με τα παραδοσιακά διαχωρισμένα συστήματα.

4. Αξιολόγηση των εφαρμογών JCaS σε μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAVs):

- Ανάλυση του τρόπου με τον οποίο τα UAVs μπορούν να ωφεληθούν από τις δυνατότητες της τεχνολογίας JCaS για την αυτονομία και την ευφυΐα τους.
- Σχεδιασμός και μελέτη εφαρμογών σε περιβάλλοντα όπου τα UAVs αναλαμβάνουν ρόλους όπως η παρακολούθηση ή η απομακρυσμένη επικοινωνία.

5. Εφαρμογή τεχνικών μηχανικής μάθησης για την επεξεργασία δεδομένων και σημάτων:

- Διερεύνηση της χρήσης αλγορίθμων μηχανικής μάθησης για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των συστημάτων JCaS.
- Εξέταση της χρήσης μηχανικής μάθησης για την επεξεργασία σήματος και την ανάλυση των δεδομένων από τα συστήματα επικοινωνίας και ανίχνευσης.

1.2 Εξέλιξη των Δικτύων από 1G σε 6G

Η κινητή επικοινωνία αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις της σύγχρονης εποχής. Από το 1980, περίπου κάθε δεκαετία εμφανίζεται μια νέα γενιά ασύρματων επικοινωνιακών δικτύων. Ξεκινώντας με τα δίκτυα πρώτης γενιάς 1G (First Generation) που παρέχουν μόνο φωνητικές υπηρεσίες, τα δίκτυα δεύτερης γενιάς (2G) εισήγαγαν τα SMS, ενώ τα δίκτυα τρίτης γενιάς (3G) εγκαθίδρυσαν τη δυνατότητα πρόσβασης στο διαδίκτυο μέσω κινητών συσκευών με ταχύτητες που ήταν αρκετά υψηλές για να υποστηρίξουν την περιήγηση στο διαδίκτυο. Τα δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G) βελτίωσαν δραματικά την ταχύτητα και την ποιότητα των υπηρεσιών δεδομένων, υποστηρίζοντας εφαρμογές όπως η ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας. Η τεχνολογία των δικτύων πέμπτης γενιάς (5G) έχει πράγματι επαναστατήσει στα δίκτυα επικοινωνιών τα τελευταία χρόνια, αντιμετωπίζοντας με επιτυχία την αυξανόμενη ζήτηση για δεδομένα λόγω των πολλαπλών συνδέσεων των συσκευών στο διαδίκτυο και του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT). Η εισαγωγή της τεχνολογίας αυτής έχει επιτρέψει σημαντική αύξηση της χωρητικότητας και της ταχύτητας των δικτύων, ενισχύοντας την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία της μεταφοράς δεδομένων. Βασιζόμενοι στην εξέλιξη και την επέκταση του 5G, τα δίκτυα έκτης γενιάς (6G) θα βελτιωθούν περαιτέρω, παρέχοντας έως και 100 φορές μεγαλύτερη απόδοση, υψηλότερη χωρητικότητα συστήματος, μεγαλύτερη αποδοτικότητα φάσματος, χαμηλότερη

καθυστέρηση και ευρύτερη κάλυψη. Το 6G αναμένεται να προσφέρει ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων της τάξης των 1 Tbps, πολύ υψηλότερες από αυτές του 5G. Αυτό θα επιτρέψει την άμεση μεταφορά μεγάλων αρχείων και την υποστήριξη εφαρμογών που απαιτούν τεράστιο εύρος ζώνης, όπως η μετάδοση βίντεο υψηλής ανάλυσης.

Τα δίκτυα πρώτης γενιάς (1G), εισήχθησαν τη δεκαετία του 1970. Τα δίκτυα αυτά είναι ένα απλό αναλογικό σύστημα με ταχύτητες δεδομένων έως 2.4 kbps, τα οποία χρησιμοποιούνται για φωνητικές συνομιλίες. Χρησιμοποιεί εύρος ζώνης 30 kHz και τεχνολογίες FDMA (Frequency Division Multiple Access) οι οποίες παρέχουν την δυνατότητα διαίρεσης του διαθέσιμου εύρους ζώνης σε μικρότερα κανάλια κάθε ένα από τα οποία χρησιμοποιείται από κάθε χρήστη ξεχωριστά. Με την εξέλιξη των δικτύων πρώτης γενιάς (1G) επήλθε η πρώτη μεγάλη τεχνολογική επανάσταση λόγω ότι η περιοχή κάλυψης από τον BS (Base Station) διαιρείται σε μικρότερα κελιά με αποτέλεσμα την επαναχρησιμοποίηση των ίδιων συχνοτήτων, ως συνέπεια να υπάρχουν έντονες παρεμβολές στο σύστημα. Στα δίκτυα πρώτης γενιάς (1G), η FM (Frequency Modulation) χρησιμοποιήθηκε για τη διαμόρφωση της φωνής κατά τη διάρκεια των φωνητικών κλήσεων. Η FM επέτρεψε τη μετάδοση της φωνής με καθαρότητα και μειωμένο θόρυβο, καθιστώντας την ιδανική για τις αναλογικές φωνητικές υπηρεσίες. Παρόλα αυτά, τα δίκτυα πρώτης γενιάς (1G) έχουν πολλές αδυναμίες, όπως [4]:

1. **Έλλειψη κρυπτογράφησης:** Λόγω της αναλογικής διαμόρφωσης, η ποιότητα και η ασφάλεια των επικοινωνιών είναι χαμηλή.
2. **Περιορισμένοι χρήστες:** Η χρήση της τεχνολογίας FDMA περιορίζει τον αριθμό των χρηστών.
3. **Μόνο φωνητικές υπηρεσίες:** Υποστήριξη μόνο για φωνητικές υπηρεσίες χωρίς δυνατότητες μεταφοράς δεδομένων.

Τα δίκτυα δεύτερης γενιάς (2G), Το Global System for Mobile Communications (GSM), εισήχθη τη δεκαετία του 1990 και ήταν το πρώτο σύστημα δεύτερης γενιάς (2G). Το GSM είναι ένα απλό ψηφιακό κυψελωτό σύστημα που χρησιμοποιεί διαμόρφωση Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) και τεχνολογία μετάδοσης Time Division Multiple Access (TDMA) με εύρος ζώνης 200 KHz για φωνητικές επικοινωνίες. Η GMSK είναι η βασική τεχνολογία διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται στα συστήματα GSM, επιτρέποντας την αξιόπιστη μετάδοση φωνής και δεδομένων μέσω ασύρματων δικτύων μειώνοντας το εύρος ζώνης του σήματος και βελτιώνοντας την απόδοση του συστήματος. Ο κάθε χρήστη στα δίκτυα αυτά έχει την δυνατότητα να κινείται τόσο μέσα στην ίδια κυψέλη όσο και σε διαφορετική χωρίς να διακόπτεται η σύνδεση. Τα χαρακτηριστικά των δικτύων δεύτερης γενιάς (2G) περιλαμβάνουν [4]:

1. Βελτιωμένες υπηρεσίες.
2. Αυξημένη ασφάλεια δικτύου μέσω κρυπτογραφημένων αριθμών.
3. Βελτιωμένη χωρητικότητα του συστήματος.

Τα δίκτυα τρίτης γενιάς (3G), χρησιμοποιούν τεχνολογίες WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) και HSPA (High-Speed Packet Access) για να προσφέρουν γρήγορη πρόσβαση στο διαδίκτυο, καθώς και σημαντικά βελτιωμένες δυνατότητες μετάδοσης βίντεο και ήχου. Με τα

δίκτυα τρίτης γενιάς (3G) οι χρήστες έχουν την δυνατότητα να επικοινωνούν μέσω του VoIP (Voice Over Internet Protocol) με ταχύτητες που φτάνουν μέχρι και Megabit.

- **HSPA:** Συνδυάζει δύο πρωτόκολλα κινητής τηλεφωνίας, HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) και HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access), για να βελτιώσει την απόδοση των δικτύων τρίτης γενιάς (3G) χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο WCDMA.
- **WCDMA:** Η τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιείται στα δίκτυα τρίτης γενιάς (3G) για την παροχή υψηλών ταχυτήτων δεδομένων και βελτιωμένων δυνατοτήτων φωνητικής επικοινωνίας και πολυμέσων. Αποτελεί τη βάση για πολλά 3G δίκτυα, όπως αυτά που υποστηρίζονται από το πρότυπο UMTS (Universal Mobile Telecommunications System).

Συνολικά, η τρίτη γενιά κινητής επικοινωνίας (3G) σημείωσε σημαντική πρόοδο στις ταχύτητες δεδομένων και τις δυνατότητες πολυμέσων σε σύγκριση με τις προηγούμενες γενιές, προετοιμάζοντας το έδαφος για τις ακόμα πιο εξελιγμένες τεχνολογίες δικτύων τέταρτης γενιάς (4G) [1], [4].

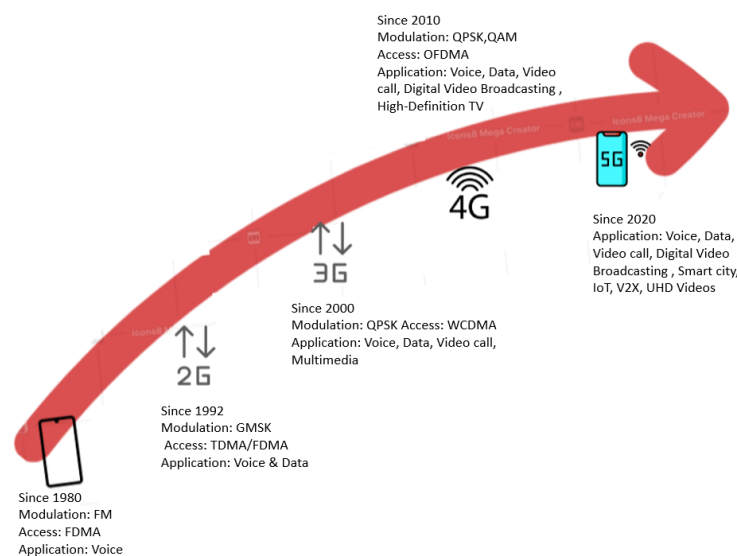
Τα δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G), Η τεχνολογία LTE (Long Term Evolution) είναι μια τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης που βασίζεται στην OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την χρήση MIMO (Multiple Input and Multiple Output), που αυξάνει τις ταχύτητες δεδομένων και βελτιώνει την ποιότητα σύνδεσης. Το LTE υποστηρίζει μεταδόσεις εύρους ζώνης μέχρι 20 MHz και μπορεί να επιτύχει ταχύτητες δεδομένων έως 100 Mbps για κινητές συσκευές. Η τεχνολογία LTE έχει επεκταθεί σε LTE Advanced (LTE-A), η οποία μπορεί θεωρητικά να επιτύχει ταχύτητες άνω του 1 Gbps, ανταποκρινόμενη στη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για κινητές ευρυζωνικές επικοινωνίες. Το σύστημα 4G βελτιώνει το τρέχον δίκτυο επικοινωνιών προσφέροντας μια ολοκληρωμένη λύση βασισμένη στο πρωτόκολλο Internet (IP). Οι βασικότερες δυνατότητες που μας προσφέρει το LTE-Advanced είναι:

- **Carrier Aggregation (CA)**
- **Δυνατότητα μετάδοσης – λήψης με MIMO (Multiple Input and Multiple Output) κεραιές**

Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G), οι τρεις βασικές υπηρεσίες που έχουν ορισθεί για τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G) από τη 3GPP (3rd Generation Partnership Project) είναι το Enhanced Mobile Broadband (EMBB) το οποίο έχει σχεδιαστεί για να παρέχει υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, καλύτερο εύρος ζώνης, υψηλότερη απόδοση προσφέροντας στον τελικό χρήστη βελτιωμένη λειτουργικότητα πολυμέσων. Το 5G μπορεί ακόμα να υποστηρίξει MMTC (Massive Machine Type Communications) και να υποστηρίξει τεχνολογίες όπως εικονική πραγματικότητα (VR - Virtual Reality), βίντεο υψηλής ευκρίνειας καθώς και επικοινωνίες σε αυτόνομα οχήματα. Το URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications) είναι καθοριστικό για εφαρμογές των δικτύων πέμπτης γενιάς (5G) τα οποία απαιτούν υψηλό ρυθμό μετάδοσης και χαμηλή καθυστέρηση. Η υπηρεσία 5G μπορεί να παρέχει ταχύτητες δεδομένων έως και 20 Gigabits ανά δευτερόλεπτο (Gb/s) καθώς

και βελτιωμένη εμπειρία χρήστη σε σύγκριση με τις υπάρχουσες υπηρεσίες 4G LTE. Οι βασικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούν τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G) είναι :

1. **Massive MIMO**: Χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές για την ταυτόχρονη αποστολή και λήψη περισσότερων δεδομένων, αυξάνοντας την απόδοση του δικτύου.
2. **UDN (Ultra Dense Networks)**: Μικρές κεραιές χαμηλής ισχύος τοποθετούνται σε πυκνοκατοικημένες περιοχές για βελτίωση της κάλυψης και της χωρητικότητας.
3. **Millimeter wave**: Χρησιμοποιούν υψηλότερες συχνότητες για μεγαλύτερες ταχύτητες δεδομένων.
4. **NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access)**: Επιτρέπει την ταυτόχρονη πρόσβαση πολλών χρηστών σε ίδιες συχνότητες, αυξάνοντας την αποδοτικότητα του φάσματος.



Εικόνα 1 Βασικά χαρακτηριστικά ασύρματων δικτύων 1G έως 5G

Η ταχεία αύξηση του αριθμού των συνδεδεμένων συσκευών και των νέων εφαρμογών, όπως η εικονική και επαυξημένη πραγματικότητα (VR), τα αυτοκίνητα χωρίς οδηγό και οι ολοκληρωμένες τρισδιάστατες επικοινωνίες, οδηγούν σε αύξηση της κίνησης δεδομένων, προκαλώντας την ανάγκη για μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης και χαμηλότερη καθυστέρηση από τα δίκτυα 5G. Αυτές οι προκλήσεις αποτελούν τους βασικούς παράγοντες για την ανάπτυξη των τεχνολογιών 6G, που αναμένεται να αναπτυχθούν έως το 2030 [1], [4].

1.3 Η προοπτική των Δικτύων έκτης γενιάς 6G

Το 6G θα αναβαθμίσει και θα επεκτείνει τις δυνατότητες του 5G, επιτυγχάνοντας έως και 100 φορές μεγαλύτερη διακίνηση δεδομένων, υψηλότερη χωρητικότητα συστήματος, μειωμένη καθυστέρηση, υψηλότερη αποδοτικότητα φάσματος, και ευρύτερη κάλυψη. Θα επιτρέψει ταχύτερη κίνηση, εξυπηρετώντας το Internet of Everything (IoE). Το 6G θα πρέπει να είναι ένα ολοκληρωμένο δίκτυο με ευρύτερη και μεγαλύτερη κάλυψη, που θα περιλαμβάνει επίγεια, δορυφορική και

επικοινωνία μικρής απόστασης συσκευής προς συσκευή. Χάρη στις προηγμένες τεχνολογίες διαχείρισης κινητών, το 6G μπορεί να εξυπηρετεί ένα ευρύ φάσμα καταστάσεων, συμπεριλαμβανομένων του εναέριου χώρου, της ξηράς και της θάλασσας, δημιουργώντας έτσι το πρώτο παγκόσμιο πανταχού παρόν ευρυζωνικό σύστημα κινητής επικοινωνίας στον κόσμο.



Εικόνα 2 Διάγραμμα που απεικονίζει την περιοχή των δικτύων 6G

Η μεγιστοποίηση του ρυθμού δεδομένων θεωρείται ο πιο σημαντικός δείκτης απόδοσης για οποιαδήποτε τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας. Βασικές τεχνολογίες που μπορούν να συμβάλλουν στην μεγιστοποίηση της απόδοσης στα δίκτυα έκτης γενιάς είναι :

1.3.1 Τεχνολογία πολλαπλών κεραιών

Αυτή η τεχνολογία αξιοποιεί τα οφέλη της τεχνολογίας beamforming το οποίο είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται στις ασύρματες επικοινωνίες και συγκεκριμένα στα δίκτυα πολλαπλών κεραιών (MIMO - Multiple Input Multiple Output). Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την εστίαση της ισχύος του σήματος σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις αντί να την εκπέμπει ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Οι αρχικές έρευνες εστιάστηκαν στις επικοινωνίες σημείου προς σημείο (point-to-point) MIMO, όπου ο πομπός και ο δέκτης έχουν πολλαπλές κεραιές για να επικοινωνούν μεταξύ τους. Σε αντίθεση με το point-to-point MIMO, στα συστήματα πολλαπλών χρηστών MIMO, εφαρμόζεται η τεχνολογία SDMA (Spatial Division Multiple Access) η οποία επιτρέπει τη διαίρεση του ίδιου φάσματος συχνοτήτων σε πολλαπλές ανεξάρτητες διαδρομές. Επιτρέποντας την εξυπηρέτηση περισσότερων χρηστών ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας το ίδιο φάσμα συχνοτήτων. Πρόσφατα, προτάθηκε μια κλίμακα εκδοχή των συστημάτων SDMA, δηλαδή το large-scale multiuser MIMO. Σε αυτά τα συστήματα, κάθε σταθμός βάσης (BS) είναι εξοπλισμένος με έναν

σχετικά μεγάλο αριθμό στοιχείων κεραιών πομπών (N), οι οποίες εξυπηρετούν έναν πολύ μικρότερο αριθμό χρηστών με μία κεραία (K) που δεν συνεργάζονται μεταξύ τους γνωστό ως Massive MIMO. Στον πίνακα 1 συνοψίζονται οι βασικές διαφορές μεταξύ των συστημάτων point-to-point MIMO και των συστημάτων massive MIMO [4].

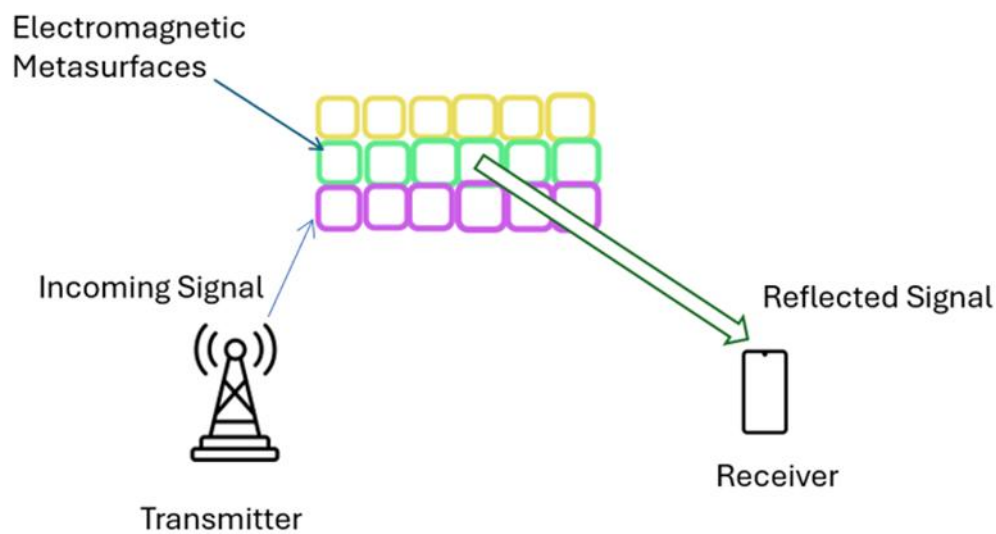
Πίνακας 1 Σύγκριση MIMO και Massive MIMO

Βασικές παράμετροι	Συμβατικά συστήματα MIMO	Συστήματα Massive MIMO
Τύπος επικοινωνίας	Σημείο προς σημείο	Σημείο προς πολλαπλά σημεία
Αριθμός κεραιών	$N \leq 8$	$N \geq 16$
Σχέση μεταξύ N και K	$N = K$	$N \gg K$
Εύρος ζώνης	Χρησιμοποιεί περισσότερο εύρος ζώνης	Βελτιωμένη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης
Περιοχή κάλυψης	Παρέχει λιγότερη κάλυψη	Παρέχει περισσότερη κάλυψη
Κεραίες στους χρήστες	Πολλαπλές κεραίες στους χρήστες	Οι χρήστες είναι εξοπλισμένοι με μία κεραία και εξυπηρετούνται ταυτόχρονα στον ίδιο χρόνο και συχνότητα
Κατανομή πόρων	Η κατανομή πόρων πρέπει να αλλάζει γρήγορα για να προσαρμοστεί στις μεταβολές του καναλιού	Η κατανομή πόρων μπορεί να προγραμματιστεί εκ των προτέρων καθώς το κανάλι μεταβάλλεται αργά

1.3.2 Αναδιαμορφώσιμες Έξυπνες Ανακλαστικές Επιφάνειες

Η μετάβαση σε υψηλότερες συχνότητες στο 6G συνοδεύεται από νέες προκλήσεις, όπως η μείωση της περιοχής κάλυψης λόγω των μικρότερων αποστάσεων επικοινωνίας, καθώς και η αύξηση της εξασθένησης του σήματος που επηρεάζει την αξιοπιστία της επικοινωνίας μεταξύ πομπού και δέκτη. Επιπλέον, λόγω της μαζικής συνδεσιμότητας των συσκευών IoT και των αισθητήρων, τα ασύρματα δίκτυα μεταβαίνουν σε υλοποιήσεις λογισμικού, όπως τα SDN (Software Defined Networking), τα οποία μπορούν να ελεγχθούν εξ αποστάσεως μέσω προγραμματιζόμενου λογισμικού. Η απαραίτητη ανάγκη να βρεθούν ευέλικτες, εφικτές και οικονομικά αποδοτικές λύσεις για την αύξηση της περιοχής κάλυψης, τη βελτίωση της αξιοπιστίας της επικοινωνίας και τη μεγιστοποίηση της φασματικής και ενεργειακής αποδοτικότητας των μελλοντικών δικτύων 6G είναι καθοριστικό ζήτημα. Για αυτό το λόγο, ένας έξυπνος αναδιαμορφώσιμος μηχανισμός μετάδοσης, γνωστός ως αναδιαμορφώσιμες έξυπνες ανακλαστικές επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces - RISs), εμφανίζεται ως μια από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες για την επί-

τευξη των προαναφερθέντων στόχων. Οι ανακλαστικές επιφάνειες είναι λεπτές δισδιάστατες επιφάνειες που μπορούν να ελέγχουν τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για να διαμορφώνουν τα κύματα με σκοπό να δημιουργούν μια παθητική δέσμη προς τον επιθυμητό τερματικό και να επιτυγχάνουν ενισχυμένο ληφθέν σήμα. Κάθε επιφάνεια περιέχει μεγάλο αριθμό χαμηλού κόστους παθητικών στοιχείων σκέδασης που μπορούν να αντανakλούν ανεξάρτητα τα εισερχόμενα σήματα προς τους επιθυμητούς χρήστες, ρυθμίζοντας ψηφιακά το πλάτος και τις φάσεις τους. Οι διακυμάνσεις πλάτους και φάσης μπορούν να βελτιστοποιηθούν για τη μεγιστοποίηση της φασματικής αποδοτικότητας ή την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας.



Εικόνα 3 Αναδιαμορφώσιμες Έξυπνες Ανακλαστικές Επιφάνειες

1.3.3 Νέα χρήση φάσματος και σχεδιασμός ραδιοσυχνοτήτων

Η ραγδαία αύξηση του αριθμού των συνδεδεμένων συσκευών στο διαδίκτυο έχει οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της κυκλοφορίας δεδομένων και σε αυξανόμενη ζήτηση για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Αυτό έχει ωθήσει τους ερευνητές να εκμεταλλευτούν αποδοτικά το διαθέσιμο φάσμα κάτω από τα 10 GHz και να μεταβούν σε υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων, όπως οι ζώνες mmWave (Millimeter-wave) και THz (Terahertz). Η συνύπαρξη διαφορετικών ζωνών συχνοτήτων στο ίδιο σύστημα είναι απαραίτητη για την υποστήριξη των ποικίλων απαιτήσεων των IoT. Οι επικοινωνίες mmWave, που κυμαίνονται από 30 έως 300 GHz, είναι χρήσιμες για τα μελλοντικά δίκτυα 6G για να ανταποκριθούν στις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, προσφέροντας ρυθμούς πολλών gigabit ανά δευτερόλεπτο (Gbit/s) για εσωτερικές και εξωτερικές σταθερές ασύρματες εφαρμογές.

Η επικοινωνία μέσω συχνοτήτων THz θεωρείται ως βασικός παράγοντας για τα δίκτυα 6G λόγω της ικανότητάς της να επιτυγχάνει εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων (έως 1 Terabit ανά δευτερόλεπτο) και να υποστηρίζει εφαρμογές με μεγάλες απαιτήσεις εύρους ζώνης. Οι επικοινωνίες THz μπορούν επίσης να ενσωματωθούν με άλλα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών για τη δημιουργία ευέλικτων υβριδικών δικτύων, όπως οι συνδυασμοί THz με συστήματα FSO (Free Space Optical) ή VLC (Visible Light Communication). Η συνεργασία THz και FSO συμβάλλει καθοριστικά στα δίκτυα 6G. Πιο συγκεκριμένα η επαναχρησιμοποίηση των υψηλών ζωνών συχνοτήτων επιφέρει πιο αποτελεσματική χρήση του φάσματος. Η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και η ασφαλής επικοινωνίας είναι σημαντικοί παράγοντες που προφέρει η FSO στα δίκτυα έκτης γενιάς. Η VLC (Visible Light Communication) είναι μια ασύρματη τεχνολογία επικοινωνίας που χρησιμοποιεί το ορατό φάσμα του φωτός για τη μετάδοση δεδομένων. Αυτή η τεχνολογία παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, ιδίως όταν ενσωματώνεται με τα δίκτυα 6G, και αντιμετωπίζει ορισμένους από τους περιορισμούς των υφιστάμενων συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας, όπως οι περιορισμοί εύρους ζώνης και το κόστος υποδομής. Η VLC λειτουργεί σε συχνότητες Terahertz εντός του ορατού φάσματος παρέχοντας εξαιρετικά μεγάλο εύρος ζώνης σε σύγκριση με την επικοινωνία μέσω ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequencies - RF).

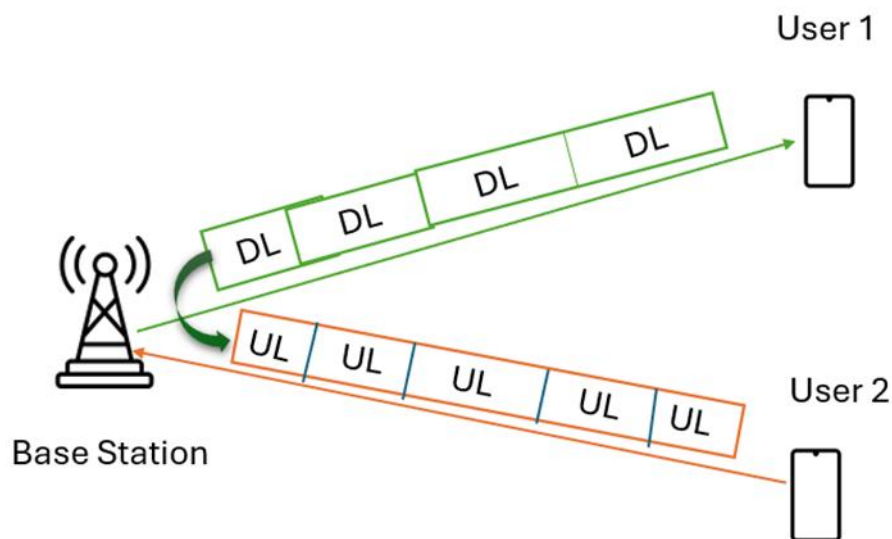
Αυτό το μεγάλο εύρος ζώνης επιτρέπει στη VLC να επιτύχει υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, φτάνοντας έως και 1 Tbps. Η VLC προσφέρει καλύτερη ασφάλεια σε σύγκριση με την επικοινωνία μέσω RF, επειδή το σήμα της περιορίζεται στην περιοχή που φωτίζεται από την πηγή φωτός. Αυτός ο φυσικός περιορισμός μειώνει τον κίνδυνο υποκλοπής και μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης. Η VLC μπορεί να ενσωματωθεί με τις υπάρχουσες τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας, όπως το Wi-Fi και το RF, για τη δημιουργία υβριδικών δικτύων. Αυτή η ενσωμάτωση ενισχύει τη χωρητικότητα του δικτύου και εξασφαλίζει απρόσκοπτη συνδεσιμότητα, καθιστώντας τη VLC κατάλληλη. Άλλη μια βέλτιστη τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας είναι η Optical camera communication (OCC) αναφέρεται στην ασύρματη επικοινωνία που χρησιμοποιεί οπτικές πηγές και κάμερες για τη μετάδοση δεδομένων.

Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιεί αισθητήρες εικόνas για τη λήψη δεδομένων από διόδους εκπομπής φωτός (LED). Η OCC μπορεί να υλοποιηθεί σε όλες τις κάμερες, όπως και σε smartphone, λόγω της δυνατότητας επεξεργασίας εικόνας που διαθέτουν. Εξετάζει τις διαθέσιμες περιοχές του φάσματος που σχετίζονται με τις υπέρυθρες για να παρέχει ασύρματη επικοινωνία δεδομένων, προσφέροντας πολύ ευρύτερες περιοχές φάσματος σε σύγκριση με τις VLC. Η **μείωση παρεμβολών** μπορεί να μετριάσει τις παρεμβολές από το φως που προέρχεται από διαφορετικές πηγές και κατευθύνσεις. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης προηγμένων φακών σε κάμερες κινητών για την απομόνωση ανεπιθύμητων σημάτων [2], [3].

1.3.4 Σύστημα Ασύρματης, Εντός Ζώνης, Αμφίδρομης Επικοινωνίας

Η IBFD (In-Band Full Duplex) είναι μια υποσχόμενη λειτουργία για τη βελτίωση του ρυθμού δεδομένων στα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα 6G. Αντί να χρησιμοποιούν τους τρέχοντες τρόπους

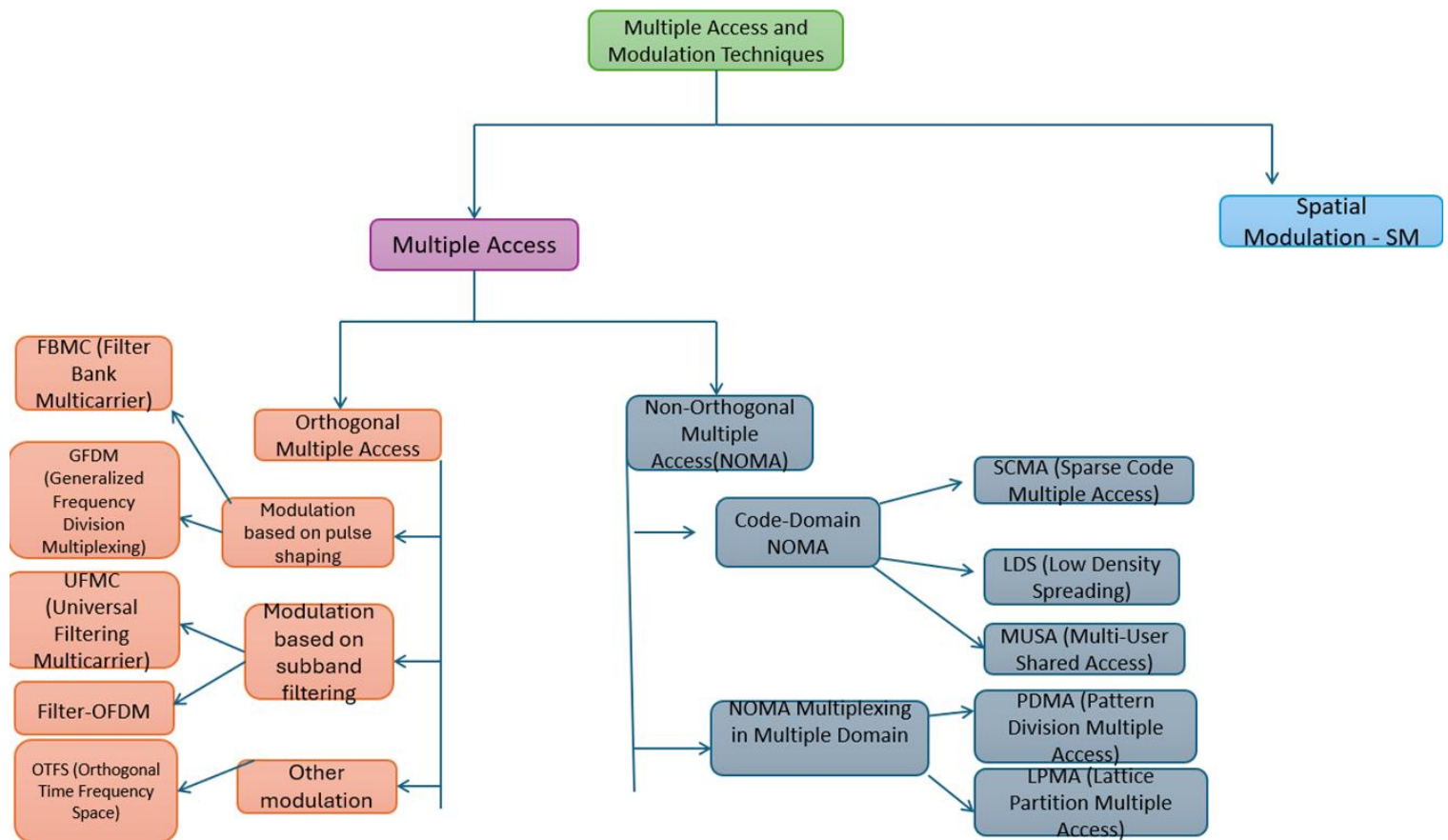
λειτουργίας της TDD (Time Division Duplex) είτε FDD (Frequency Division Duplex), η IBFD επιτρέπει τη μετάδοση και τη λήψη να πραγματοποιούνται ταυτόχρονα στην ίδια συχνότητα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε πιο αποδοτική χρήση των πόρων, μείωση της καθυστέρησης μεταξύ ανόδου (Uplink - UL) και καθόδου (Downlink - DL) και αύξηση της φασματικής αποδοτικότητας. Η IBFD έχει τη δυνατότητα να διπλασιάσει τη φασματική αποδοτικότητα επιτρέποντας τη μετάδοση και λήψη δεδομένων ταυτόχρονα στην ίδια συχνότητα. Μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις της IBFD είναι η αυτο-παρεμβολή, όπου το σήμα μετάδοσης παρεμβάλλεται με το σήμα λήψης. Η αποτελεσματική μείωση της αυτο-παρεμβολής είναι κρίσιμη για την επιτυχία της IBFD. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με χρήση της τεχνολογίας όπου οι κεραιές τοποθετούνται σε τέτοιες θέσεις που η απόσταση βοηθά στη μείωση της παρεμβολής μεταξύ εκπομπής και λήψης. Χρήση ειδικών ψηφιακών φίλτρων που επεξεργάζονται το σήμα και αφαιρούν την παρεμβολή μετά τη λήψη [3].



Εικόνα 4 Η βασική αρχή λειτουργίας των IBFD

1.3.5 Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης και Διαμόρφωσης

Οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης και διαμόρφωσης (Multiple Access and Modulation Techniques) είναι κρίσιμες για τη βελτίωση του ρυθμού δεδομένων και τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα δίκτυα 6G. Οι δύο βασικές κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης και διαμόρφωσης είναι η Πολλαπλή Πρόσβαση (Multiple Access) και η Χωρική Διαμόρφωση (Spatial Modulation).



Εικόνα 5 Διάγραμμα που απεικονίζει Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης και Διαμόρφωσης

Η Πολλαπλή Πρόσβαση χωρίζεται σε :

- **Πολλαπλή πρόσβαση με ορθογώνια διαίρεση συχνότητας (Orthogonal Multiple Access)**

Τεχνικές Διαμόρφωσης με Διαμόρφωση Παλμών:

- **FBMC (Filter Bank Multicarrier):** Είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται στις τηλεπικοινωνίες για τη μεταφορά δεδομένων μέσω πολλαπλών υποφορέων που έχουν περάσει από φίλτρα.
- **GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing):** Είναι μια τεχνική πολυπλεξίας σήματος που χρησιμοποιείται στις τηλεπικοινωνίες. Στην ουσία, συνδυάζει πολλαπλά σήματα χρησιμοποιώντας διαφορετικές φέρουσες συχνότητες στον ίδιο φυσικό κανάλι. Η GFDM αναπτύχθηκε για να αντιμετωπίσει ορισμένες προκλήσεις

που σχετίζονται με άλλες τεχνικές πολυπλεξίας, όπως η OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

Τεχνικές Πολυπλεξίας Σήματος που Χρησιμοποιούν Φιλτράρισμα Συχνοτήτων:

- **UFMC (Universal Filtering Multicarrier):** Κάθε υπο-φάσμα μπορεί να προσαρμοστεί για να είναι πιο στενό ή πιο φαρδύ ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Η κύρια ιδέα είναι ότι τα φίλτρα επιτρέπουν τη μείωση της επικάλυψης μεταξύ των φορέων συχνότητας, βελτιώνοντας την απόδοση του συστήματος στον περιορισμένο χώρο συχνοτήτων.
- **Filter-OFDM (Filtered Orthogonal Frequency Division Multiplexing):** Είναι μια βελτιωμένη παραλλαγή της τεχνικής OFDM που χρησιμοποιεί φίλτρα για την επεξεργασία των υπό-καναλιών συχνοτήτων. Η Filter-OFDM στοχεύει στην αντιμετώπιση ορισμένων αδυναμιών της κλασικής OFDM, όπως οι πλευρικές λοβοειδείς εκπομπές (side-lobes) οι οποίες είναι ανεπιθύμητες εκπομπές ισχύος που εμφανίζονται εκτός του κύριου φάσματος προκαλώντας παρεμβολές και οι παραμορφώσεις από την απώλεια ορθογωνικότητας.

Άλλες τεχνικές:

- **OTFS (Orthogonal Time Frequency Space):** Είναι μια μέθοδος διαμόρφωσης που αναπτύχθηκε για να αντιμετωπίσει τα προβλήματα διαλείψεων και παρεμβολών σε ασύρματα δίκτυα, ειδικά σε περιβάλλοντα με υψηλή κινητικότητα. Ο κύριος στόχος του OTFS είναι να εκμεταλλευτεί πλήρως την ποικιλία του καναλιού σε χρόνο και συχνότητα, προσφέροντας σταθερότερη απόδοση από άλλες τεχνικές, όπως το OFDM.
- **Μη Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση (Non-Orthogonal Multiple Access)**

Code-Domain NOMA:

- **SCMA (Sparse Code Multiple Access):** Είναι μια προηγμένη τεχνική πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιείται στις ασύρματες επικοινωνίες για την αποδοτική διαχείριση των πόρων του δικτύου. Σε αυτή την τεχνική, τα δεδομένα των χρηστών κωδικοποιούνται σε αραιοί κώδικες (sparse codes), επιτρέποντας την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών με τη χρήση των ίδιων πόρων συχνότητας και χρόνου.

- **LDS (Low Density Spreading):** Είναι μια τεχνική που χρησιμοποιεί αραιούς κώδικες διασποράς για την αποδοτική κατανομή των πόρων στις ασύρματες επικοινωνίες. Με τη μείωση της πυκνότητας εκείνων των στοιχείων που καθορίζουν που διασπείρεται η ενέργεια του σήματος στο φάσμα συχνοτήτων, το LDS επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών με λιγότερες παρεμβολές και βελτιωμένη φασματική αποδοτικότητα.
- **MUSA (Multi-User Shared Access):** Αφορά τη δυνατότητα πολλαπλών χρηστών να έχουν κοινή πρόσβαση σε ένα κοινό μέσο επικοινωνίας ή πόρο, όπως είναι το ασύρματο φάσμα συχνοτήτων ή άλλα δίκτυα επικοινωνιών. Συνήθως, αυτό αφορά συστήματα επικοινωνιών όπου πολλοί χρήστες μπορούν να μοιράζονται την ίδια φυσική ή λογική υποδομή για τη μεταφορά δεδομένων.

NOMA Multiplexing in Multiple Domain:

- **PDMA (Pattern Division Multiple Access):** Είναι μια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιείται σε ασύρματα δίκτυα για την αύξηση της φασματικής αποδοτικότητας και τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου. Το PDMA εισάγει μια νέα διάσταση στην κατανομή των πόρων χρησιμοποιώντας μοτίβα (patterns) που ορίζουν συγκεκριμένους τρόπους κατανομής των πόρων στους χρήστες. Η κατανομή των μοτίβων στους χρήστες πρέπει να γίνεται με βάση τις απαιτήσεις τους, τις συνθήκες του καναλιού και την ποιότητα της υπηρεσίας (Quality of Service - QoS) που χρειάζονται. Πρέπει να είναι προσαρμοστικά, ώστε να μπορούν να αλλάζουν δυναμικά ανάλογα με τις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου και τις ανάγκες των χρηστών [5].
- **LPMA (Lattice Partition Multiple Access):** Είναι μια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιείται σε ασύρματα δίκτυα για τη βελτίωση της απόδοσης και της αποδοτικότητας του φάσματος. Η βασική ιδέα του LPMA είναι η χρήση πλεγμάτων (lattices) για την κατανομή των πόρων στους χρήστες, επιτρέποντας την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών σημάτων σε ένα κοινό φάσμα. Τα πλέγματα είναι γεωμετρικές δομές που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των θέσεων των σημείων (σήματα) στον χώρο. Στο LPMA, τα πλέγματα χρησιμοποιούνται για την κατανομή των πόρων στους χρήστες.

- **Χωρική Διαμόρφωση (Spatial Modulation - SM)**

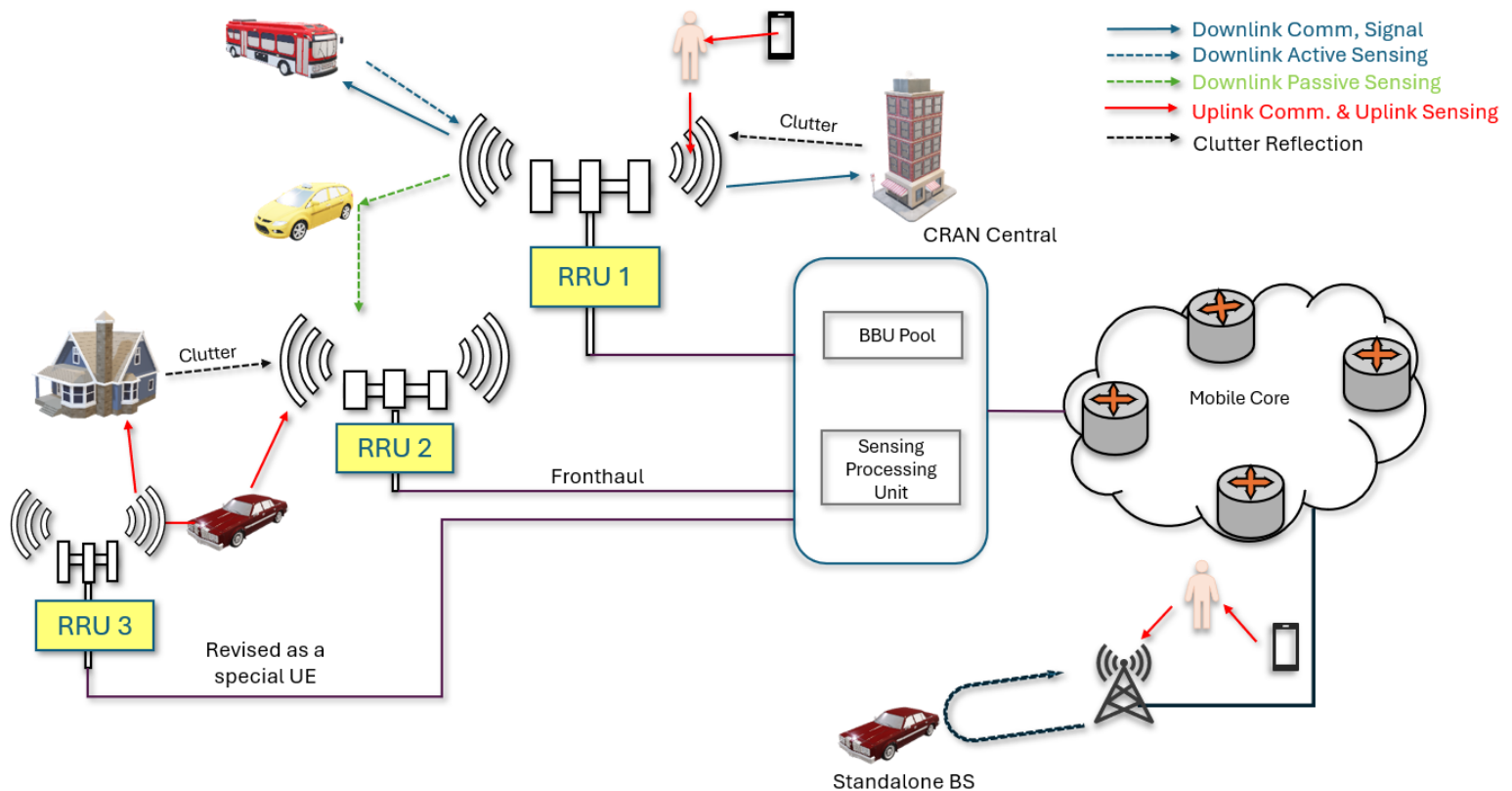
Η χωρική διαμόρφωση (Spatial Modulation - SM) είναι μια προηγμένη τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται σε ασύρματα συστήματα επικοινωνιών για να βελτιώσει την αποδοτικότητα του φάσματος και την απόδοση του συστήματος. Η βασική ιδέα πίσω από τη χωρική διαμόρφωση είναι να εκμεταλλευτεί τον αριθμό των διαθέσιμων κεραιών σε ένα σύστημα MIMO. Η χωρική διαμόρφωση αυξάνει την ποσότητα των δεδομένων που μπορούν να μεταδοθούν σε ένα δεδομένο φάσμα συχνοτήτων, βελτιώνοντας την φασματική αποδοτικότητα. Επιπλέον δεν απαιτεί την ταυτόχρονη εκπομπή από όλες τις κεραιές, μειώνοντας έτσι την πολυπλοκότητα του υλικού εκπομπής και λήψης.

Η συνεχής αύξηση της ασύρματης κίνησης δεδομένων, που προέρχεται από τη σύνδεση δισεκατομμυρίων συσκευών στο Διαδίκτυο, έχει οδηγήσει σε αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας. Η ενεργειακή αποδοτικότητα είναι ένα πάρα πολύ σημαντικό θέμα στα δίκτυα 6G. Ως εκ τούτου οι παραπάνω τεχνικές συμβάλλουν καθοριστικά στην εξοικονόμηση ενέργειας. Η ιδέα του Cloud Radio Access Network (C-RAN) παρουσιάζεται ως πολλά υποσχόμενη λύση για την αντιμετώπιση της αυξανόμενης κινητής κίνησης. Στο C-RAN, οι περισσότερες υπολογιστικές εργασίες, όπως ο υπολογισμός των δεδομένων που θα σταλθούν και η επεξεργασία του σήματος, μεταφέρονται στο cloud, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας.

Οι δυνατότητες που μας προσφέρει το νέφος και πιο συγκεκριμένα το fog και edge computing, επιτρέπει στους χρήστες να εκφορτώσουν τις εργασίες τους στο άκρο του δικτύου για εξοικονόμηση ενέργειας. Ο συνδυασμός του νέφους με το C-RAN μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας για τα μελλοντικά δίκτυα επικοινωνιών. Πρόσφατες μελέτες έχουν εξετάσει την ενεργειακή αποδοτικότητα με μεγάλα πλέγματα κεραιών, εστιάζοντας στη βέλτιστη κατανομή ισχύος, αλγόριθμους για την αποτελεσματικότερη χρήση τοπολογίας του δικτύου. Ωστόσο, η χρήση μεγάλου αριθμού κεραιών στις βάσεις μπορεί να αυξήσει την κατανάλωση ενέργειας [5], [6].

1.4 Διαφορές μεταξύ Επικοινωνίας και Ανίχνευσης

Η επικοινωνία και η ανίχνευση στα δίκτυα 6G παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές όσον αφορά τον σκοπό, τις τεχνολογικές απαιτήσεις, τα κριτήρια απόδοσης και τις εφαρμογές τους. Αυτές οι διαφορές καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο κάθε λειτουργία συμβάλλει στη συνολική απόδοση και στις δυνατότητες των δικτύων 6G. Η ενσωμάτωση αυτών των λειτουργιών μέσω των συστημάτων Joint Communications and Sensing (JCaS) στοχεύει στην επίτευξη ανώτερης απόδοσης και στην υποστήριξη καινοτόμων εφαρμογών, προσφέροντας έτσι νέες δυνατότητες και βελτιωμένες υπηρεσίες.



Εικόνα 6 Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας με δυνατότητες ανίχνευσης και επικοινωνίας

Η εικόνα απεικονίζει ένα δίκτυο κινητής επικοινωνίας με ενσωματωμένες δυνατότητες ανίχνευσης (sensing), χρησιμοποιώντας κατακεκομμένες μονάδες ραδιοσυχνοτήτων (Remote Radio Units - RRUs) και ένα κεντρικό δίκτυο Cloud Radio Access Network (CRAN). Οι τεχνολογίες που εφαρμόζονται στα δίκτυα με δυνατότητα ανίχνευσης και επικοινωνίας είναι η CD-OFDM, OTFS και MIMO. Τις τεχνολογίες αυτές θα τις αναλύσουμε στα επόμενα κεφάλαια.

- **CRAN Central:** Το κεντρικό δίκτυο επεξεργασίας περιλαμβάνει μια δεξαμενή **BBU (Baseband Unit Pool)** και μια μονάδα επεξεργασίας ανίχνευσης (**Sensing Processing Unit**).
- **RRUs (Remote Radio Units):** Τα RRU 1, RRU 2, και RRU 3 είναι μονάδες ραδιοσυχνοτήτων που συνδέονται στο CRAN μέσω του fronthaul.
- **Mobile Core:** Το πυρήνα του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, που επικοινωνεί με το CRAN και τους χρήστες.

Λειτουργικότητα και Σήματα

- **Μπλε Γραμμές: Κάτω ζεύξη (Downlink) επικοινωνίας και σήματος** από τις RRUs προς τους χρήστες ή τις συσκευές.
- **Γαλάζιες Διακεκομμένες Γραμμές: Ενεργή ανίχνευση (Active Sensing) μέσω της κάτω ζεύξης**, που μπορεί να αφορά ανίχνευση αντικειμένων ή οχημάτων.

- **Πράσινες Διακεκομμένες Γραμμές: Παθητική ανίχνευση (Passive Sensing)** μέσω της κάτω ζεύξης, όπως ανακλώμενα σήματα από αντικείμενα (π.χ. αυτοκίνητο).
- **Κόκκινες Γραμμές: Πάνω ζεύξη (Uplink) επικοινωνίας και ανίχνευσης** από χρήστες ή αντικείμενα προς τις RRUs.
- **Μαύρες Διακεκομμένες Γραμμές: Αντανάκλαση από εμπόδια (Clutter Reflection)**, όπως κτίρια και σπίτια.

Η **επικοινωνία στα δίκτυα 6G** αποσκοπεί κυρίως στη μετάδοση δεδομένων μεταξύ συσκευών, διασφαλίζοντας υψηλή ταχύτητα και αξιοπιστία. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης προηγμένων τεχνολογιών που επιτρέπουν τη γρήγορη και σταθερή μεταφορά μεγάλων όγκων δεδομένων. Οι κύριες τεχνολογίες που υποστηρίζουν αυτή τη λειτουργία περιλαμβάνουν:

1.4.1 Δίκτυα Δεδομένων

Οι βελτιώσεις στις τεχνολογίες backhaul και core network είναι απαραίτητες για την υποστήριξη των αυξημένων απαιτήσεων δεδομένων των δικτύων 6G. Οι κύριοι τομείς βελτίωσης περιλαμβάνουν:

- **Backhaul:** Η αναβάθμιση των συνδέσεων backhaul, οι οποίες συνδέουν τους σταθμούς κινητής τηλεφωνίας (Base Station - BS) με το κεντρικό δίκτυο, είναι κρίσιμη για την αποφυγή συμφόρησης και την εξασφάλιση υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης. Η χρήση οπτικών ινών υψηλής χωρητικότητας και η ανάπτυξη τεχνολογιών ασύρματης μετάδοσης mmWave για backhaul θα επιτρέψουν τη γρήγορη και αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων.
- **Core network:** Το κεντρικό δίκτυο (core network) των δικτύων 6G θα πρέπει να είναι εξαιρετικά ευέλικτο και δυναμικό, ικανό να διαχειρίζεται τεράστιους όγκους δεδομένων με χαμηλή καθυστέρηση. Οι τεχνολογίες δικτύωσης, όπως το software-defined networking (SDN) και το network function virtualization (NFV), θα επιτρέψουν την ευκολότερη διαχείριση και την ταχύτερη ανάπτυξη νέων υπηρεσιών και εφαρμογών.
- **Υπηρεσίες Cloud:** Η συνεχής και αξιόπιστη πρόσβαση σε υπηρεσίες cloud είναι απαραίτητη για πολλές σύγχρονες εφαρμογές. Τα δίκτυα 6G θα ενσωματώνουν cloud computing και edge computing, φέρνοντας την επεξεργαστική ισχύ πιο κοντά στους χρήστες και μειώνοντας την καθυστέρηση. Αυτό θα επιτρέψει την ταχύτερη απόκριση και την καλύτερη απόδοση σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή υπολογιστική ισχύ και χαμηλή καθυστέρηση, όπως η τεχνητή νοημοσύνη και η ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Η ανίχνευση στα δίκτυα 6G είναι ένας από τους κρίσιμους πυλώνες που διαφοροποιούν αυτή την γενιά δικτύων από τις προηγούμενες. Στόχος της ανίχνευσης είναι η συλλογή, ανάλυση και αξιοποίηση δεδομένων από το περιβάλλον για τη βελτίωση των υπηρεσιών και την υποστήριξη νέων εφαρμογών. Ενσωματώνοντας αισθητήρες και προηγμένες τεχνολογίες ανίχνευσης, τα δίκτυα 6G θα μπορέσουν να προσφέρουν σημαντικά οφέλη σε ποικίλους τομείς [11], [12].

1.4.2 Ραντάρ στα Δίκτυα 6G

Το ραντάρ είναι μια από τις βασικές τεχνολογίες ανίχνευσης που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα 6G. Η τεχνολογία ραντάρ, η οποία αρχικά αναπτύχθηκε για στρατιωτικές εφαρμογές, έχει βρει ευρεία χρήση σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων των αυτόνομων οχημάτων, των συστημάτων ασφαλείας, και των εφαρμογών παρακολούθησης.

Οι βασικές αρχές λειτουργίας των ραντάρ είναι οι εξής: Το ραντάρ λειτουργεί με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και την ανάλυση των επιστροφών αυτών των κυμάτων αφού ανακλαστούν από αντικείμενα. Οι βασικές λειτουργίες του περιλαμβάνουν:

1. Εκπομπή Παλμών:

- ο Το ραντάρ εκπέμπει παλμούς ραδιοκυμάτων ή μικροκυμάτων προς την κατεύθυνση του χώρου που θέλει να ανιχνεύσει.

2. Ανίχνευση Αντικειμένων:

- ο Όταν τα κύματα συναντούν ένα αντικείμενο, ανακλώνται πίσω προς τον πομπό του ραντάρ.

3. Λήψη και Επεξεργασία Σήματος:

- ο Ο δέκτης του ραντάρ λαμβάνει τα ανακλώμενα κύματα και αναλύει τις πληροφορίες που περιέχονται σε αυτά.

4. Εκτίμηση Απόστασης και Ταχύτητας:

- ο Η απόσταση των αντικειμένων εκτιμάται με βάση τον χρόνο που χρειάζεται το σήμα για να ταξιδέψει από τον πομπό στο αντικείμενο και πίσω στον δέκτη.
- ο Η ταχύτητα των αντικειμένων εκτιμάται με τη χρήση του φαινομένου Doppler, όπου η συχνότητα των ανακλώμενων κυμάτων μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα του αντικειμένου.

Οι σημαντικότερες προκλήσεις που υπάρχουν είναι η αντιμετώπιση των παρεμβολών, όπου η λειτουργία των ραντάρ μπορεί να επηρεαστεί από παρεμβολές από άλλες πηγές ραδιοκυμάτων, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να ανιχνευθεί το σήμα που στέλνεται στον δέκτη. Η απαίτηση της μεγάλης ενεργειακής κατανάλωσης που απαιτούν τα ραντάρ είναι κρίσιμη για τα δίκτυα 6G και θα πρέπει να γίνει μελέτη για τη διαχείριση της αποδοτικότητας ενεργειακής κατανάλωσης. Τέλος, το αυξανόμενο κόστος συντήρησης των συστημάτων αυτών είναι υψηλό, καθιστώντας απαραίτητη τη χρήση πιο αποδοτικών τεχνολογιών και στρατηγικών που θα μειώσουν τις οικονομικές απαιτήσεις, χωρίς να θυσιάζεται η απόδοση και η αξιοπιστία τους.

1.4.3 Light Detection and Ranging - LIDAR

Το LIDAR (Light Detection and Ranging) λειτουργεί με βάση ορισμένες θεμελιώδεις αρχές που καθιστούν δυνατή την εφαρμογή του σε πολλούς τομείς. Αυτές οι αρχές περιλαμβάνουν τη χρήση

παλμών λέιζερ, την αντανάκλαση φωτός, την ακριβή μέτρηση χρόνου και την επεξεργασία δεδομένων.

Οι βασικές αρχές του LIDAR είναι οι εξής:

5. Εκπομπή Παλμού Λέιζερ:

- Το LIDAR χρησιμοποιεί μια πηγή λέιζερ για να εκπέμπει σύντομους και ισχυρούς παλμούς φωτός προς έναν στόχο. Η ακρίβεια και η ισχύς των παλμών επιτρέπουν τη λήψη λεπτομερών δεδομένων από το περιβάλλον.

6. Αντανάκλαση και Επιστροφή σήματος:

- Όταν ο παλμός λέιζερ προσκρούει σε έναν στόχο, ανακλάται πίσω προς τον δέκτη του LIDAR. Η ανακλαστικότητα του στόχου εξαρτάται από τα υλικά και την επιφάνειά του. Η ποσότητα του ανακλώμενου φωτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των ιδιοτήτων του στόχου.

7. Ακριβής Μέτρηση Χρόνου:

- Ο δέκτης καταγράφει τον χρόνο που χρειάζεται ο παλμός λέιζερ να ταξιδέψει από τον πομπό στον στόχο και πίσω. Η μέτρηση αυτή είναι εξαιρετικά ακριβής και πραγματοποιείται σε νανοδευτερόλεπτα. Η ακριβής χρονομέτρηση είναι κρίσιμη για τον υπολογισμό της απόστασης του στόχου.

8. Επεξεργασία Δεδομένων:

- Τα δεδομένα από τους παλμούς λέιζερ συλλέγονται και επεξεργάζονται για να δημιουργήσουν έναν λεπτομερή τρισδιάστατο χάρτη του περιβάλλοντος. Αυτή η επεξεργασία περιλαμβάνει την ανάλυση των ανακλώμενων σημάτων, τη διόρθωση τυχόν σφαλμάτων και την απεικόνιση των αποτελεσμάτων.

9. Δημιουργία Τρισδιάστατου Χάρτη:

- Οι πληροφορίες για τις αποστάσεις συλλέγονται από χιλιάδες ή και εκατομμύρια παλμούς λέιζερ που σαρώνουν το περιβάλλον. Αυτές οι μετρήσεις συνδυάζονται για να δημιουργηθεί ένας λεπτομερής τρισδιάστατος χάρτης της περιοχής. Οι χάρτες αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές, όπως η πλοήγηση αυτόνομων οχημάτων, η γεωργία ακριβείας και η χαρτογράφηση εδαφών.

Η τεχνολογία LIDAR αξιοποιεί αυτές τις αρχές για να παρέχει ακριβείς και αξιόπιστες μετρήσεις που είναι απαραίτητες για πολλές καινοτόμες εφαρμογές. Οι βελτιώσεις στη χρήση παλμών λέιζερ, στην αντανάκλαση και στην επεξεργασία δεδομένων καθιστούν το LIDAR μια από τις πιο προηγμένες τεχνολογίες ανίχνευσης και μέτρησης που χρησιμοποιούνται σήμερα [11].

1.4.4 Μικροκυματικοί Αισθητήρες

Οι μικροκυματικοί αισθητήρες (Microwave Sensors) χρησιμοποιούν την τεχνολογία των μικροκυμάτων για να ανιχνεύουν την κίνηση και την παρουσία αντικειμένων. Αυτή η τεχνολογία βασίζεται στη μετάδοση και λήψη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε μικροκυματικές συχνότητες, συνήθως μεταξύ 1 GHz και 100 GHz. Οι μικροκυματικοί αισθητήρες έχουν διάφορες εφαρμογές, από την ασφάλεια και την παρακολούθηση μέχρι τη βιομηχανία.

Λειτουργία:

1. Εκπομπή Μικροκυμάτων:

- Οι μικροκυματικοί αισθητήρες εκπέμπουν συνεχώς ή παλμικά μικροκύματα προς την κατεύθυνση του στόχου. Τα μικροκύματα είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μήκη κύματος που κυμαίνονται από 1 mm έως 1 m, επιτρέποντας τους να διαπερνούν διάφορα υλικά και να ανιχνεύουν αντικείμενα.

2. Αντανάκλαση και Σκέδαση:

- Όταν τα μικροκύματα προσκρούουν σε έναν στόχο, ανακλώνται ή σκέδονται πίσω προς τον αισθητήρα. Η αντανάκλαση εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του στόχου, όπως το υλικό, το μέγεθος και η επιφάνεια του.

3. Λήψη και Ανάλυση:

- Ο αισθητήρας λαμβάνει τα ανακλώμενα μικροκύματα και αναλύει τις μεταβολές στη συχνότητα, την ισχύ και τον χρόνο επιστροφής των κυμάτων. Αυτές οι μεταβολές χρησιμοποιούνται για να ανιχνευθεί η παρουσία, η κίνηση και η ταχύτητα των αντικειμένων.

4. Φαινόμενο Doppler:

- Για την ανίχνευση της κίνησης, οι μικροκυματικοί αισθητήρες χρησιμοποιούν το φαινόμενο Doppler, όπου η συχνότητα των ανακλώμενων κυμάτων μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα του αντικειμένου. Με βάση τη μεταβολή της συχνότητας, οι αισθητήρες μπορούν να υπολογίσουν την ταχύτητα και την κατεύθυνση της κίνησης.

Η επικοινωνία και η ανίχνευση στα δίκτυα 6G παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές όσον αφορά τον σκοπό, τις τεχνολογικές απαιτήσεις, τα κριτήρια απόδοσης και τις εφαρμογές τους. Η επικοινωνία στα δίκτυα 6G επικεντρώνεται στη μετάδοση δεδομένων μεταξύ συσκευών, με στόχο την παροχή εξαιρετικά υψηλών ταχυτήτων, χαμηλής καθυστέρησης και αξιοπιστίας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης προηγμένων τεχνολογιών όπως τα κινητά δίκτυα, το Wi-Fi και οι βελτιώσεις στα δίκτυα δεδομένων. Από την άλλη πλευρά, η ανίχνευση στα δίκτυα 6G στοχεύει στη συλλογή και ανάλυση δεδομένων από το περιβάλλον, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες όπως το ραντάρ, το LIDAR και οι μικροκυματικοί αισθητήρες.

Η ανίχνευση επικεντρώνεται στον εντοπισμό, την παρακολούθηση και την ανάλυση αντικειμένων και φαινομένων στον περιβάλλοντα χώρο. Ενώ η επικοινωνία διασφαλίζει την άμεση και αξιόπιστη μεταφορά μεγάλων όγκων δεδομένων, η ανίχνευση παρέχει κρίσιμες πληροφορίες για την βελτίωση υπηρεσιών και την υποστήριξη καινοτόμων εφαρμογών. Τα συστήματα Joint Communications and Sensing (JCaS) επιδιώκουν να συνδυάσουν αυτές τις δύο λειτουργίες, προσφέροντας νέες δυνατότητες και βελτιωμένες υπηρεσίες με την ταυτόχρονη χρήση των πλεονεκτημάτων της επικοινωνίας και της ανίχνευσης [14].

1.5 Ο ρόλος των JCaS στα μελλοντικά δίκτυα 6G

Η τεχνολογία **JCaS (Joint Communication and Sensing)** αποτελεί μια από τις πιο ριζικές και καινοτόμες προσεγγίσεις στα δίκτυα 6ης γενιάς (6G), επιτυγχάνοντας τον συγκερασμό των λειτουργιών επικοινωνίας και ανίχνευσης σε ένα ολοκληρωμένο, ενιαίο σύστημα. Αυτή η προσέγγιση δίνει στα δίκτυα τη δυνατότητα να λειτουργούν ως πολυδιάστατα συστήματα που δεν περιορίζονται απλώς στη μετάδοση δεδομένων αλλά αποκτούν δυναμική αλληλεπίδραση με το περιβάλλον τους. Η ενσωμάτωση του JCaS στα δίκτυα 6G υποστηρίζει μια νέα λειτουργικότητα, την ταυτόχρονη αποστολή και λήψη πληροφοριών και την ανίχνευση του περιβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο.

1.5.1 Ο Ρόλος του JCaS στην Ενίσχυση της Αποδοτικότητας του Φάσματος

Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του JCaS είναι η δυνατότητα καλύτερης αξιοποίησης του φάσματος, δεδομένου ότι η ίδια συχνότητα μπορεί να χρησιμοποιείται ταυτόχρονα για επικοινωνία και ανίχνευση. Στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, η συμφόρηση του φάσματος αποτελεί έναν σημαντικό περιορισμό, ιδιαίτερα καθώς αυξάνεται ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών και οι απαιτήσεις για δεδομένα και ταχύτητες μετάδοσης. Το JCaS επιλύει αυτό το πρόβλημα, προσφέροντας βελτιωμένη φασματική αποδοτικότητα μέσω της πολυδιάστατης χρήσης των ίδιων συχνοτήτων για πολλαπλές λειτουργίες.

Για παράδειγμα, στα δίκτυα 6G, τα οποία έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν σε υψηλότερες συχνότητες όπως αυτές των τερα헤ρτζ και των χιλιοστομετρικών κυμάτων, το JCaS μπορεί να εκμεταλλευτεί το εύρος συχνοτήτων για να παρέχει αυξημένες ταχύτητες και βελτιωμένη χωρητικότητα σε περιοχές με αυξημένη πυκνότητα πληθυσμού. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική για πυκνοκατοικημένα αστικά περιβάλλοντα, όπου τα δεδομένα πρέπει να μεταφέρονται γρήγορα και με ακρίβεια. Η βελτιωμένη φασματική αποδοτικότητα μειώνει επίσης την ανάγκη για συνεχείς αναβαθμίσεις στην υποδομή και τη χωρητικότητα των δικτύων, συμβάλλοντας στη βιωσιμότητα και την οικονομική αποδοτικότητα των τηλεπικοινωνιακών δικτύων.

1.5.2 Υψηλή Ακρίβεια Τοποθέτησης και Εφαρμογές σε Αυτόνομα Συστήματα

Μια από τις βασικές εφαρμογές του JCaS είναι η ακριβής τοποθέτηση και η ικανότητα των δικτύων να εντοπίζουν και να ανιχνεύουν αντικείμενα με ακρίβεια εκατοστού. Αυτή η λειτουργία

είναι καθοριστική για εφαρμογές όπως η αυτόνομη οδήγηση, τα drones, τα ρομπότ και άλλα αυτόνομα συστήματα που απαιτούν άμεση και αξιόπιστη πληροφόρηση για το περιβάλλον στο οποίο κινούνται. Το JCaS ενσωματώνει δυνατότητες εντοπισμού και παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, κάτι που επιτρέπει στα αυτόνομα συστήματα να κινούνται με ακρίβεια και ασφάλεια, αποφεύγοντας πιθανά εμπόδια και κινδύνους.

Στο πλαίσιο της αυτόνομης οδήγησης, για παράδειγμα, η χρήση του JCaS εξασφαλίζει ότι τα δίκτυα 6G μπορούν να παρέχουν συνεχή ενημέρωση στα οχήματα σχετικά με την τοποθεσία άλλων οχημάτων, πεζών, σημάτων κυκλοφορίας και ενδεχόμενων εμποδίων στον δρόμο. Αυτή η συνεχής ροή δεδομένων και πληροφορίας σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει στα αυτόνομα οχήματα να λαμβάνουν γρήγορες αποφάσεις, μειώνοντας τους κινδύνους για ατυχήματα και βελτιώνοντας την ασφάλεια τόσο για τους επιβάτες όσο και για τους πεζούς.

1.5.3 Ενίσχυση του Διαδικτύου των Πάντων (IoE)

Το JCaS ενσωματώνει τη δυνατότητα της ταυτόχρονης ανίχνευσης και επικοινωνίας, υποστηρίζοντας την εξέλιξη του Διαδικτύου των Πάντων (IoE). Το IoE επιδιώκει τη διασύνδεση όλων των συσκευών, των αισθητήρων και των συστημάτων, δημιουργώντας ένα πλήρως δικτυωμένο περιβάλλον. Το JCaS επιτρέπει τη συνεχή ροή δεδομένων και την αλληλεπίδραση σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας μια ισχυρή βάση για την ανάπτυξη έξυπνων πόλεων, βιομηχανικών δικτύων και δικτύων κοινής ωφέλειας.

Στις έξυπνες πόλεις, για παράδειγμα, το JCaS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συλλογή δεδομένων από διάφορες πηγές, όπως κυκλοφοριακούς αισθητήρες, συστήματα παρακολούθησης ποιότητας του αέρα, και συσκευές καταγραφής της κατανάλωσης ενέργειας. Αυτά τα δεδομένα στη συνέχεια επεξεργάζονται και χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων, καθώς οι πόλεις μπορούν να διαχειρίζονται τους πόρους τους πιο αποδοτικά, να μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας και να αντιμετωπίζουν καλύτερα περιβαλλοντικές προκλήσεις.

1.5.4 Ενίσχυση της Ασφάλειας και της Ιδιωτικότητας των Δικτύων

Η ασφάλεια και η προστασία της ιδιωτικότητας είναι βασικές προκλήσεις στα σύγχρονα δίκτυα, ιδίως με την αυξανόμενη ανάγκη για ανταλλαγή δεδομένων και τη διαρκή σύνδεση των συσκευών. Το JCaS συμβάλλει καθοριστικά στην ενίσχυση της ασφάλειας και της ιδιωτικότητας μέσω της ανίχνευσης σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει στα δίκτυα να αναγνωρίζουν ύποπτες ή ασυνήθιστες δραστηριότητες και να εντοπίζουν απειλές ασφαλείας, προσφέροντας αυξημένη προστασία των δεδομένων.

Το JCaS επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση της κίνησης των δεδομένων και την ανίχνευση πιθανών επιθέσεων σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, μπορεί να ενισχύσει την ιδιωτικότητα των χρηστών, διασφαλίζοντας ότι μόνο εξουσιοδοτημένοι χρήστες έχουν πρόσβαση σε ευαίσθητες πληροφορίες. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδανική για επιχειρηματικές και κυβερνητικές εφαρμογές, όπου η ασφάλεια και η προστασία των πληροφοριών είναι ύψιστης σημασίας.

1.5.5 Εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) και Προσαρμοστικότητα των Δικτύων

Η τεχνητή νοημοσύνη (AI) διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στην αποτελεσματική λειτουργία των δικτύων 6G με τεχνολογία JCaS. Μέσω της AI, τα δίκτυα 6G αποκτούν τη δυνατότητα να μαθαίνουν και να προσαρμόζονται σε πραγματικό χρόνο, ανάλογα με τις συνθήκες και τις ανάγκες του χρήστη. Αυτό επιτρέπει τη δυναμική διαχείριση και την ανακατανομή των πόρων του δικτύου, με στόχο τη βέλτιστη απόδοση.

Για παράδειγμα, αν το δίκτυο παρατηρήσει αυξημένη κίνηση δεδομένων σε μια συγκεκριμένη περιοχή, μπορεί να δώσει προτεραιότητα στην επικοινωνία για να εξασφαλίσει τη σταθερή και γρήγορη μετάδοση δεδομένων. Αντίστοιχα, σε περιοχές όπου απαιτείται ανίχνευση, όπως σε αυτοκινητόδρομους ή σε βιομηχανικές ζώνες, το δίκτυο μπορεί να προσαρμόσει τη λειτουργία του για να εξασφαλίσει την ασφάλεια των χρηστών και του προσωπικού.

1.5.6 Υποστήριξη Καινοτόμων Υπηρεσιών και Εφαρμογών

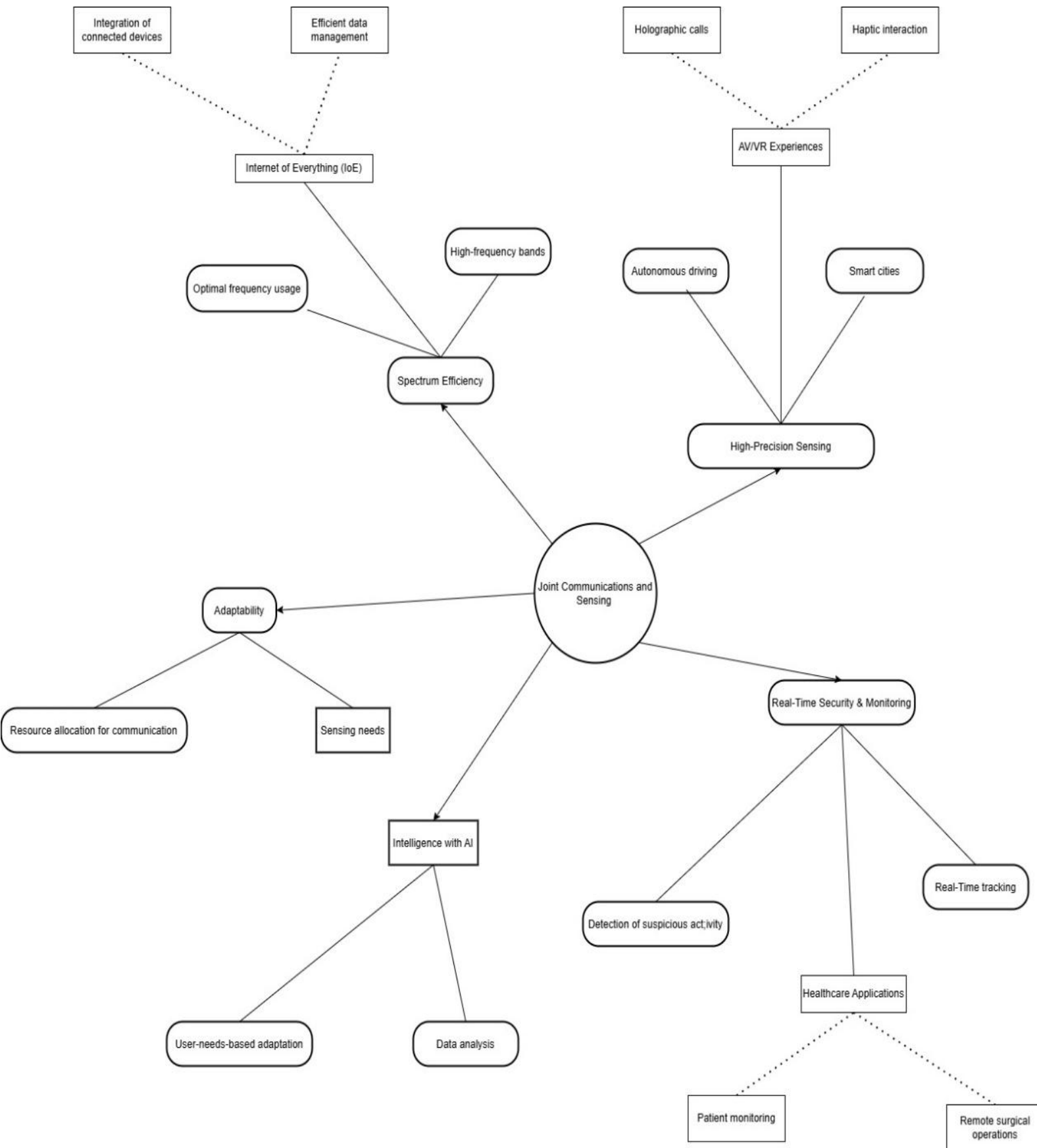
Το JCaS ανοίγει τον δρόμο για την ανάπτυξη καινοτόμων υπηρεσιών, όπως η επαυξημένη (AR) και η εικονική πραγματικότητα (VR), οι ολογραφικές κλήσεις και η απτική επικοινωνία. Αυτές οι εφαρμογές απαιτούν εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και ακριβή ανίχνευση σε πραγματικό χρόνο για τη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης και ρεαλιστικής εμπειρίας χρήστη.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση της ολογραφικής τηλεδιάσκεψης, οι συμμετέχοντες μπορούν να αλληλεπιδρούν με ρεαλιστικές απεικονίσεις σε πραγματικό χρόνο, κάτι που απαιτεί γρήγορη και συνεχής ροή δεδομένων. Το JCaS επιτρέπει την εφαρμογή τέτοιων τεχνολογιών με επιτυχία, δίνοντας στους χρήστες την αίσθηση ότι βρίσκονται στον ίδιο χώρο, ανεξάρτητα από τη φυσική τους απόσταση.

1.5.7 Βιομηχανικές Εφαρμογές και Υγειονομική Περίθαλψη

Η τεχνολογία JCaS έχει τεράστιες δυνατότητες και στον τομέα της βιομηχανίας και της υγειονομικής περίθαλψης. Στη βιομηχανία, το JCaS διευκολύνει την παρακολούθηση και την πρόβλεψη της κατάστασης των μηχανημάτων, επιτρέποντας την πρόληψη βλαβών και την άμεση συντήρηση. Οι επιχειρήσεις μπορούν να εξοικονομήσουν κόστος και να αυξήσουν την παραγωγικότητα, ενώ διασφαλίζουν την ασφάλεια του προσωπικού τους.

Στην υγειονομική περίθαλψη, το JCaS μπορεί να επιτρέψει την απομακρυσμένη παρακολούθηση των ασθενών, επιτρέποντας στους γιατρούς να έχουν μια σαφή εικόνα της κατάστασης των ασθενών τους σε πραγματικό χρόνο. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για κρίσιμες περιπτώσεις όπου η ταχεία αντίδραση είναι ζωτικής σημασίας. Επίσης, με τη βοήθεια του JCaS, οι τηλεχειρουργικές επεμβάσεις γίνονται πιο ακριβείς και ασφαλείς, ενώ η γενικότερη υποστήριξη της τηλεϊατρικής επιτρέπει την καλύτερη πρόσβαση στις υπηρεσίες υγείας σε απομακρυσμένες περιοχές [6], [7], [14].



Εικόνα 7 Διάγραμμα που απεικονίζει τον ρόλο του JCaS στα 6G δίκτυα

1.6 Εφαρμογές JCaS σε IoT Συστήματα

Οι εφαρμογές της JCaS εκτείνονται σε πολλούς τομείς, επηρεάζοντας τη ζωή μας σε καθημερινή βάση και μεταμορφώνοντας την υποδομή των πόλεων, τις μεταφορές, την οικιακή αυτοματοποίηση, τη φροντίδα της υγείας και τη βιομηχανία. Από τις έξυπνες πόλεις, όπου η τεχνολογία βελτιώνει τη διαχείριση της κυκλοφορίας και την περιβαλλοντική παρακολούθηση, μέχρι την ανάπτυξη αυτόματων οχημάτων που επικοινωνούν μεταξύ τους και με την υποδομή, η JCaS προσφέρει αναμφισβήτητα οφέλη.

1.6.1 Έξυπνες Πόλεις

Η τεχνολογία JCaS βρίσκει σημαντική εφαρμογή στις έξυπνες πόλεις, όπου οι υποδομές και οι υπηρεσίες μπορούν να βελτιωθούν με τη χρήση προηγμένων αισθητήρων και συστημάτων επικοινωνίας. Οι έξυπνες πόλεις βασίζονται στη δυνατότητα συλλογής και ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, προκειμένου να ενισχύσουν την ποιότητα ζωής των πολιτών και να προωθήσουν τη βιωσιμότητα. Ξεκινώντας, η διαχείριση της κυκλοφορίας αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους τομείς όπου η JCaS μπορεί να αποδώσει σημαντικά οφέλη. Η τεχνολογία επιτρέπει τη χρήση αισθητήρων κίνησης και καμερών για την παρακολούθηση της κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο. Οι πληροφορίες που συλλέγονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσαρμογή των ρυθμίσεων των φωτεινών σηματοδοτών, βελτιώνοντας τη ροή της κυκλοφορίας και μειώνοντας τον χρόνο αναμονής των οδηγών.

Πιο συγκεκριμένα, με την ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται από την κυκλοφορία, οι τοπικές αρχές μπορούν να αναγνωρίσουν σημεία συμφόρησης και να αναπτύξουν στρατηγικές για την αποφυγή τους. Αυτές οι στρατηγικές μπορεί να περιλαμβάνουν την αύξηση του αριθμού των δημόσιων συγκοινωνιών σε ώρες αιχμής ή τη δημιουργία νέων διαδρομών που θα ελαχιστοποιούν τη συμφόρηση. Όσον αφορά το περιβάλλον, η JCaS επιτρέπει επίσης την αποτελεσματική παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπως η ποιότητα του αέρα, η θερμοκρασία και τα επίπεδα θορύβου. Χρησιμοποιώντας δίκτυα αισθητήρων, οι πόλεις μπορούν να συλλέγουν δεδομένα για την ατμοσφαιρική ρύπανση, παρέχοντας τις απαραίτητες πληροφορίες για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη δημόσια υγεία και την προστασία του περιβάλλοντος. Η ανάλυση των δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε προληπτικά μέτρα για τη μείωση της ρύπανσης, όπως η ρύθμιση της κυκλοφορίας κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής ρύπανσης ή η προώθηση της χρήσης εναλλακτικών μέσων μεταφοράς, όπως τα ηλεκτρικά ποδήλατα και τα μέσα μαζικής μεταφοράς. Έτσι, η JCaS συμβάλλει στην υλοποίηση βιώσιμων στρατηγικών που προστατεύουν το περιβάλλον.

1.6.2 Αυτόματα Οχήματα

Η τεχνολογία JCaS είναι επίσης κρίσιμη στην ανάπτυξη αυτόματων οχημάτων, καθώς επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ των οχημάτων και της υποδομής. Αυτή η επικοινωνία ενισχύει την ασφάλεια και τη λειτουργικότητα των αυτόματων οχημάτων, διευκολύνοντας τη μετάβαση προς

πιο έξυπνες και ασφαλείς μορφές μεταφοράς. Η ίδια υπόσχεται ασφαλέστερη πλοήγηση. Τα αυτόματα οχήματα, εφοδιασμένα με τεχνολογία JCaS, έχουν τη δυνατότητα να ανιχνεύουν εμπόδια και να αναγνωρίζουν τις συνθήκες του δρόμου σε πραγματικό χρόνο. Η χρήση αισθητήρων, όπως οι lidar και οι κάμερες, σε συνδυασμό με δεδομένα επικοινωνίας από άλλα οχήματα και υποδομές, επιτρέπει τη δημιουργία ενός λεπτομερούς χάρτη της κυκλοφορίας και των συνθηκών οδήγησης. Η ασφαλής πλοήγηση εξασφαλίζεται μέσω της αλληλεπίδρασης των αυτόματων οχημάτων μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να μπορούν να προγραμματίσουν τις διαδρομές τους και να αποφύγουν πιθανούς κινδύνους.

Για παράδειγμα, αν ένα όχημα ανιχνεύσει ένα ατύχημα μπροστά του, μπορεί να στείλει άμεσα σήμα στα υπόλοιπα οχήματα, επιτρέποντας τους να τροποποιήσουν τις διαδρομές τους και να αποτρέψουν περαιτέρω ατυχήματα. Ακόμη επιτυγχάνεται διαχείριση κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο. Αναλυτικότερα, όταν τα αυτόματα οχήματα επικοινωνούν με τα φανάρια και τις άλλες ρυθμίσεις κυκλοφορίας, μπορούν να προσαρμόσουν την ταχύτητά τους με βάση τις τρέχουσες συνθήκες, μειώνοντας την πιθανότητα σχηματισμού μποτιλιαρισμάτων. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να περιλαμβάνει επίσης την ανάλυση της συμπεριφοράς των οδηγών και των επιβατών, προκειμένου να βελτιωθούν οι ρυθμίσεις των κυκλοφοριακών φώτων και να γίνει πιο αποτελεσματική η διαχείριση της κυκλοφορίας, οδηγώντας σε λιγότερες καθυστερήσεις και βελτιωμένη ποιότητα ζωής για τους πολίτες.

1.6.3 Έξυπνα Σπίτια

Στον τομέα των έξυπνων σπιτιών, η τεχνολογία JCaS επιτρέπει την αυτοματοποίηση των οικιακών συσκευών και τη βελτίωση της ασφάλειας, προσφέροντας στους χρήστες ένα πιο άνετο και ασφαλές περιβάλλον. Αρχικά, η JCaS διευκολύνει την αυτοματοποίηση οικιακών συσκευών μέσω της σύνδεσης με αισθητήρες και δίκτυα. Οι χρήστες μπορούν να προγραμματίσουν τις συσκευές τους να λειτουργούν αυτόματα με βάση τις προτιμήσεις τους, όπως ο φωτισμός να ενεργοποιείται όταν εισέρχονται στο σπίτι ή ο θερμοστάτης να ρυθμίζεται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες. Επιπλέον, η αυτοματοποίηση μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς οι χρήστες μπορούν να ελέγχουν και να παρακολουθούν την κατανάλωση ενέργειας των συσκευών τους μέσω εφαρμογών smartphone.

Αυτή η δυνατότητα μπορεί να οδηγήσει σε συνειδητοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης και σε προσπάθειες για τη μείωση της κατανάλωσης. Παράλληλα, η ίδια ενισχύει την ασφάλεια των σπιτιών μέσω της χρήσης αισθητήρων κίνησης, καμερών και άλλων συσκευών ασφαλείας. Με τη δυνατότητα ανίχνευσης ύποπτης δραστηριότητας, οι χρήστες μπορούν να λαμβάνουν άμεσες ειδοποιήσεις στο smartphone τους σε περίπτωση κινδύνου. Η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει επίσης στους χρήστες να ελέγχουν την ασφάλεια του σπιτιού τους από απόσταση, παρέχοντας έτσι μια αίσθηση ασφάλειας. Επιπλέον, η δυνατότητα καταγραφής και αποθήκευσης βίντεο προσφέρει αποδείξεις σε περίπτωση κλοπής ή άλλης εγκληματικής δραστηριότητας.

1.6.4 Υγειονομική Περίθαλψη

Η εφαρμογή της JCaS στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης προσφέρει καινοτόμες λύσεις για την παρακολούθηση και φροντίδα των ασθενών. Αυτή η τεχνολογία βελτιώνει τη δυνατότητα πρόσβασης σε κρίσιμα δεδομένα και την προσφορά υγειονομικών υπηρεσιών. Συγκεκριμένα, επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση ζωτικών σημείων, όπως η καρδιοαναπνευστική λειτουργία, η πίεση του αίματος και η θερμοκρασία του σώματος. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη διαδικασία μπορούν να στείλουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο στους γιατρούς, επιτρέποντας την άμεση παρέμβαση όταν είναι απαραίτητο.

Αυτή η προσέγγιση ενισχύει την ποιότητα της φροντίδας και μειώνει την ανάγκη για φυσική παρουσία των ασθενών σε νοσοκομεία, μειώνοντας την επιβάρυνση του υγειονομικού συστήματος. Επιπλέον, η έγκαιρη διάγνωση και θεραπεία μπορεί να βελτιώσει την ανάρρωση των ασθενών και να σώσει ζωές. Επιπροσθέτως, η τηλεϊατρική είναι μια άλλη σημαντική εφαρμογή της JCaS, καθώς επιτρέπει στους ασθενείς να λαμβάνουν ιατρική φροντίδα από το σπίτι τους. Οι ασθενείς μπορούν να έχουν πρόσβαση σε ιατρικές υπηρεσίες μέσω ψηφιακών πλατφορμών, μειώνοντας την ανάγκη για ταξίδια και αυξάνοντας την προσβασιμότητα. Η τηλεϊατρική μπορεί να περιλαμβάνει βίντεο κλήσεις με γιατρούς, απομακρυσμένη παρακολούθηση της υγείας και ηλεκτρονικές συνταγές.

1.6.5 IoT στις Βιομηχανίες

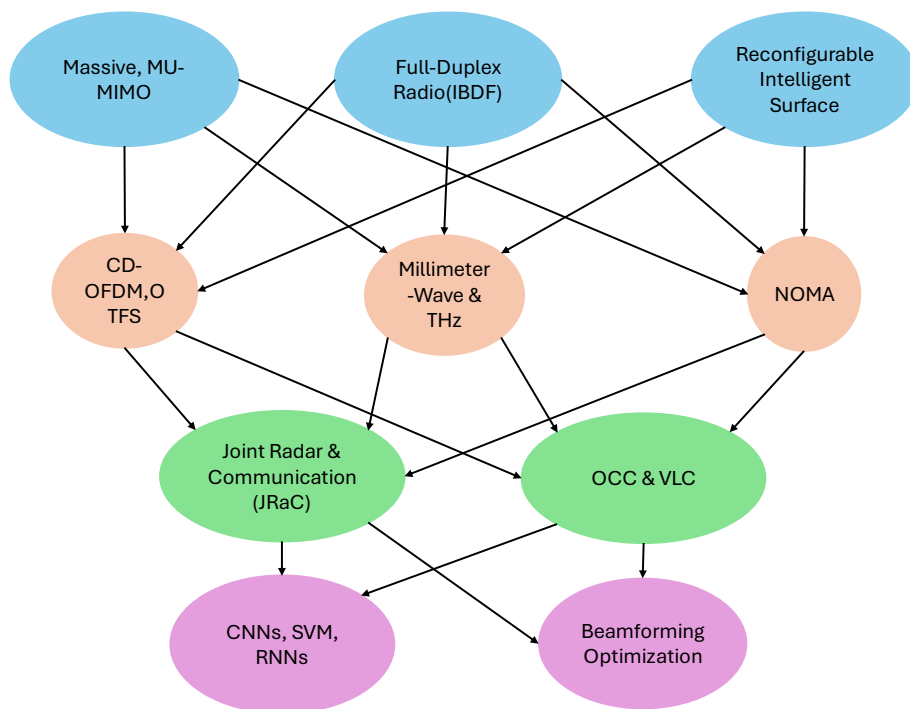
Στον τομέα αυτό, η JCaS μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τις διαδικασίες παραγωγής και τη διαχείριση των πόρων. Η ικανότητα των αισθητήρων να ανιχνεύουν προβλήματα και να επικοινωνούν μεταξύ τους επιτρέπει την εφαρμογή έξυπνης συντήρησης και τη βελτίωση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Ειδικότερα, η JCaS δίνει τη δυνατότητα για προληπτική συντήρηση των μηχανών, όπου οι αισθητήρες ανιχνεύουν τυχόν ανωμαλίες στη λειτουργία των μηχανών. Αυτή η ικανότητα επιτρέπει στις επιχειρήσεις να προγραμματίζουν συντηρήσεις προτού συμβούν βλάβες, ελαχιστοποιώντας έτσι τις καθυστερήσεις στην παραγωγή.

Με την ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, οι επιχειρήσεις μπορούν να προσαρμόσουν τη συντήρηση των μηχανών ανάλογα με τις ανάγκες τους, εξοικονομώντας χρόνο και πόρους. Αυτή η στρατηγική όχι μόνο αυξάνει την αποδοτικότητα της παραγωγής αλλά μειώνει και το κόστος συντήρησης. Ακόμη, η ίδια επιτρέπει την παρακολούθηση των αγαθών σε πραγματικό χρόνο, βελτιώνοντας τη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Οι εταιρείες μπορούν να εντοπίζουν την τοποθεσία των προϊόντων τους σε οποιοδήποτε σημείο της διαδρομής τους, από την παραγωγή έως την παράδοση στον πελάτη. Αυτή η δυνατότητα ενισχύει την ικανότητα των εταιρειών να διαχειρίζονται αποθέματα και να προσαρμόζουν τις στρατηγικές τους σύμφωνα με τη ζήτηση της αγοράς. Οι εταιρείες μπορούν να προβλέπουν τις ανάγκες των πελατών τους και να προγραμματίζουν τις παραγγελίες τους αναλόγως, βελτιώνοντας την ικανοποίηση των πελατών και μειώνοντας τα έξοδα.

2

Τεχνολογίες στα Συστήματα *Joint Communications and Sensing*

Η τεχνολογία Joint Communications and Sensing (JCaS) συνδυάζει τις λειτουργίες επικοινωνίας και ανίχνευσης σε ένα ενιαίο σύστημα, επιτρέποντας τη βελτιστοποιημένη χρήση των πόρων, την ενίσχυση της αποδοτικότητας και την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει νέες δυνατότητες στα συστήματα IoT και άλλες εφαρμογές, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη έξυπνων υποδομών και τη βελτίωση των επικοινωνιών σε περιβάλλοντα υψηλής συνδεσιμότητας. Οι κύριες τεχνολογίες που υιοθετούνται στα JCaS και τις οποίες θα τις αναλύσουμε στα επόμενα κεφάλαια είναι η τεχνολογία της CD-OFDM, της τεχνολογίας OTFS και των MIMO συστημάτων, που προσφέρουν διαφοροποιημένες δυνατότητες ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε την ιεραρχία των JCaS συστημάτων από το πιο χαμηλό επίπεδο μέχρι το πιο υψηλό στο οποίο συναντάμε την τεχνητή νοημοσύνη.



Εικόνα 8 Διάγραμμα που απεικονίζει την ιεραρχία τεχνικών στα JCaS συστήματα

1^ο Επίπεδο: Υποδομή Δικτύου (Physical Layer)

Αυτό είναι το **θεμέλιο** του συστήματος και περιλαμβάνει τεχνολογίες που σχετίζονται με το υλικό του δικτύου και τις κεραίες:

- **MIMO (Massive & MU-MIMO)**: Χρήση πολλαπλών κεραιών για καλύτερη χωρητικότητα και κάλυψη.
- **Full-Duplex Radio (IBFD)**: Επιτρέπει ταυτόχρονη εκπομπή και λήψη στην ίδια συχνότητα.
- **Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS)**: Έξυπνες επιφάνειες που αναδιαμορφώνουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα για ενίσχυση του σήματος.

→ Αυτές οι τεχνολογίες διαμορφώνουν τον "σκελετό" των JCaS συστημάτων και επιτρέπουν τη μετάδοση δεδομένων με υψηλή απόδοση.

2^ο Επίπεδο: Επεξεργασία Σήματος & Διαχείριση Φάσματος

Εδώ ανήκουν οι προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης και πολλαπλής πρόσβασης, που βελτιώνουν τη χρήση του διαθέσιμου φάσματος:

- **CD-OFDM, OTFS**: Μέθοδοι διαμόρφωσης που αυξάνουν την ανθεκτικότητα του σήματος σε περιβάλλοντα υψηλής κινητικότητας.
- **Millimeter-Wave (mmWave) & Terahertz (THz)**: Χρήση υψηλότερων συχνοτήτων για μεγαλύτερες ταχύτητες και χαμηλή καθυστέρηση.
- **NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access)**: Επιτρέπει πολλαπλούς χρήστες να χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι για βέλτιστη εκμετάλλευση του φάσματος.

→ Αυτές οι τεχνικές εξασφαλίζουν **αποδοτική χρήση των ραδιοσυχνοτήτων**, μειώνοντας την παρεμβολή και αυξάνοντας τη χωρητικότητα.

3^ο Επίπεδο: Ενοποιημένα Συστήματα Ανίχνευσης & Επικοινωνίας

Αυτό το επίπεδο περιλαμβάνει τεχνολογίες που συνδυάζουν την επικοινωνία με την ανίχνευση (radar & sensing):

- **Joint Radar & Communication (JRaC)**: Συνδυάζει λειτουργίες ραντάρ και επικοινωνίας στο ίδιο σύστημα.
- **OCC & VLC (Optical Camera Communication & Visible Light Communication)**: Χρησιμοποιούν φως αντί για ραδιοκύματα για επικοινωνία και ανίχνευση.

→ Αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν τη **συνύπαρξη επικοινωνιών και ανίχνευσης** σε έξυπνα δίκτυα, βελτιώνοντας εφαρμογές όπως τα αυτόνομα οχήματα και οι έξυπνες πόλεις.

4^ο Επίπεδο: Τεχνητή Νοημοσύνη & Μηχανική Μάθηση

Το ανώτερο επίπεδο αφορά τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης για έξυπνη διαχείριση του συστήματος:

- **CNNs, SVM, RNNs:** Αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης για ανάλυση δεδομένων και αναγνώριση αντικειμένων.
- **Beamforming Optimization:** Χρήση AI για βέλτιστη καθοδήγηση του σήματος προς συγκεκριμένους χρήστες ή στόχους.

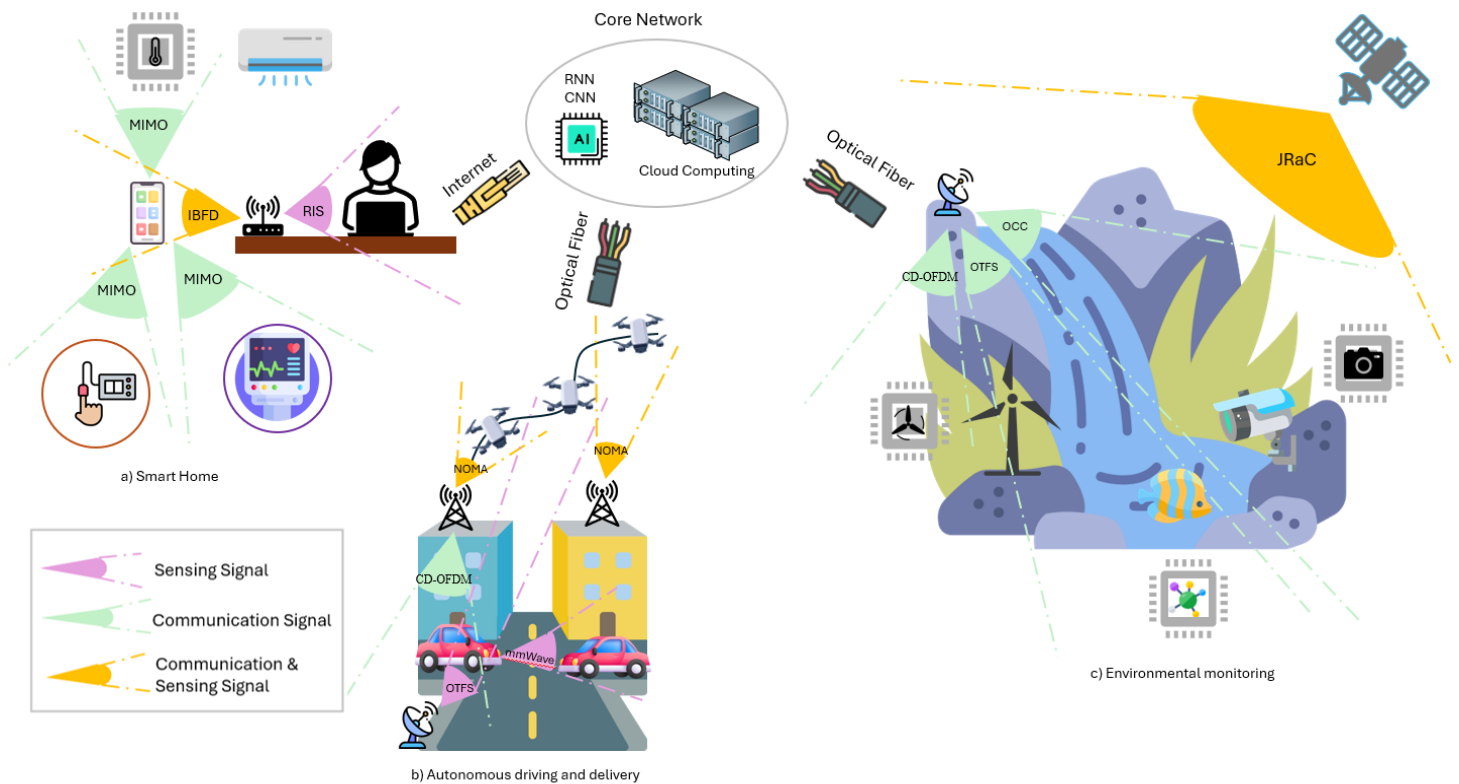
→ Η AI αυτοματοποιεί και βελτιστοποιεί τα JCaS συστήματα, επιτρέποντας **έξυπνότερη ανάλυση δεδομένων** και βελτίωση της απόδοσης.

Συμπέρασμα

Το διάγραμμα δείχνει την **ιεραρχία των τεχνικών** στα **JCaS συστήματα**, όπου κάθε επίπεδο χτίζει πάνω στο προηγούμενο:

- Η Υποδομή Δικτύου (MIMO, RIS, IBFD) επιτρέπει τη μετάδοση σήματος.
- Η Διαχείριση Φάσματος (CD-OFDM, mmWave, NOMA) εξασφαλίζει αποδοτική χρήση των ραδιοσυχνοτήτων.
- Το JRaC και το VLC/OCC επιτρέπουν συνδυασμό επικοινωνίας και ανίχνευσης.
- Η Τεχνητή Νοημοσύνη (CNNs, SVM, Beamforming) αυτοματοποιεί τη διαδικασία και μεγιστοποιεί την απόδοση.

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται τρία διαφορετικά περιβάλλοντα εφαρμογής των δικτύων JCaS καθώς και τις τεχνολογίες που εφαρμόζονται σε αυτά.



Εικόνα 9 Εφαρμογή JCaS σε διαφορετικά περιβάλλοντα

• Smart Home

Αυτή η περιοχή αναπαριστά ένα σύγχρονο έξυπνο σπίτι όπου συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ασύρματων και ενσύρματων τεχνολογιών.

Τεχνολογίες και στοιχεία :

1. MIMO (Multiple-Input Multiple-Output):

- Επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων μέσω πολλαπλών κεραιών, βελτιώνοντας την ποιότητα του σήματος και την ταχύτητα μεταφοράς.
- Χρησιμοποιείται για τη σύνδεση του κινητού τηλεφώνου και άλλων έξυπνων συσκευών (όπως θερμοστάτες και wearables).

2. IBFD (In-Band Full Duplex):

- Επιτρέπει ταυτόχρονη εκπομπή και λήψη δεδομένων στο ίδιο κανάλι συχνότητας, διπλασιάζοντας την απόδοση του δικτύου.
- Εφαρμόζεται στο router, βελτιώνοντας τη δικτυακή απόδοση.

3. **RIS (Reconfigurable Intelligent Surface):**

- Χρησιμοποιείται για την προσαρμογή και βελτιστοποίηση της διάδοσης του σήματος, μειώνοντας τις απώλειες.
- Τοποθετείται κοντά στο router για καλύτερη κάλυψη σε όλο το σπίτι.

4. **Συσκευές και συνδεσιμότητα:**

- **Έξυπνος θερμοστάτης:** Χρησιμοποιεί αισθητήρες θερμοκρασίας για τη ρύθμιση της θέρμανσης/κλιματισμού.
- **Wearables (έξυπνο ρολόι):** Παρακολουθεί βιομετρικά δεδομένα (καρδιακός ρυθμός κ.λπ.) και συνδέεται με το διαδίκτυο.
- **Συσκευές IoT:** Ελέγχουν φώτα, πόρτες, και οικιακές συσκευές.

5. **Σύνδεση στο διαδίκτυο:**

- Το router συνδέεται στο **διαδίκτυο μέσω καλωδίου Ethernet**.
- Τα δεδομένα μεταφέρονται στο **κεντρικό δίκτυο (Core Network)** για επεξεργασία και ανάλυση μέσω **Cloud Computing** και **AI**.

• **Autonomous Driving and Delivery**

Η περιοχή αυτή δείχνει ένα **έξυπνο περιβάλλον μεταφορών**, όπου αυτόνομα οχήματα, drones και υποδομές επικοινωνούν για ασφαλή και αποδοτική κυκλοφορία.

Τεχνολογίες και στοιχεία:

1. **NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access):**

- Επιτρέπει σε πολλά οχήματα και drones να χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι συχνοτήτων για μετάδοση δεδομένων, αυξάνοντας την απόδοση του φάσματος.

2. **CD-OFDM (Code-Division Orthogonal Frequency Division Multiplexing):**

- Επιτρέπει αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων σε περιβάλλοντα με υψηλή κινητικότητα, όπως δρόμοι και αστικά περιβάλλοντα.

3. **OTFS (Orthogonal Time Frequency Space):**

- Ενισχύει την απόδοση επικοινωνίας σε σενάρια όπου υπάρχει υψηλή διακύμανση του σήματος λόγω κίνησης.
- Χρησιμοποιείται από **τα αυτόνομα οχήματα και τις βάσεις επικοινωνίας**.

4. **mmWave (Millimeter Wave):**

- Παρέχει εξαιρετικά γρήγορες ασύρματες συνδέσεις μεταξύ οχημάτων και σταθμών βάσης.
- Χρησιμοποιείται για την επικοινωνία οχημάτων σε δρόμους υψηλής κυκλοφορίας.

5. **Drones και παράδοση:**

- Τα drones συνδέονται με σταθμούς βάσης και λαμβάνουν δεδομένα μέσω NOMA και OTFS.
- Χρησιμοποιούνται για παράδοση αγαθών ή εναέρια παρακολούθηση κυκλοφορίας.

6. **Δορυφορική σύνδεση & οπτική ίνα:**

- Χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση της υποδομής με το **Core Network**, ώστε να υπάρχει συνεχής ροή δεδομένων.

• **Environmental Monitoring**

Η τρίτη περιοχή επικεντρώνεται στην **παρακολούθηση του φυσικού περιβάλλοντος**, χρησιμοποιώντας αισθητήρες και δίκτυα επικοινωνίας.

Τεχνολογίες και στοιχεία στην περιβαλλοντική παρακολούθηση:

1. **Δορυφορική παρακολούθηση (JRaC):**

- Χρησιμοποιείται για τη συλλογή δεδομένων από απομακρυσμένες περιοχές.
- Επικοινωνεί με σταθμούς στη Γη για αποστολή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

2. **OCC (Optical Camera Communication):**

- Χρησιμοποιεί οπτική μετάδοση δεδομένων μέσω καμερών και αισθητήρων.
- Χρησιμοποιείται για την **παρακολούθηση του νερού, της χλωρίδας, και της πανίδας**.

3. **OTFS (Orthogonal Time Frequency Space):**

- Βοηθά στη σταθερή μετάδοση δεδομένων σε περιβάλλοντα με υψηλή υγρασία και πυκνή βλάστηση.

4. **Αισθητήρες περιβάλλοντος:**

- **Αισθητήρες ποιότητας νερού** παρακολουθούν τη ρύπανση και τις μεταβολές στη θερμοκρασία.

- **Έξυπνες κάμερες** καταγράφουν εικόνες και δεδομένα για τη βιοποικιλότητα.
- **Αισθητήρες χημικών ουσιών** ανιχνεύουν ρύπους και επικίνδυνες ουσίες.

5. Σύνδεση με το Core Network:

- Όλες οι πληροφορίες αποστέλλονται στο **κεντρικό δίκτυο μέσω δορυφορικών και επίγειων συνδέσεων**.
- Το **AI αναλύει τα δεδομένα** για την παροχή χρήσιμων πληροφοριών (όπως πρόβλεψη φυσικών καταστροφών).

- **Core Network**

Το **κεντρικό δίκτυο** είναι υπεύθυνο για την **επεξεργασία, αποθήκευση και ανάλυση δεδομένων** από όλες τις περιοχές.

- **AI (Artificial Intelligence):** Χρησιμοποιεί αλγορίθμους CNN (Convolutional Neural Networks) και RNN (Recurrent Neural Networks) για ανάλυση δεδομένων.
- **Cloud Computing:** Αποθηκεύει και επεξεργάζεται μεγάλες ποσότητες δεδομένων.
- **Οπτική Ίνα:** Χρησιμοποιείται για την ταχεία μεταφορά δεδομένων μεταξύ σταθμών βάσης και του κεντρικού δικτύου.

Στις παρακάτω ενότητες θα αναπτυχθούν λεπτομερέστερα οι τεχνικές που περιγράφηκαν στην παραπάνω εικόνα και θα δώσουμε περισσότερη έμφαση στην Code-Division Orthogonal Frequency-Division Multiplex, Orthogonal Time-Frequency Space, Multiple-Input and Multiple-Output και Joint Radar and Communication.

2.1 Κατηγορίες των JCaS Συστημάτων

Τα JCaS συστήματα (Joint Communication and Sensing) είναι τεχνολογίες που συνδυάζουν και ενσωματώνουν λειτουργίες επικοινωνίας και ανίχνευσης, με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης και της λειτουργικότητας των εφαρμογών όπου χρησιμοποιούνται. Αυτά τα συστήματα κατηγοριοποιούνται βάσει του τρόπου με τον οποίο συνδυάζονται οι δύο αυτές λειτουργίες και των συγκεκριμένων απαιτήσεων απόδοσης που χρειάζεται να καλύψουν για να είναι αποδοτικά και αξιόπιστα. Οι βασικές κατηγορίες των JCaS συστημάτων περιλαμβάνουν τα συνεργατικά, τα ανεξάρτητα και τα υβριδικά συστήματα, καθένα από τα οποία έχει μοναδικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κύριες κατηγορίες JCaS συστημάτων:

2.1.1 Συνεργατικά JCaS Συστήματα

Στα συνεργατικά JCaS συστήματα, οι λειτουργίες της επικοινωνίας και της ανίχνευσης είναι στενά ενοποιημένες και αλληλοεξαρτώμενες, με αποτέλεσμα να μπορούν να αλληλοϋποστηρίζονται και να βελτιστοποιούνται αμοιβαία. Αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα και τα σήματα που ανταλλάσσονται ανάμεσα στις δύο λειτουργίες δεν χρησιμοποιούνται μόνο για τον αρχικό τους σκοπό, αλλά προσφέρουν και πρόσθετες πληροφορίες στην άλλη λειτουργία. Για παράδειγμα, σε αυτόνομα οχήματα, οι αισθητήρες του συστήματος ανιχνεύουν αντικείμενα και εμπόδια γύρω από το όχημα, ενώ ταυτόχρονα διαμοιράζονται πληροφορίες θέσης και κίνησης με άλλα οχήματα. Έτσι, οι πληροφορίες που λαμβάνει το όχημα από το περιβάλλον του μέσω των αισθητήρων βελτιώνουν την ανίχνευση, ενώ τα δεδομένα που ανταλλάσσονται μέσω των επικοινωνιακών συστημάτων εξασφαλίζουν τη συνεχή ενημέρωση των άλλων οχημάτων για την ακριβή του θέση και κατεύθυνση. Η άμεση και συνεχής συνεργασία μεταξύ ανίχνευσης και επικοινωνίας προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως βελτιωμένη αξιοπιστία και ανθεκτικότητα του συστήματος απέναντι σε παρεμβολές, καθώς κάθε λειτουργία μπορεί να προσαρμόζεται γρήγορα με βάση τα δεδομένα που λαμβάνει από την άλλη.

2.1.2 Ανεξάρτητα JCaS Συστήματα

Σε αυτή την κατηγορία, οι λειτουργίες ανίχνευσης και επικοινωνίας παραμένουν ξεχωριστές, χωρίς αλληλοεξάρτηση και με αυτόνομη λειτουργία η καθεμία. Τα ανεξάρτητα JCaS συστήματα χρησιμοποιούν διακριτούς πόρους για κάθε λειτουργία, γεγονός που τους προσδίδει μεγαλύτερη αυτονομία και απομονώνει την επικοινωνία από την ανίχνευση. Αυτή η κατηγορία συστημάτων είναι ιδανική για περιπτώσεις όπου η ανίχνευση δεν χρειάζεται να είναι συνεχής ή όπου η επικοινωνία δεν πρέπει να εξαρτάται από την ανίχνευση. Εφαρμογές στρατιωτικού ή βιομηχανικού χαρακτήρα, όπου η ασφάλεια αποτελεί προτεραιότητα, επωφελούνται ιδιαίτερα από τα ανεξάρτητα JCaS συστήματα, καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις η ανίχνευση και η επικοινωνία δεν πρέπει να αλληλοεπηρεάζονται ή να χρησιμοποιούν κοινούς πόρους. Για παράδειγμα, σε στρατιωτικά περιβάλλοντα ή σε συστήματα παρακολούθησης, η ανίχνευση της θέσης και της κίνησης ενός

αντικειμένου μπορεί να απαιτεί πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια και εξειδίκευση από ό,τι η επικοινωνία, γι' αυτό και προτιμάται η απομόνωση των λειτουργιών αυτών ώστε να επιτευχθεί αυξημένη ασφάλεια και αποδοτικότητα.

2.1.3 Υβριδικά JCaS Συστήματα

Τα υβριδικά JCaS συστήματα αποτελούν μια ευέλικτη επιλογή, συνδυάζοντας χαρακτηριστικά και από τις δύο παραπάνω κατηγορίες, με δυνατότητα αλλαγής μεταξύ συνεργατικής και ανεξάρτητης λειτουργίας ανάλογα με τις ανάγκες και τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον λειτουργίας. Αυτού του είδους τα συστήματα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε εφαρμογές όπου οι ανάγκες μπορεί να ποικίλλουν. Για παράδειγμα, σε εφαρμογές δημόσιας ασφάλειας, τα υβριδικά JCaS συστήματα μπορούν να λειτουργούν σε συνεργατική λειτουργία όταν απαιτείται ενίσχυση της ανίχνευσης, όπως σε περιπτώσεις με φυσικά εμπόδια που μειώνουν την ορατότητα ή την ποιότητα του σήματος. Σε άλλες περιπτώσεις, όταν δεν απαιτείται ενισχυμένη ανίχνευση, το σύστημα μπορεί να μεταβαίνει σε ανεξάρτητη λειτουργία ώστε να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας και να διατηρηθεί αποδοτική η χρήση των πόρων. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει στα υβριδικά JCaS συστήματα να προσαρμόζονται δυναμικά στις απαιτήσεις κάθε περίπτωσης, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα και την εξοικονόμηση πόρων.

Συνολικά, η διαφοροποίηση των JCaS συστημάτων σε αυτές τις τρεις κατηγορίες επιτρέπει την καλύτερη προσαρμογή της κάθε τεχνολογίας στις ιδιαίτερες ανάγκες του εκάστοτε περιβάλλοντος, εξασφαλίζοντας αποδοτική χρήση των διαθέσιμων πόρων και μεγιστοποιώντας τη διάρκεια ζωής και την αξιοπιστία των συστημάτων. Με αυτό τον τρόπο, οι εφαρμογές JCaS μπορούν να παρέχουν υψηλής ποιότητας υπηρεσίες ανίχνευσης και επικοινωνίας σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών και χρήσεων [6], [7], [8], [12], [14].

2.2 Code-Division Orthogonal Frequency-Division Multiplex σε JCaS Συστήματα

Το Code-Division Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (CD-OFDM) είναι μια καινοτόμος μέθοδος πολυπλεξίας που ενσωματώνει τις τεχνικές της διαίρεσης κώδικα (Code-Division Multiple Access – CDMA) και της ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – OFDM). Στο πλαίσιο των JCaS συστημάτων, η CD-OFDM υποστηρίζει την ταυτόχρονη λειτουργία επικοινωνίας και ανίχνευσης, επιτρέποντας την πλήρη αξιοποίηση του φάσματος για πολλαπλούς σκοπούς.

Με την CD-OFDM, το φάσμα χρησιμοποιείται πιο αποδοτικά, καθώς οι λειτουργίες επικοινωνίας και ανίχνευσης μπορούν να μοιράζονται το ίδιο κανάλι χωρίς να απαιτούνται πρόσθετοι πόροι ή πρόσθετο εύρος ζώνης. Έτσι, η CD-OFDM συμβάλλει στη μείωση της πολυπλοκότητας των JCaS συστημάτων, ενώ επιτρέπει ευελιξία στην υποστήριξη ποικιλίας εφαρμογών, από ασύρματες επικοινωνίες μέχρι την ανίχνευση αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο.

2.2.1 Τι προσφέρει η CD-OFDM σε JCaS Συστήματα;

Η CD-OFDM τεχνολογία προσφέρει στα JCaS συστήματα δυνατότητες όπως:

- **Παράλληλη Λειτουργία Επικοινωνίας και Ανίχνευσης:** Η δυνατότητα κοινής χρήσης του ίδιου φάσματος και των ίδιων σημάτων για ταυτόχρονη επικοινωνία και ανίχνευση χωρίς την ανάγκη διαχωρισμού συχνοτήτων ή πόρων.
- **Βέλτιστη Διαχείριση Φάσματος:** Η CD-OFDM τεχνολογία επιτρέπει τη βέλτιστη εκμετάλλευση του φάσματος, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη απόδοση ανά μονάδα φάσματος. Αυτή η απόδοση επιτρέπει τη διαχείριση μεγαλύτερου όγκου δεδομένων, κάτι που είναι σημαντικό για εφαρμογές IoT και δικτύων 5G.
- **Ελαχιστοποίηση Παρεμβολών και Ενίσχυση Ανθεκτικότητας:** Οι κωδικοποιημένες συχνότητες επιτρέπουν τη μείωση των παρεμβολών μεταξύ των συχνοτήτων, κάτι που αυξάνει την ανθεκτικότητα και την αξιοπιστία της επικοινωνίας και της ανίχνευσης σε απαιτητικά περιβάλλοντα.

2.2.2 Λειτουργία CD-OFDM

Στην πρακτική λειτουργία του CD-OFDM, τα δεδομένα που πρέπει να μεταδοθούν διαχωρίζονται και αποστέλλονται μέσω πολλαπλών ορθογώνιων συχνοτήτων, καθεμιά από τις οποίες είναι κωδικοποιημένη με έναν μοναδικό κώδικα. Αυτή η προσέγγιση έχει ως εξής:

- **Διαχωρισμός Συχνοτήτων:** Η τεχνολογία OFDM εξασφαλίζει ότι οι συχνότητες παραμένουν ορθογώνιες (orthogonal), αποτρέποντας την αλληλοεπικάλυψη και μειώνοντας τις πιθανότητες παρεμβολής μεταξύ των καναλιών. Έτσι, το CD-OFDM επιτυγχάνει αξιόπιστη επικοινωνία και ανίχνευση ακόμη και σε πολυσύχναστα περιβάλλοντα.
- **Χρήση Κώδικα για Κάθε Συσχέτιση:** Ο διαχωρισμός του σήματος μέσω κώδικα (CDMA) διασφαλίζει ότι οι διαφορετικοί χρήστες ή οι διαφορετικές πληροφορίες δεν αλληλεπικαλύπτονται. Αυτό σημαίνει ότι κάθε χρήστης έχει πρόσβαση σε ένα διακριτό τμήμα του φάσματος χωρίς παρεμβολές, και τα σήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα για επικοινωνία και ανίχνευση.
- **Ανασυγκρότηση και Ανάλυση Σήματος:** Καθώς τα δεδομένα λαμβάνονται, η CD-OFDM προσφέρει ανάλυση του σήματος σε επίπεδο κώδικα, κάτι που ενισχύει την αποδοτικότητα και την ασφάλεια των πληροφοριών κατά την ανασυγκρότησή τους στο παραλήπτη.

2.2.3 Πλεονεκτήματα CD-OFDM σε JCaS Συστήματα

Η τεχνολογία CD-OFDM προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στα JCaS συστήματα, ιδίως όσον αφορά την αξιοπιστία, την αποδοτικότητα και την αντοχή στις παρεμβολές [7]. Συγκεκριμένα:

- **Αντοχή στις Παρεμβολές:** Η ορθογώνια διαίρεση συχνότητας εξασφαλίζει ότι οι διαφορετικές συχνότητες δεν αλληλεπικαλύπτονται, μειώνοντας τις παρεμβολές. Έτσι, τα JCaS συστήματα αποφεύγουν τις παρεμβολές που συχνά παρατηρούνται σε πολυσύχναστα περιβάλλοντα, όπως έξυπνες πόλεις και βιομηχανικά δίκτυα.

- **Αποδοτικότητα Φάσματος:** Το CD-OFDM επιτρέπει τη βέλτιστη χρήση του φάσματος, καθιστώντας την τεχνολογία ιδανική για περιβάλλοντα με περιορισμένο εύρος ζώνης, όπου απαιτείται αποδοτική χρήση των πόρων του φάσματος, όπως οι εφαρμογές IoT και οι έξυπνες πόλεις.
- **Αξιοπιστία σε Συνθήκες Πολλαπλών Διαδρομών:** Το CD-OFDM είναι ανθεκτικό στις επιπτώσεις των πολλαπλών διαδρομών (multipath), που εμφανίζονται συχνά σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα. Οι πολλαπλές διαδρομές μπορούν να αλλοιώσουν το σήμα, ωστόσο το CD-OFDM αντισταθμίζει αυτές τις παραμορφώσεις, ενισχύοντας την ποιότητα του σήματος και την ακρίβεια της ανίχνευσης.
- **Υποστήριξη Πολλαπλών Χρηστών:** Η χρήση διαίρεσης κώδικα επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται το ίδιο φάσμα χωρίς παρεμβολές, κάτι που είναι σημαντικό για τα JCaS συστήματα όπου απαιτείται ταυτόχρονη επικοινωνία και ανίχνευση.

2.2.4 Προκλήσεις CD-OFDM σε JCaS Συστήματα

Παρόλο που το CD-OFDM προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις στην υλοποίηση της τεχνολογίας αυτής στα JCaS συστήματα:

- **Αυξημένες Υπολογιστικές Απαιτήσεις:** Η χρήση του CD-OFDM απαιτεί περίπλοκους αλγόριθμους για την ανάλυση και την ανακατασκευή των δεδομένων, κάτι που αυξάνει τις απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ. Για εφαρμογές με περιορισμένους πόρους, όπως τα μικρής κλίμακας συστήματα IoT, αυτή η πολυπλοκότητα μπορεί να αποτελεί πρόκληση.
- **Υψηλή Κατανάλωση Ενέργειας:** Οι αυξημένες ανάγκες για επεξεργασία των δεδομένων μπορεί να οδηγήσουν σε υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας, κάτι που περιορίζει την εφαρμογή του CD-OFDM σε συσκευές με χαμηλή κατανάλωση, όπως τα αυτόνομα αισθητήρια συστήματα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιπτώσεις όπου η διατήρηση ενέργειας είναι κρίσιμη.
- **Απαιτήσεις Ακρίβειας Συγχρονισμού:** Το CD-OFDM απαιτεί ακριβή συγχρονισμό των κωδικών και των συχνοτήτων για να αποφεύγεται η αλληλοεπικάλυψη σημάτων, κάτι που μπορεί να είναι δύσκολο να επιτευχθεί σε περιβάλλοντα με διακυμάνσεις σήματος ή γρήγορες αλλαγές συχνοτήτων [6], [7].

2.2.5 Βασικές Ιδιότητες του CD-OFDM σε JCS Συστήματα

Συνδυασμός Επικοινωνίας και Ραντάρ:

Χρήση Ενιαίου Φάσματος:

- Αντί να απαιτούνται διαφορετικές ζώνες φάσματος για επικοινωνία και ραντάρ, το CD-OFDM χρησιμοποιεί το ίδιο φάσμα για τις δύο λειτουργίες.

- Η αρχιτεκτονική αυτή εξοικονομεί πόρους φάσματος, που είναι κρίσιμοι σε περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα χρηστών και περιορισμένο διαθέσιμο φάσμα.

Ενσωμάτωση Λειτουργιών σε Κοινό Πομποδέκτη:

- Οι ίδιες κεραίες και ηλεκτρονικά συστήματα χρησιμοποιούνται για την αποστολή σημάτων επικοινωνίας και ραντάρ, μειώνοντας το κόστος και την πολυπλοκότητα του εξοπλισμού.
- Το σήμα επικοινωνίας μεταφέρεται στους υποφορείς (subcarriers) του OFDM, ενώ οι ανακλάσεις του σήματος από τα αντικείμενα στον χώρο αξιοποιούνται για την ανίχνευση και ανάλυση του περιβάλλοντος [14].

2.2.6 Ταυτόχρονη λειτουργία επικοινωνίας και ανίχνευσης

Το CD-OFDM (Cognitive Dual-Orthogonal Frequency Division Multiplexing) εξασφαλίζει τη συνεχή και ταυτόχρονη λειτουργία των δύο κρίσιμων υποσυστημάτων, της επικοινωνίας και του ραντάρ, μέσα από την αποδοτική εκμετάλλευση του ίδιου φάσματος συχνοτήτων. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει στα συστήματα να λειτουργούν παράλληλα, διατηρώντας υψηλή απόδοση και ακρίβεια χωρίς να δημιουργούνται παρεμβολές ή περιορισμοί στη λειτουργικότητά τους.

- **Οι βασικοί άξονες λειτουργίας**

1. Επικοινωνία:

Το σύστημα επιτρέπει τη μετάδοση και λήψη δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, υποστηρίζοντας:

- Ανταλλαγή πληροφοριών: Μεταφορά δεδομένων μεταξύ συσκευών, όπως οχήματα, αισθητήρες ή υποδομές.
- Υψηλή ταχύτητα και αξιοπιστία: Διασφαλίζεται σταθερή ροή δεδομένων, ακόμα και σε περιβάλλοντα με έντονη κυκλοφορία ή παρεμβολές.
- Υποστήριξη πολυμέσων: Μεταφορά σύνθετων δεδομένων, όπως εικόνες ή βίντεο, για την ενίσχυση της κατανόησης του περιβάλλοντος ή τη λήψη αποφάσεων.

2. Ραντάρ:

Παράλληλα, το ίδιο σήμα χρησιμοποιείται για τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με το περιβάλλον. Ειδικότερα:

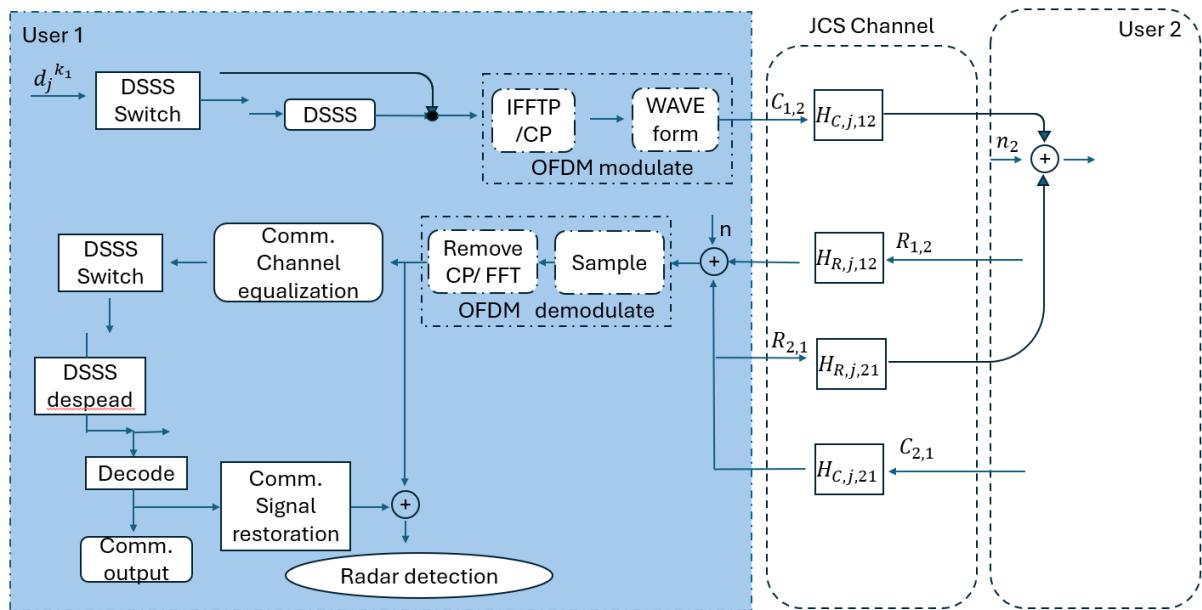
- Αναγνώριση και παρακολούθηση αντικειμένων: Ανίχνευση αντικειμένων στο περιβάλλον, όπως εμπόδια, πεζοί ή άλλα οχήματα.

- Υπολογισμός αποστάσεων: Χρήση του χρόνου ανάκλασης του σήματος για τον ακριβή προσδιορισμό αποστάσεων.
- Εκτίμηση ταχυτήτων: Ανάλυση του Doppler φαινομένου για την εκτίμηση των σχετικών ταχυτήτων αντικειμένων.
- Προσδιορισμός κατευθύνσεων: Μέτρηση της γωνίας άφιξης των ανακλώμενων σημάτων για την ακριβή τοποθέτηση αντικειμένων στον χώρο.

Η τεχνική διασποράς κωδίκων (Code-Division) στο CD-OFDM, που εφαρμόζεται μέσω της Direct-Sequence Spectrum Spreading (DSSS), αποτελεί έναν κρίσιμο μηχανισμό για τη βελτιστοποίηση της ταυτόχρονης επικοινωνίας και ανίχνευσης (JCS) σε δίκτυα 6G. Η DSSS διασπείρει το σήμα σε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων, πολλαπλασιάζοντάς το με έναν μοναδικό ορθογώνιο κωδικό διασποράς. Αυτό μειώνει δραστικά τις παρεμβολές και τον θόρυβο, αυξάνοντας την ανθεκτικότητα του σήματος. Το κέρδος διαίρεσης κωδίκων (Code-Division Multiplex Gain) που προκύπτει, ενισχύει σημαντικά το Signal-to-Interference-and-Noise Ratio (SINR), επιτρέποντας τη μετάδοση δεδομένων υψηλής αξιοπιστίας ακόμα και σε περιβάλλοντα χαμηλού SINR.

Παράλληλα, η τεχνική DSSS διασφαλίζει ότι το σήμα επικοινωνίας και το σήμα ραντάρ δεν αλληλοπαρεμβάλλονται, καθιστώντας δυνατή την ακριβή ανίχνευση αντικειμένων από τις ανακλάσεις του ραντάρ. Η ευελιξία της τεχνολογίας αυτής, με δυνατότητα προσαρμογής ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού, την καθιστά ιδανική για απαιτητικές εφαρμογές, όπως αυτόνομα οχήματα, βιομηχανικές διαδικασίες και έξυπνες πόλεις, προσφέροντας έναν συνδυασμό υψηλής αξιοπιστίας και αποδοτικής χρήσης φάσματος [5], [7], [14]. Το σύστημα εφαρμόζει τη Διαδοχική Ακύρωση Παρεμβολών (Successive Interference Cancellation - SIC) για να απομακρύνει τις παρεμβολές που προκαλούνται από τις ηχούς ραντάρ στο σήμα επικοινωνίας.

Η εικόνα που ακολουθεί απεικονίζει τη ροή λειτουργίας ενός συστήματος Joint Communication and Sensing (JCAS) με βάση τον συνδυασμό Code Division OFDM. Στην εικόνα παρουσιάζονται δύο χρήστες (User 1 και User 2) που επικοινωνούν μέσω του καναλιού JCAS [7].



Εικόνα 10 Ροή λειτουργίας ενός συστήματος JCAS με βάση Code Division OFDM

Πλευρά Αποστολής (User 1):

- Είσοδος δεδομένων ($d_j^{k_1}$): Τα δεδομένα που στέλνει ο χρήστης υποβάλλονται σε επεξεργασία.
- **DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)**: Το αρχικό σήμα δεδομένων που στέλνει ο χρήστης. Χρησιμοποιείται ένα ψευδοτυχαίο σήμα (που συχνά αναφέρεται ως "spreading code" ή "chip sequence"). Το αρχικό σήμα δεδομένων πολλαπλασιάζεται με το ψευδοτυχαίο σήμα κάθε στιγμή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός σήματος που έχει ευρύτερο φάσμα συχνοτήτων. Στην πράξη, το σήμα δεδομένων "απλώνεται" σε μια ευρύτερη περιοχή. Επειδή το σήμα είναι πλέον διασκορπισμένο σε ένα ευρύτερο φάσμα, καθίσταται πιο ανθεκτικό στις παρεμβολές και τον θόρυβο. Οι παρεμβολές και ο θόρυβος τείνουν να επηρεάζουν μόνο ένα μικρό μέρος του συνολικού φάσματος του σήματος.
- **OFDM Modulation (IFFT/CP)** : Τα δεδομένα που θέλουμε να μεταδώσουμε αρχικά μετατρέπονται σε μια ακολουθία συμβόλων. Αντί να μεταδίδουμε τα δεδομένα σε μία μόνο συχνότητα, τα διαμοιράζουμε σε πολλούς παράλληλους υποφορείς. Κάθε υποφορέας μεταφέρει ένα μέρος του συνολικού σήματος. Τέλος εφαρμόζουμε τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier (IFFT) σε αυτά τα δεδομένα για να τα μετατρέψουμε από τον συχνοτικό χώρο στον χρονικό χώρο. Η IFFT δημιουργεί ένα σήμα που είναι το άθροισμα όλων των υποφορέων. Προσθήκη Κυκλικού Προθέματος (Cyclic Prefix - CP) στο αρχικό σήμα αυτό σημαίνει ότι αντιγράφουμε το τέλος του

σήματος και το προσθέτουμε στην αρχή. Το CP βοηθά στη διαχείριση των πολυδιαδρομικών επιδράσεων (multipath effects) και εξασφαλίζει ότι οι υποφορείς παραμένουν ορθογώνιοι ακόμη και αν υπάρχουν καθυστερήσεις πολλαπλών διαδρομών.

- **Waveform Generation:** Δημιουργείται το τελικό διαμορφωμένο κύμα που θα σταλεί στο κανάλι.

Κανάλι JCAS

- H $\{C,j\}$: Πίνακας για τα κανάλια επικοινωνίας (Communication Channel): Αυτός ο πίνακας περιγράφει τα χαρακτηριστικά του καναλιού επικοινωνίας, όπως την απόσταση, το εύρος ζώνης, τις επιδράσεις θορύβου. Ο πίνακας αυτός βοηθά στη διαχείριση και τη βελτιστοποίηση της μετάδοσης δεδομένων μεταξύ των χρηστών.
- H $\{R,j\}$: Πίνακας για τα κανάλια ανίχνευσης (Radar Channel): Αυτός ο πίνακας περιγράφει τις παραμέτρους που σχετίζονται με την ανίχνευση ραντάρ, όπως την αντανάκλαση των σημάτων από αντικείμενα, την απόσταση και την ταχύτητα των αντικειμένων. Οι πληροφορίες αυτές βοηθούν στην ανίχνευση και την παρακολούθηση αντικειμένων.

Πλευρά Υποδοχής (User 1 - Επεξεργασία σήματος)

- OFDM Demodulation: Το πρώτο βήμα της αποδιαμόρφωσης είναι να αφαιρεθεί το CP από κάθε σύμβολο OFDM. Αφού αφαιρεθεί το CP, εφαρμόζουμε Fast Fourier Transfer (FFT) στο σήμα. Η FFT μετατρέπει το σήμα από τον χρονικό χώρο στον συχνοτικό χώρο. Στον συχνοτικό χώρο, μπορούμε να διαχωρίσουμε τους διαφορετικούς υποφορείς που χρησιμοποιούνται στην OFDM και να ανακτήσουμε τα δεδομένα που περιέχονται σε κάθε έναν από αυτούς. Χωρίς αυτή τη μετατροπή, τα δεδομένα θα ήταν ανακατεμένα στο χρονικό σήμα και δύσκολο να αναλυθούν.
- Communication Channel Equalization: Η εξίσωση του καναλιού επικοινωνίας είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται για να διορθώσει τις παραμορφώσεις που προκαλούνται στο σήμα κατά τη μετάδοσή του μέσω του καναλιού επικοινωνίας. Μειώνει την πιθανότητα σφαλμάτων κατά την αποδιαμόρφωση και την αποκωδικοποίηση, αυξάνοντας την αξιοπιστία της μετάδοσης δεδομένων.
- DSSS despread: Αφαιρείται η διασπορά φάσματος για την ανάκτηση των αρχικών δεδομένων.
- Decode: Τα δεδομένα αποκωδικοποιούνται και προκύπτει το τελικό αποτέλεσμα της επικοινωνίας.

Ανίχνευση Ραντάρ

Το ραντάρ είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση και την αναγνώριση αντικειμένων μέσω της ανάκλασης του σήματος. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει δύο βασικές φάσεις:

- **Επαναφορά Ραντάρ Σήματος:** Όταν το ραντάρ στέλνει ένα σήμα, αυτό το σήμα ταξιδεύει μέχρι να αντανακλαθεί από ένα αντικείμενο (π.χ. ένα αεροσκάφος ή ένα αυτοκίνητο). Αυτό το ανακλασμένο σήμα επιστρέφει στο ραντάρ, αλλά με μικρές διαφορές στην ταχύτητα και τη φωνή του, λόγω της κίνησης του αντικειμένου. Το σύστημα ραντάρ τότε επαναφέρει αυτό το ανακλασμένο σήμα, διασφαλίζοντας ότι η πληροφορία που λαμβάνει είναι ακριβής και χωρίς αποτυχίες. Αυτό επιτρέπει στο ραντάρ να εξασφαλίσει την ακρίβεια των μετρήσεων, όπως η απόσταση και η ταχύτητα του αντικειμένου.
- **Ανίχνευση Ραντάρ:** Το σύστημα αναγνωρίζει και επεξεργάζεται τις πληροφορίες που προέρχονται από το ανακλασμένο σήμα. Αυτές οι πληροφορίες μπορεί να περιλαμβάνουν την απόσταση του αντικειμένου από το ραντάρ, την ταχύτητα του και την κατεύθυνση του.

Επικοινωνία με User 2

- Τα δεδομένα που προορίζονται για τον χρήστη 2 περνούν μέσα από τα αντίστοιχα κανάλια και ακολουθεί η ίδια διαδικασία (ανάλυση επικοινωνίας και ανίχνευσης) [12].

2.3 Orthogonal Time-Frequency Space σε JCaS Συστήματα

Η Orthogonal Time-Frequency Space (OTFS) είναι μια νέα τεχνολογία διαμόρφωσης που αξιοποιεί τον χωροχρονικό τομέα για την αποστολή σημάτων, προσφέροντας σημαντική ανθεκτικότητα σε περιβάλλοντα με υψηλή κινητικότητα και δυναμικές συνθήκες διάδοσης. Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους, όπως το OFDM, η OTFS προσφέρει εξαιρετική απόδοση σε μεταβαλλόμενες συνθήκες, καθώς αξιοποιεί τις ιδιότητες του χρόνου και της συχνότητας για την αναπαράσταση και την αποστολή των δεδομένων.

Στο πλαίσιο των συστημάτων Joint Communications and Sensing (JCaS), η τεχνολογία OTFS προσφέρει τη δυνατότητα για σταθερή και αξιόπιστη επικοινωνία και ανίχνευση, ακόμη και σε απαιτητικά περιβάλλοντα με έντονη κινητικότητα. Αυτή η ανθεκτικότητα καθιστά την OTFS ιδανική για εφαρμογές όπου η ακρίβεια και η αντοχή των σημάτων είναι κρίσιμες, όπως σε αυτόνομα οχήματα και σε περιοχές με πυκνή κίνηση [15].

2.3.1 Τι προσφέρει η OTFS σε JCaS Συστήματα;

Η τεχνολογία OTFS προσφέρει στα JCaS συστήματα δυνατότητες όπως:

- **Ανθεκτικότητα σε Δυναμικές Συνθήκες:** Η OTFS επιτρέπει τη μετάδοση σταθερών σημάτων ακόμα και όταν υπάρχουν ταχύτατες διακυμάνσεις στη διαδρομή του σήματος, καθιστώντας την ιδανική για περιβάλλοντα με έντονη κινητικότητα, όπως οι αυτοκινητόδρομοι και οι περιοχές με πυκνή κυκλοφορία.

- **Συγχρονισμένη Ανίχνευση και Επικοινωνία σε Περιβάλλοντα Υψηλής Κινητικότητας:** Η OTFS επιτρέπει τη συνεχή και ακριβή ανίχνευση αντικειμένων και ταυτόχρονα την αποστολή και λήψη δεδομένων, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για εφαρμογές σε αυτόνομα οχήματα και συστήματα παρακολούθησης υψηλής ακρίβειας.
- **Ενίσχυση της Ακρίβειας του Σήματος:** Η OTFS επιτρέπει τη χρήση του φάσματος με τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιώνει τη διαύγεια και την ποιότητα του σήματος, καθιστώντας τη μετάδοση πιο αξιόπιστη ακόμη και σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν εμπόδια ή ταχεία κίνηση των αντικειμένων.

2.3.2 Λειτουργία OTFS

Η τεχνολογία OTFS λειτουργεί με τη μετατροπή των δεδομένων σε ένα δισδιάστατο πλέγμα χρόνου και συχνότητας, το οποίο αναπαριστά τις πληροφορίες σε δύο διαστάσεις αντί να στηρίζεται μόνο στον τομέα της συχνότητας, όπως συμβαίνει με το OFDM. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει σταθερή απόδοση, καθώς τα δεδομένα αποθηκεύονται και κωδικοποιούνται σε ένα πλέγμα που συνδυάζει τις δύο διαστάσεις, και περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. **Κωδικοποίηση Δεδομένων σε Δύο Διαστάσεις:** Στην OTFS, τα δεδομένα κωδικοποιούνται και οργανώνονται σε έναν χάρτη που συνδυάζει τον χρόνο και τη συχνότητα. Αυτό το πλέγμα επιτρέπει στο σύστημα να διατηρεί τα δεδομένα προσβάσιμα και ανακτήσιμα παρά τις αλλαγές στη διάδοση του σήματος λόγω ταχείας κίνησης ή αλλαγής του περιβάλλοντος.
2. **Μετασχηματισμός και Αποθήκευση Πληροφορίας:** Καθώς τα δεδομένα κινούνται μέσα στον χρόνο, η OTFS τα διατηρεί οργανωμένα σε ένα διδιάστατο πλέγμα, το οποίο διευκολύνει την ανάκτηση των πληροφοριών ακόμη και σε περιβάλλοντα με παρεμβολές και γρήγορες αλλαγές της πορείας του σήματος.
3. **Ανακατασκευή Σήματος:** Όταν το σήμα φτάσει στον παραλήπτη, η OTFS τεχνολογία επιτρέπει την ακριβή ανακατασκευή των δεδομένων, προσφέροντας ασφάλεια και αξιοπιστία στην επικοινωνία και ανίχνευση, κάτι που είναι ιδανικό για εφαρμογές JCaS με υψηλές απαιτήσεις ακρίβειας [15].

2.3.3 Πλεονεκτήματα OTFS σε JCaS Συστήματα

Η OTFS προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα για τα JCaS συστήματα, ιδίως όσον αφορά την ανθεκτικότητα σε μεταβαλλόμενες συνθήκες και την ακρίβεια ανίχνευσης. Τα βασικά πλεονεκτήματα της OTFS περιλαμβάνουν:

- **Ανθεκτικότητα στις Περιβαλλοντικές Αλλαγές:** Η OTFS διατηρεί την ποιότητα του σήματος ακόμη και σε περιβάλλοντα με γρήγορες αλλαγές, όπως οι αστικές περιοχές και

οι αυτοκινητόδρομοι, όπου η κινητικότητα των οχημάτων και οι φυσικές παρεμβολές (όπως κτίρια) επηρεάζουν συχνά το σήμα.

- ο **Υψηλή Ακρίβεια Ανίχνευσης**: Η OTFS επιτρέπει την ακριβή παρακολούθηση αντικειμένων σε κίνηση, όπως απαιτείται στα αυτόνομα οχήματα, προσφέροντας αξιόπιστη απόδοση σε περιβάλλοντα όπου η ακρίβεια είναι κρίσιμη.
- ο **Αποδοτικότητα σε Συνθήκες Πολλαπλών Διαδρομών**: Η OTFS μπορεί να λειτουργήσει αποδοτικά σε συνθήκες πολλαπλών διαδρομών (multipath), όπου το σήμα ανακλάται σε επιφάνειες πριν φτάσει στον παραλήπτη. Αυτή η δυνατότητα είναι απαραίτητη σε περιβάλλοντα όπου η ανακλώμενη κυκλοφορία είναι έντονη, καθώς βοηθά στη διατήρηση της σταθερότητας και της ακρίβειας του σήματος.

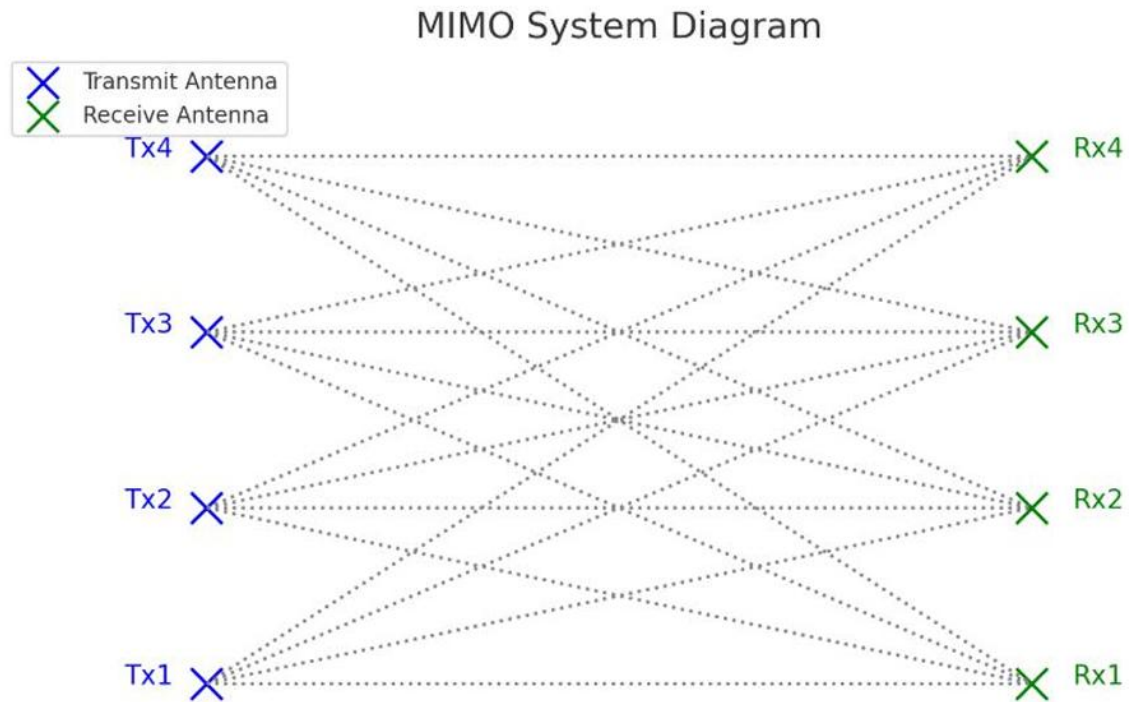
2.3.4 Προκλήσεις OTFS

Παρά τα πλεονεκτήματά της, η τεχνολογία OTFS παρουσιάζει ορισμένες προκλήσεις όταν εφαρμόζεται στα JCaS συστήματα:

- ο **Αυξημένες Απαιτήσεις Υπολογιστικής Ισχύος**: Η OTFS τεχνολογία απαιτεί σύνθετους αλγόριθμους και ισχυρό εξοπλισμό για την επεξεργασία και ανάλυση του διδιάστατου πλέγματος χρόνου και συχνότητας. Αυτό σημαίνει ότι η χρήση της OTFS μπορεί να είναι περιορισμένη σε συστήματα με περιορισμένη ισχύ ή μικρές IoT συσκευές.
- ο **Υψηλή Κατανάλωση Ενέργειας**: Λόγω των αυξημένων υπολογιστικών απαιτήσεων, η OTFS μπορεί να αυξήσει την κατανάλωση ενέργειας. Αυτή η πρόκληση είναι ιδιαίτερα σημαντική σε εφαρμογές JCaS που στηρίζονται σε συσκευές με περιορισμένη ενέργεια ή σε περιβάλλοντα όπου η εξοικονόμηση ενέργειας είναι απαραίτητη.
- ο **Προβλήματα Συγχρονισμού σε Δύσκολα Περιβάλλοντα**: Η OTFS απαιτεί υψηλή ακρίβεια στον συγχρονισμό του χρόνου και της συχνότητας για την ομαλή λειτουργία της. Σε περιβάλλοντα με γρήγορες αλλαγές στην κινητικότητα ή παρεμβολές, ο συγχρονισμός μπορεί να διαταραχθεί, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα της μετάδοσης [15].

2.4 Χρήση Multiple-Input and Multiple-Output σε JCaS Συστήματα

Το MIMO (Multiple Input Multiple Output) είναι μια από τις πιο σημαντικές τεχνολογίες στην ασύρματη επικοινωνία. Χρησιμοποιείται για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης, της χωρητικότητας και της αξιοπιστίας του δικτύου. Το MIMO επιτυγχάνει την ταυτόχρονη αποστολή και λήψη δεδομένων μέσω πολλαπλών κεραιών στον πομπό και τον δέκτη, βελτιστοποιώντας τη χρήση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος. Είναι βασικό στοιχείο για σύγχρονες τεχνολογίες όπως το Wi-Fi, το 4G LTE, και το 5G [11], [13].



Εικόνα 11 Σύστημα MIMO με πολλαπλές κεραίες στον πομπό (Tx) και τον δέκτη (Rx).

Το παραπάνω σχήμα απεικονίζει ένα MIMO σύστημα, με πολλαπλές κεραίες στον πομπό (Tx) και τον δέκτη (Rx). Οι μπλε κεραίες είναι οι πομποί, ενώ οι πράσινες είναι οι δέκτες, και οι γραμμές υποδεικνύουν τις πολλαπλές διαδρομές επικοινωνίας.

Τα κύρια πλεονεκτήματα του MIMO είναι :

1. Αυξημένη Χωρητικότητα Δικτύου

- **Πλεονέκτημα:** Το MIMO επιτρέπει την ταυτόχρονη αποστολή πολλαπλών ροών δεδομένων μέσα στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων.
- **Αποτέλεσμα:** Αυξάνει την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων χωρίς να απαιτείται επιπλέον φάσμα συχνοτήτων.
- **Εφαρμογή:** Αυτό είναι κρίσιμο για εφαρμογές όπως βιντεοκλήσεις, streaming υψηλής ανάλυσης και online gaming.

2. Βελτίωση Αξιοπιστίας Σήματος

- **Πλεονέκτημα:** Οι πολλαπλές κεραίες επιτρέπουν την εκμετάλλευση της χωρικής πολυπλεξίας (spatial diversity). Η χωρική πολυπλεξία είναι μια τεχνική στα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας που αξιοποιεί τη χρήση πολλαπλών κεραιών στον πομπό και/ή στον δέκτη για τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της ποιότητας του σήματος. Σε περιβάλλοντα με multipath propagation, όπου τα σήματα ταξιδεύουν μέσω πολλαπλών

διαδρομών λόγω ανακλάσεων, σκέδασης ή διάθλασης, η χωρική ποικιλία επιτρέπει στις κεραίες να λαμβάνουν ανεξάρτητες εκδοχές του ίδιου σήματος. Αυτό μειώνει την πιθανότητα πλήρους απώλειας του σήματος από φαινόμενα εξασθένησης (fading) ή παρεμβολές.

Με τη χρήση κατάλληλων τεχνικών συνδυασμού σημάτων, όπως το maximum ratio combining (MRC) ή το selection combining, ο δέκτης μπορεί να ενώσει τις διάφορες εκδοχές, βελτιώνοντας την ισχύ του σήματος και την ποιότητα επικοινωνίας. Το MRC είναι μια μέθοδος που συνδυάζει τα σήματα από πολλαπλές κεραίες με έναν βέλτιστο τρόπο, αποδίδοντας βάρη σε κάθε σήμα ανάλογα με την ισχύ και την ποιότητα του. Κάθε κεραία λαμβάνει μια διαφορετική εκδοχή του ίδιου σήματος. Τα σήματα σταθμίζονται (ενισχύονται ή αποδυναμώνονται) ανάλογα με την ισχύ τους.

Στη συνέχεια, συνδυάζονται ώστε να μεγιστοποιηθεί η συνολική ισχύς του λαμβανόμενου σήματος. Η χωρική πολυπλεξία είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αξιοπιστία των συστημάτων όπως το MIMO, διασφαλίζοντας σταθερή σύνδεση ακόμα και σε περιβάλλοντα με δύσκολες συνθήκες διάδοσης. Το Selection Combining είναι μια απλούστερη μέθοδος, όπου επιλέγεται μόνο το ισχυρότερο σήμα από τις διαθέσιμες εκδοχές. Ο δέκτης μετρά την ισχύ σήματος από κάθε κεραία. Επιλέγεται η κεραία που λαμβάνει το σήμα με την υψηλότερη ισχύ. Το σήμα από την επιλεγμένη κεραία χρησιμοποιείται ως το τελικό λαμβανόμενο σήμα.

- **Αποτέλεσμα:** Μειώνεται η πιθανότητα απώλειας δεδομένων σε περιβάλλοντα με παρεμβολές, σκιάσεις ή εξασθένηση καναλιού (fading).
- **Εφαρμογή:** Ιδανικό για αστικά περιβάλλοντα όπου τα σήματα υπόκεινται σε ανακλάσεις και διάθλαση.

3. Διάδοση πολλαπλών διαδρομών (Multipath Propagation)

Χωρική Πολυπλεξία (Spatial Multiplexing):

- Το MIMO χωρίζει το αρχικό σήμα σε πολλές ροές δεδομένων και τις στέλνει από διαφορετικές κεραίες.
- Οι διαφορετικές διαδρομές λειτουργούν ως "ανεξάρτητα κανάλια", μεταφέροντας ταυτόχρονα περισσότερες πληροφορίες.
- Αυτό αυξάνει τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος.

Χωρική Ποικιλότητα (Spatial Diversity):

- Το MIMO χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραίες για να λάβει ανεξάρτητες εκδοχές του ίδιου σήματος.
- Σε περιπτώσεις όπου μία διαδρομή έχει φθορά (π.χ., χαμηλή ισχύ λόγω fading), το σύστημα βασίζεται σε σήματα από άλλες διαδρομές που είναι πιο ισχυρά.
- Αυτό μειώνει την πιθανότητα απώλειας σήματος και βελτιώνει την αξιοπιστία.

Beamforming:

- Το MIMO κατευθύνει την ενέργεια του σήματος προς συγκεκριμένες διαδρομές με υψηλή ποιότητα, ελαχιστοποιώντας τις παρεμβολές από διαδρομές χαμηλής ποιότητας.
- Το αποτέλεσμα είναι πιο καθαρό σήμα στον δέκτη.

Ένα από τα κρίσιμότερα πλεονεκτήματα του MIMO είναι η ενεργειακή αποδοτικότητα. Με τη χρήση προηγμένων τεχνικών όπως το beamforming, το MIMO μπορεί να κατευθύνει την ισχύ του σήματος σε συγκεκριμένους χρήστες ή περιοχές, αντί να τη διασπείρει ομοιόμορφα. Αυτή η στοχευμένη μετάδοση μειώνει τις απώλειες ισχύος και τις παρεμβολές προς άλλες συσκευές, καθιστώντας την τεχνολογία ιδανική για εφαρμογές με περιορισμένη ενέργεια, όπως αισθητήρες IoT, φορητές συσκευές, και άλλες μικρές συσκευές. Επιπλέον, η στοχευμένη χρήση της ενέργειας από το MIMO όχι μόνο μειώνει την κατανάλωση ισχύος αλλά και διασφαλίζει πιο σταθερή σύνδεση σε απομακρυσμένες ή "δύσκολες" περιοχές.

Παράλληλα, το Multi-User MIMO (MU-MIMO) είναι μία από τις πιο ισχυρές εφαρμογές του MIMO, καθώς επιτρέπει την εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών ταυτόχρονα. Αυτό γίνεται μέσω της ταυτόχρονης χρήσης των διαθέσιμων καναλιών επικοινωνίας από διαφορετικούς χρήστες, κάτι που αυξάνει τη συνολική αποδοτικότητα του δικτύου. Αυτή η δυνατότητα είναι ζωτικής σημασίας για πολυσύχναστες περιοχές, όπως σταθμούς βάσης 5G, δημόσια Wi-Fi hotspots, ή χώρους με μεγάλη πυκνότητα χρηστών, όπως εμπορικά κέντρα, στάδια, και αστικά περιβάλλοντα. Το αποτέλεσμα είναι ένα δίκτυο που μπορεί να παρέχει αξιόπιστη σύνδεση και υψηλές ταχύτητες δεδομένων ακόμη και σε περιβάλλοντα με μεγάλη κυκλοφορία δεδομένων.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
1. Υψηλή Χωρητικότητα Δικτύου: Το MIMO αυξάνει τη ροή δεδομένων εκμεταλλευόμενο πολλαπλές διαδρομές επικοινωνίας.	1. Υψηλή Πολυπλοκότητα: Απαιτείται σύνθετη επεξεργασία σημάτων και ισχυροί αλγόριθμοι στον πομπό και τον δέκτη.
2. Βελτιωμένη Αξιοπιστία Σήματος: Χρήση πολλαπλών εκδοχών σήματος για μείωση της φθοράς και των παρεμβολών.	2. Αυξημένο Κόστος Υλικού: Πολλαπλές κεραίες και προηγμένος εξοπλισμός αυξάνουν το κόστος υλοποίησης.
3. Αντοχή σε Φθορά Καναλιού: Εκμεταλλεύεται τις πολλαπλές διαδρομές αντί να τις θεωρεί πρόβλημα.	3. Απαίτηση Ενέργειας: Η πολυπλοκότητα επεξεργασίας αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας, κάτι που επηρεάζει μικρές συσκευές.
4. Υποστήριξη Πολλαπλών Χρηστών (MU-MIMO): Εξυπηρετεί ταυτόχρονα πολλούς χρήστες, αυξάνοντας την αποδοτικότητα.	4. Εξάρτηση από το Περιβάλλον: Σε περιβάλλοντα με χαμηλό multipath, η απόδοση του MIMO είναι μειωμένη.

5. Βελτιωμένη Ενεργειακή Αποδοτικότητα: Με τεχνικές όπως το beamforming μειώνει την κατανάλωση και τις παρεμβολές.	5. Επικοινωνιακές Απώλειες: Χρειάζεται ακριβής συγχρονισμός μεταξύ πομπού και δεκτών για την αποφυγή απωλειών σήματος.
6. Κρίσιμη για Δίκτυα 5G και 6G: Υποστηρίζει τις αυξημένες ανάγκες ταχύτητας και χωρητικότητας των σύγχρονων δικτύων.	6. Προσαρμογή Υποδομής: Οι υπάρχουσες υποδομές μπορεί να χρειαστούν σημαντική αναβάθμιση για την υποστήριξη MIMO.

Πίνακας 2 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα του MIMO

2.4.1 Η Ενσωμάτωση JCAS και MIMO

Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας JCAS (Joint Communication and Sensing) και του MIMO (Multiple Input Multiple Output) είναι ένα καθοριστικό βήμα για την εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών, καθώς αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις των σύγχρονων δικτύων και προσφέρει νέες δυνατότητες. Αυτός ο συνδυασμός δεν είναι μόνο τεχνικά επαναστατικός, αλλά και στρατηγικά απαραίτητος για τη δημιουργία συστημάτων που είναι πιο αποδοτικά, πιο αξιόπιστα και ικανά να υποστηρίξουν προηγμένες εφαρμογές σε διάφορους τομείς. Το JCAS (Joint Communication and Sensing) επιτρέπει την αποδοτική χρήση του ίδιου εξοπλισμού και φάσματος για δύο βασικές και αλληλοσυμπληρούμενες λειτουργίες: επικοινωνία και ανίχνευση. Η επικοινωνία αναφέρεται στη μεταφορά δεδομένων μεταξύ συσκευών ή χρηστών, ενώ η ανίχνευση αφορά τον εντοπισμό, την παρακολούθηση και τη μέτρηση αντικειμένων στο περιβάλλον. Με τη χρήση της τεχνολογίας MIMO (Multiple Input Multiple Output), οι κεραιές μπορούν να πραγματοποιούν και τις δύο λειτουργίες ταυτόχρονα, κατευθύνοντας δέσμες σήματος προς τους χρήστες για επικοινωνία και ταυτόχρονα προς τους στόχους για ανίχνευση. Αυτή η συγχώνευση των λειτουργιών είναι σημαντική καθώς εξοικονομεί πόρους, αποφεύγοντας την ανάγκη για ξεχωριστά συστήματα για επικοινωνία και ανίχνευση, ενώ παράλληλα βελτιώνει την αποδοτικότητα, ενοποιώντας τις δύο λειτουργίες σε μια ενιαία υποδομή [6], [11], [13].

• Αρχιτεκτονική του Συστήματος JCAS Multi-User MIMO

1. Διαδρομή Μετάδοσης (TX):

- **Baseband Processing:** Αυτή είναι η περιοχή όπου το ψηφιακό σήμα επεξεργάζεται πριν μετατραπεί σε αναλογικό. Είναι όπως ο εγκέφαλος που αποφασίζει τι θα πει κάποιος.
- **Digital to Analog Converters (DACs):** Μετατρέπουν τα ψηφιακά σήματα σε αναλογικά κύματα. Λαμβάνουν τα ψηφιακά δεδομένα, τα οποία είναι σε δυαδική μορφή, και τα μετατρέπουν σε αναλογικά σήματα
- **RF Chains (Radio Frequency Chains):** Περιλαμβάνουν ενισχυτές που διαμορφώνουν το σήμα RF για να είναι έτοιμο για μετάδοση και οι μίκτες συνδυάζουν το σήμα RF με άλλα σήματα για να το αλλάξουν συχνότητα. Αυτό είναι σημαντικό για να μπορέσει το σήμα να σταλεί σωστά και να ληφθεί από την κεραιά.

- ο **Κεραία**: Η συσκευή που στέλνει το σήμα στον αέρα.

2. Διαδρομή Λήψης (RX):

- ο **Κεραία**: Η συσκευή που λαμβάνει το σήμα από τον αέρα.
- ο **RF Chains**: Περιλαμβάνουν ενισχυτές και μίκτες που προετοιμάζουν το ληφθέν σήμα για περαιτέρω επεξεργασία.
- ο **Analog to Digital Converters (ADCs)**: Μετατρέπουν τα αναλογικά κύματα σε ψηφιακά σήματα για να μπορούν να επεξεργαστούν από υπολογιστές.
- ο **Radar Processing**: Η διαδικασία που αναλύει τα ληφθέντα σήματα για να εντοπίσει αντικείμενα και να παρέχει πληροφορίες.

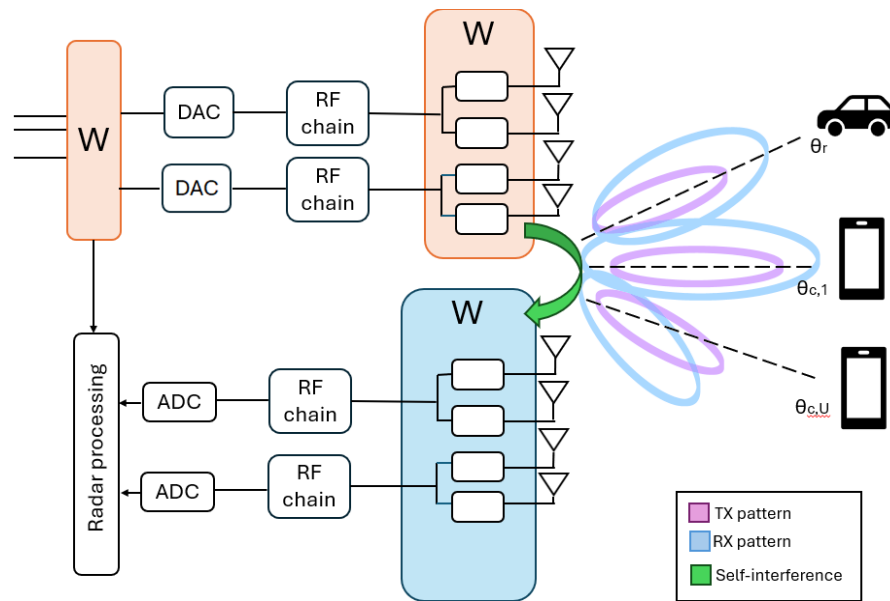
3. Αυτοπαρεμβολές:

- ο **Αυτοπαρεμβολές (Self-Interference)**: Όταν το σήμα που στέλνει ο πομπός παρεμβάλλεται με το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν η κεραία εκπομπής και η κεραία λήψης είναι πολύ κοντά η μία στην άλλη.
- ο **Σχέδιο Εκπομπής (TX Pattern)**: Το μοτίβο εκπομπής απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα. Δείχνει την κατεύθυνση και τη δύναμη του σήματος που στέλνεται.
- ο **Σχέδιο Λήψης (RX Pattern)**: Το μοτίβο λήψης απεικονίζεται με μπλε χρώμα. Δείχνει την κατεύθυνση και τη δύναμη του σήματος που λαμβάνεται.

4. Στόχοι και Χρήστες:

- ο **Στόχοι (Targets)**: Αντικείμενα όπως το αυτοκίνητο στην εικόνα. Η γωνία αντιπροσωπεύει τη θέση του αυτοκινήτου σε σχέση με την κεραία.
- ο **Κινητές Συσκευές (Mobile Devices)**: Συσκευές που επικοινωνούν με το σύστημα. Οι γωνίες θ_r, θ_c αντιπροσωπεύουν τις θέσεις των χρηστών.

Το σύστημα JCAS multi-user MIMO χρησιμοποιεί αυτές τις τεχνικές για να επικοινωνεί με πολλούς χρήστες ταυτόχρονα και να ανιχνεύει αντικείμενα στον περιβάλλοντα χώρο. Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει την αρχιτεκτονική του Συστήματος JCAS Multi-User MIMO



Εικόνα 12 Η Αρχιτεκτονική του Συστήματος JCAS Multi-User MIMO

3

Σχεδιασμός *Joint Radar and Communication*

Η αυξανόμενη ζήτηση για συχνότητες σε συστήματα ραντάρ και επικοινωνίας έχει καταστήσει αναγκαία την ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων που συνδυάζουν ανίχνευση και επικοινωνία σε μια ενιαία πλατφόρμα. Αυτή η τάση προκύπτει λόγω της αυξανόμενης συμφόρησης στο φάσμα συχνοτήτων, των αυξημένων απαιτήσεων για έξυπνες εφαρμογές, και της ανάγκης για καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων. Τα συστήματα Joint Radar and Communication (JRaC) αντιπροσωπεύουν αυτή τη νέα τεχνολογική κατεύθυνση, προσφέροντας σημαντικά οφέλη, όπως εξοικονόμηση φάσματος, εξάλειψη παρεμβολών, ενίσχυση της αποδοτικότητας των λειτουργιών, και μείωση του κόστους μέσω της κοινής χρήσης υλικού και πόρων.

• **Τεχνολογία και Οφέλη του JRaC**

Η τεχνολογία JRaC παρέχει μια στρατηγική ενοποίηση ραντάρ και επικοινωνιών, εστιάζοντας στα εξής πλεονεκτήματα:

- **Εξοικονόμηση Φάσματος:** Τα συστήματα JRaC χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη συχνοτήτων για ανίχνευση και επικοινωνία, αποτρέποντας την υποχρησιμοποίηση του φάσματος και βελτιώνοντας την αποδοτικότητα.
- **Εξάλειψη Παρεμβολών:** Μέσω έξυπνων τεχνικών διαμόρφωσης και beamforming, το JRaC μπορεί να μειώσει δραστικά τις παρεμβολές μεταξύ των σημάτων ραντάρ και επικοινωνίας.
- **Βελτιστοποίηση Επιδόσεων:** Η συνεργασία μεταξύ ραντάρ και επικοινωνιών επιτρέπει την καλύτερη προσαρμογή στις περιβαλλοντικές συνθήκες, ενισχύοντας τόσο την ακρίβεια ανίχνευσης στόχων όσο και την αξιοπιστία της επικοινωνίας.

Δύο κύριες κατευθύνσεις για την ενσωμάτωση ραντάρ και επικοινωνίας υπάρχουν για την αντιμετώπιση της συμφόρησης του φάσματος συχνοτήτων και της βελτιστοποίησης της χρήσης πόρων.

3.1 Συνύπαρξη ραντάρ και επικοινωνιών

Η συνύπαρξη ραντάρ και επικοινωνιών (Radar-Communication Coexistence) είναι μια προσέγγιση που επικεντρώνεται στη δυνατότητα λειτουργίας των δύο συστημάτων στις ίδιες ζώνες συχνοτήτων χωρίς σημαντική παρεμβολή μεταξύ τους. Η κύρια ιδέα είναι να αξιοποιηθεί το ίδιο φάσμα συχνοτήτων, αποφεύγοντας την ανάγκη αποκλειστικής κατανομής, που συχνά οδηγεί σε

χαμηλή αποδοτικότητα του φάσματος. Το Opportunistic Spectrum Access βασίζεται στην ιδέα της δυναμικής εκμετάλλευσης του φάσματος. Το ραντάρ θεωρείται ο πρωτεύων χρήστης (Primary User - PU) του φάσματος, ενώ το σύστημα επικοινωνίας λειτουργεί ως δευτερεύων χρήστης (Secondary User - SU). Αυτό σημαίνει ότι το SU πρέπει να παρακολουθεί το φάσμα, ώστε να μεταδίδει μόνο όταν ο PU δεν χρησιμοποιεί το φάσμα. Για να αποφευχθεί η παρεμβολή στο ραντάρ, το σύστημα επικοινωνίας πρέπει να ελέγχει την ισχύ εκπομπής του, εξασφαλίζοντας ότι ο λόγος παρεμβολής προς θόρυβο (Interference-to-Noise Ratio - INR) δεν θα υπερβαίνει ένα επιτρεπτό όριο. Η χρήση MIMO κάνει ακόμα πιο περίπλοκη την επικοινωνία καθώς τα συμβατικά ραντάρ έχουν συγκεκριμένους κύριους και πλάγιους λοβούς εκπομπής, τους οποίους το σύστημα επικοινωνίας μπορεί να εντοπίσει και να αξιοποιήσει για να αποφύγει παρεμβολές. ο MIMO ραντάρ, αντίθετα, εκπέμπει ομοιοκατευθυντικά σήματα για να ανιχνεύσει άγνωστους στόχους σε ολόκληρο το χώρο, ενώ δημιουργεί κατευθυντικές δέσμες για την παρακολούθηση των στόχων. Λόγω της αδυναμίας αναγνώρισης των πλάγιων λοβών, απαιτούνται πιο εξελιγμένες τεχνολογίες. Ο σχεδιασμός προκωδικοποίησης εκπομπής (transmit precoding design) είναι μια προηγμένη τεχνική επεξεργασίας σήματος που χρησιμοποιείται στα συστήματα επικοινωνιών και στα ραντάρ για τη βελτίωση της απόδοσης εκπομπής και τη μείωση των παρεμβολών.

Η έννοια εκτίμησης καναλιού παρεμβολής (Interference Channel Estimation), είναι κρίσιμη πριν σχεδιαστεί το σήμα εκπομπής. Αυτή η διαδικασία αφορά την απόκτηση πληροφοριών για το κανάλι παρεμβολής (Interference Channel State Information - ICSI), δηλαδή για το κανάλι μέσω του οποίου διαδίδονται τα σήματα παρεμβολής μεταξύ του ραντάρ και του συστήματος επικοινωνίας. Το ICSI είναι η διαδικασία με την οποία υπολογίζονται οι ιδιότητες του καναλιού που προκαλεί παρεμβολές μεταξύ δύο συστημάτων (π.χ., μεταξύ ραντάρ και βάσης κινητής τηλεφωνίας). Αυτές οι πληροφορίες είναι απαραίτητες για τη διαχείριση και την ακύρωση των παρεμβολών. Μια σημαντική μέθοδος εκτίμησης ICSI είναι να στέλνονται ειδικά σήματα (πιλοτικά) από το σύστημα επικοινωνίας προς το ραντάρ, τα οποία χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του καναλιού. Η Εκτίμηση ελάχιστων τετραγώνων (Least Squares - LS) υπολογίζει το κανάλι ελαχιστοποιώντας το σφάλμα μεταξύ του λαμβανόμενου και του αναμενόμενου σήματος. Η Εκτίμηση ελάχιστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Minimum Mean Squared Error - MMSE) βελτιστοποιεί την εκτίμηση του καναλιού, λαμβάνοντας υπόψη στατιστικές ιδιότητες του σήματος και του θορύβου. Παρόλο που αυτές οι μέθοδοι είναι αποτελεσματικές, έχουν δύο βασικά μειονεκτήματα:

- **Κατανάλωση υπολογιστικών πόρων:** Απαιτούν αυξημένη υπολογιστική ισχύ.
- **Αυξημένα σήματα σηματοδοσίας:** Η ανταλλαγή πιλοτικών σημάτων αυξάνει την κίνηση στο δίκτυο.

Μια πιο πρωτοποριακή μέθοδος είναι να χρησιμοποιείται **το κύμα σάρωσης του ραντάρ** ως πιλοτικό σήμα για την εκτίμηση του καναλιού. Δηλαδή, το ίδιο το σήμα που εκπέμπει το ραντάρ για την ανίχνευση στόχων χρησιμοποιείται και για την εκτίμηση ICSI. Το σύστημα επικοινωνίας

(π.χ., η βάση κινητής τηλεφωνίας - BS) πρέπει πρώτα να αναγνωρίσει τη λειτουργική κατάσταση του ραντάρ:

- **Αναζήτηση (search mode):** Όταν το ραντάρ αναζητά νέους στόχους.
- **Παρακολούθηση (tracking mode):** Όταν το ραντάρ παρακολουθεί ήδη γνωστούς στόχους. Αυτή η αναγνώριση γίνεται μέσω υποθετικών ελέγχων (hypothesis testing methods). Μόλις εντοπιστεί η κατάσταση λειτουργίας, το σύστημα επικοινωνίας χρησιμοποιεί το σήμα του ραντάρ για την εκτίμηση του καναλιού παρεμβολής.

3.2 Dual-Functional Radar-Communication (DFRC)

Τα συστήματα ραντάρ χρησιμοποιούνται για να ανιχνεύουν και να παρακολουθούν αντικείμενα, π.χ. την απόσταση, την ταχύτητα ή την κατεύθυνσή τους. Τα συστήματα επικοινωνίας μεταφέρουν δεδομένα μεταξύ δύο ή περισσότερων συσκευών μέσω ασύρματων καναλιών. Τα DFRC συστήματα επιδιώκουν να εκτελούν και τις δύο λειτουργίες ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας τους ίδιους πόρους (π.χ. φάσμα συχνοτήτων, κεραίες, ενέργεια). Η συγχώνευση ραντάρ και επικοινωνιών είναι σημαντική γιατί:

- **Εξοικονόμηση πόρων:**
 - Αντί να απαιτούνται ξεχωριστά συστήματα για ραντάρ και επικοινωνία, τα DFRC μειώνουν το κόστος, την πολυπλοκότητα και την κατανάλωση ενέργειας.
- **Αποδοτικότερη χρήση του φάσματος:**
 - Και τα δύο συστήματα συχνά χρησιμοποιούν παρόμοιες συχνότητες. Τα DFRC συστήματα εξοικονομούν φάσμα μοιράζοντάς το.
- **Ευφυΐα και συντονισμός:**
 - Επιτρέπουν την καλύτερη συνεργασία μεταξύ των δύο λειτουργιών, για παράδειγμα σε εφαρμογές όπως τα αυτόνομα οχήματα, τα drones.

Τα DFRC συστήματα συνδυάζουν τη λειτουργία του ραντάρ με τη λειτουργία ενός συστήματος επικοινωνίας, επιδιώκοντας έναν συμβιβασμό μεταξύ των απαιτήσεων και των στόχων αυτών των δύο τεχνολογιών. Ο συμβιβασμός αναφέρεται στην ανάγκη να ισορροπήσουν οι απαιτήσεις των δύο λειτουργιών:

- Το ραντάρ χρειάζεται ισχυρά σήματα για να ανιχνεύσει στόχους με ακρίβεια.
- Η επικοινωνία χρειάζεται σήματα με υψηλή χωρητικότητα για να μεταφέρει δεδομένα αποτελεσματικά.
- Ένας συμβιβασμός είναι απαραίτητος ώστε το σύστημα να λειτουργεί καλά και στις δύο λειτουργίες, χωρίς να υπονομεύεται καμία από αυτές.

Η θεωρία πληροφορίας είναι ένας κλάδος των μαθηματικών και της μηχανικής που ασχολείται με τη μελέτη της κωδικοποίησης, μετάδοσης και αποθήκευσης της πληροφορίας. Η Θεωρία

Πληροφορίας για το DFRC είναι καλά κατανοητό ότι το ραντάρ λειτουργεί με τρόπο που διαφέρει θεμελιωδώς από τα κλασικά συστήματα επικοινωνίας. Συγκεκριμένα, η επικοινωνία λαμβάνει χώρα μεταξύ δύο ή περισσότερων συνεργατικών πομποδεκτών. Αντίθετα, τα συστήματα ραντάρ στέλνουν σήματα ανίχνευσης σε μη συνεργατικούς στόχους οι οποίοι δεν παρέχουν άμεσα δεδομένα για την ανίχνευση ή την παρακολούθησή τους, και εξάγουν χρήσιμες πληροφορίες που περιέχονται στα ανακλώμενα σήματα του στόχου. Στο ραντάρ, η "πληροφορία" αφορά την ικανότητα ανίχνευσης στόχων. Οι μονάδες ανάλυσης του ραντάρ (resolution units) μπορούν να θεωρηθούν σαν σημεία ενός "αστερισμού" ενώ η χωρητικότητα του ραντάρ ορίζεται ως ο αριθμός των διακριτών στόχων που μπορεί να ανιχνεύσει. Η αβεβαιότητα που εισάγεται από τον θόρυβο του ραντάρ εκφράζεται ως εντροπία (entropy). Το ραντάρ μειώνει αυτή την αβεβαιότητα μέσω της εκτίμησης των παραμέτρων του στόχου.

- Η ελάχιστη αβεβαιότητα που μπορεί να επιτευχθεί περιγράφεται από το **Κατώτερο Όριο Cramér-Rao (CRB)**. Είναι μια θεμελιώδης έννοια στη στατιστική και τη θεωρία εκτίμησης, που περιγράφει το θεωρητικό κατώτατο όριο της αβεβαιότητας που μπορεί να επιτευχθεί κατά την εκτίμηση μιας παραμέτρου ενός συστήματος. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό στα συστήματα ραντάρ και επικοινωνίας, καθώς παρέχει έναν τρόπο αξιολόγησης της μέγιστης δυνατής ακρίβειας που μπορεί να επιτευχθεί.

3.2.1 Τεχνολογίες Ραντάρ: CW και Παλμικό Ραντάρ:

Continuous-Wave (CW) Radar:

- Το CW ραντάρ εκπέμπει συνεχώς ένα σήμα ανίχνευσης ενώ ταυτόχρονα λαμβάνει το ηχώ κύμα που επιστρέφει από τον στόχο.
- Για τη σωστή λειτουργία, απαιτεί υψηλή απομόνωση μεταξύ της κεραίας εκπομπής (TX) και της κεραίας λήψης (RX), λόγω της συνεχούς εκπομπής και λήψης.

Pulsed Radar:

- Εκπέμπει περιοδικά σύντομους και ισχυρούς παλμούς και λαμβάνει το ηχώ κύμα μετά τη λήξη της εκπομπής.
- Χρησιμοποιεί χρονική διαίρεση (time-division, TD) για την εκπομπή και τη λήψη, επιτρέποντας τη χρήση της ίδιας κεραίας για TX και RX.

- **Κυματομορφές Ραντάρ**

Οι κυματομορφές που χρησιμοποιούνται στα ραντάρ είναι κρίσιμες για την απόδοσή τους. Οι πιο συνηθισμένες είναι:

1. Chirp Signals (Linear Frequency Modulation - LFM):

- Χρησιμοποιούνται ευρέως τόσο σε CW όσο και σε pulsed radar.
- **CW Radar με Chirp:** Αναφέρεται ως Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) radar. Η συχνότητα αυξάνεται ή μειώνεται γραμμικά κατά τη διάρκεια του σήματος, κάτι που διευκολύνει την εκτίμηση απόστασης και ταχύτητας.
- **Pulsed Radar με Chirp:** Αυξάνει την ανάλυση απόστασης μέσω της διεύρυνσης του εύρους συχνοτήτων και την ανίχνευση μεγαλύτερων αποστάσεων με αύξηση της ενέργειας του παλμού (μέσω της διάρκειας του παλμού).

2. Τεχνική Συμπίεσης Παλμών (Pulse Compression - PC):

- Συνδυάζει μεγάλο εύρος συχνοτήτων και υψηλή ενέργεια σήματος, επιτρέποντας υψηλή ανάλυση και μεγάλη εμβέλεια ταυτόχρονα.
- **Phase-Coded Waveforms:**
 - Barker Codes: Χρησιμοποιούνται για να διαμορφώσουν τη φάση κάθε υπο-παλμού ώστε να επιτευχθεί βέλτιστη συμπίεση παλμού με χαμηλά πλευρικά λοβώματα (sidelobes) και ανθεκτικότητα στο Doppler

3.2.2 Κυματομορφές DFRC: Συνδυάζοντας Ραντάρ και Επικοινωνίες

Οι DFRC (Dual-Functional Radar and Communication) κυματομορφές επιτρέπουν τη συνδυαστική χρήση των ραντάρ και των επικοινωνιακών λειτουργιών, διασφαλίζοντας τη βέλτιστη απόδοση και των δύο. Η ενσωμάτωση επικοινωνιακών δεδομένων σε κυματομορφές ραντάρ είναι ένα κρίσιμο στοιχείο αυτών των συστημάτων.

• Τεχνική *Pulse Interval Modulation (PIM)*

Η Pulse Interval Modulation (PIM) είναι μια πρωτοποριακή τεχνική που αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1960 για την ενσωμάτωση επικοινωνιακών δεδομένων σε παλμούς ραντάρ. Η προσέγγιση αυτή προσφέρει έναν απλό και αποτελεσματικό τρόπο να συνδυαστεί η λειτουργία ανίχνευσης με την επικοινωνία, επιτρέποντας τη μεταφορά πληροφοριών μέσω της προσαρμογής των χρονικών διαστημάτων μεταξύ των παλμών. Η PIM εμφανίστηκε ως λύση στην ανάγκη συνδυασμού επικοινωνίας και ανίχνευσης σε συστήματα ραντάρ, χωρίς να απαιτείται ξεχωριστή υποδομή. Μέσω αυτής της μεθόδου, επικοινωνιακά δεδομένα μπορούν να ενσωματωθούν σε παλμούς ραντάρ. Η PIM δεν απαιτεί περίπλοκα υλικά ή πρόσθετη υποδομή. Μπορεί να ενσωματωθεί σε υπάρχοντα συστήματα ραντάρ. Η ανίχνευση παραμένει το ίδιο αποτελεσματική, καθώς οι αλλαγές στα χρονικά διαστήματα δεν επηρεάζουν τη βασική μορφή των παλμών. Ο σημαντικότερος περιορισμός της PIM είναι η περιορισμένη χωρητικότητα δεδομένων. Ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων περιορίζεται από τη συχνότητα των παλμών. Αυτό το καθιστά λιγότερο κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν υψηλό ρυθμό δεδομένων. Η Pulse Interval Modulation (PIM) αποτελεί

μια απλή αλλά αποτελεσματική μέθοδο για τη συνδυαστική χρήση ραντάρ και επικοινωνίας. Παρά τους περιορισμούς της χωρητικότητας, είναι κατάλληλη για εφαρμογές όπου απαιτείται χαμηλός ρυθμός δεδομένων και ταυτόχρονη λειτουργία ραντάρ.

- **Κυματομορφές Chirp**

Οι chirp κυματομορφές αποτελούν μια από τις πιο διαδεδομένες και χρήσιμες τεχνολογίες για συστήματα ραντάρ και επικοινωνίας, λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών τους. Οι chirp κυματομορφές είναι σήματα στα οποία η συχνότητα μεταβάλλεται γραμμικά με την πάροδο του χρόνου. Παρουσιάζουν ανθεκτικότητα στον θόρυβο, καθιστώντας τις ιδανικές για περιβάλλοντα με παρεμβολές καθώς και παρέχουν υψηλή ανάλυση, ιδιαίτερα χρήσιμη για την εκτίμηση παραμέτρων στόχου. Οι chirp κυματομορφές χρησιμοποιούνται ευρέως για την ανίχνευση στόχων, λόγω της δυνατότητάς τους να προσφέρουν υψηλή ανάλυση εύρους και ακρίβεια.

Οι chirp κυματομορφές προσφέρουν πολλαπλά οφέλη στα DFRC συστήματα:

1. **Υψηλή Ανθεκτικότητα σε Παρεμβολές:**

- Οι chirp κυματομορφές έχουν μεγάλη ανοχή σε θόρυβο και παρεμβολές λόγω του εύρους συχνοτήτων τους και της ιδιότητας διασποράς ενέργειας (spread energy).

2. **Ταυτόχρονη Υποστήριξη Ανίχνευσης και Επικοινωνίας:**

- Είναι ιδανικές για ταυτόχρονη ανίχνευση στόχων (μέσω της επιστροφής του ηχώ κύματος) και μετάδοση δεδομένων.
- Αυτό εξοικονομεί φάσμα και υλικό, καθώς και οι δύο λειτουργίες επιτελούνται από την ίδια κυματομορφή.

3. **Υψηλή Απόδοση:**

- Παρέχουν υψηλή ακρίβεια στην εκτίμηση παραμέτρων στόχου, όπως απόσταση και ταχύτητα.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση δεδομένων με χαμηλό ρυθμό, επαρκή για εφαρμογές που απαιτούν επικοινωνία.

- **Ψευδοτυχαίοι κώδικες (Pseudo-Random Codes)**

Οι ψευδοτυχαίοι κώδικες (Pseudo-Random Codes) αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο στα συστήματα Dual-Functional Radar and Communication (DFRC). Η δυνατότητα τους να χρησιμοποιούνται τόσο για ανίχνευση όσο και για επικοινωνία ταυτόχρονα, τους καθιστά εξαιρετικά χρήσιμους για την ενσωμάτωση αυτών των δύο λειτουργιών. Οι ψευδοτυχαίοι κώδικες δημιουργούνται από αλγόριθμους που παράγουν αλληλουχίες bit με ιδιότητες τυχαίας κατανομής. Χρησιμοποιούνται τόσο για την ανίχνευση όσο και για την επικοινωνία στα συστήματα DFRC.

1. **Ανίχνευση:** Οι κώδικες χρησιμοποιούνται για να στείλουν σήματα και να λαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με στόχους, αντικείμενα ή περιοχές ενδιαφέροντος.

2. **Επικοινωνία:** Αποδοτική χρήση των παραγόμενων σημάτων για την μεταφορά δεδομένων και την επικοινωνία με άλλες συσκευές ή σταθμούς βάσης.

Πλεονεκτήματα:

- **Αποτελεσματική ενσωμάτωση:** Δυνατότητα συνδυασμού ανίχνευσης και επικοινωνίας σε ένα σύστημα, μειώνοντας την ανάγκη για επιπρόσθετο εξοπλισμό.
- **Αντοχή σε Παρεμβολές:** Οι ψευδοτυχαίοι κώδικες είναι ανθεκτικοί σε εσκεμμένες ή μη παρεμβολές, καθιστώντας τους αξιόπιστους.
- **Πολυχρηστικότητα:** Χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, από στρατιωτικά ραντάρ μέχρι ασύρματες επικοινωνίες και GPS.

Εν ολίγοις, οι ψευδοτυχαίοι κώδικες είναι ένα ισχυρό εργαλείο στα συστήματα DFRC, επιτρέποντας την ταυτόχρονη ανίχνευση και επικοινωνία με αξιοπιστία και αποδοτικότητα.

3.2.3 Επικοινωνία και Ανίχνευση σε Περιβάλλοντα με Πολλαπλούς Στόχους

Ένας σταθμός βάσης αλληλεπιδρά με πολλούς στόχους σε ένα περιβάλλον επικοινωνίας και ανίχνευσης.

1. **Συλλογή διασκορπισμένων αντικειμένων :** Υπάρχουν Κ διασκορπισμένα αντικείμενα (στόχοι) που είναι τυχαία κατανεμημένα στο περιβάλλον. Αυτοί οι στόχοι μπορεί να είναι φυσικά αντικείμενα που είτε ανακλούν τα κύματα ραντάρ πίσω στον σταθμό βάσης είτε συμμετέχουν σε διαδρομές διάχυσης επικοινωνίας. Μερικά από αυτά τα αντικείμενα δεν είναι μόνο εμπόδια, αλλά συμβάλλουν στη διάδοση του σήματος επικοινωνίας. Αυτό σημαίνει ότι τα σήματα που εκπέμπει ο σταθμός βάσης μπορεί να ανακλαστούν από αυτά τα αντικείμενα πριν φτάσουν στον χρήστη.
2. **Όλοι οι στόχοι δεν είναι διαδρομές επικοινωνίας:** Παρόλο που όλοι οι στόχοι μπορεί να ανιχνεύονται από το ραντάρ, μόνο μερικοί από αυτούς είναι χρήσιμοι για την επικοινωνία, δηλαδή συμβάλλουν στη διάδοση του σήματος επικοινωνίας από τον σταθμό βάσης στον χρήστη. Οι υπόλοιποι στόχοι δεν συμβάλλουν όσον αφορά την επικοινωνία.
3. **Μοντέλο διάχυσης για επικοινωνία mmWave:** Το μοντέλο διάχυσης αναφέρεται στον τρόπο που το σήμα mmWave διαδίδεται στο περιβάλλον. Λόγω της φύσης αυτών των κυμάτων, δεν υπάρχουν πολλές διαδρομές διάδοσης του σήματος. Το σήμα μπορεί να φτάσει στον χρήστη κυρίως μέσω:
 - **Απευθείας γραμμής όρασης (Line of Sight - LOS):** Όταν υπάρχει μια "καθαρή" ευθεία διαδρομή από τον σταθμό βάσης προς τον χρήστη.
 - **Λίγες αντανakλάσεις (Non-Line of Sight - NLOS):** Όταν το σήμα ανακλάται από αντικείμενα για να φτάσει στον χρήστη.

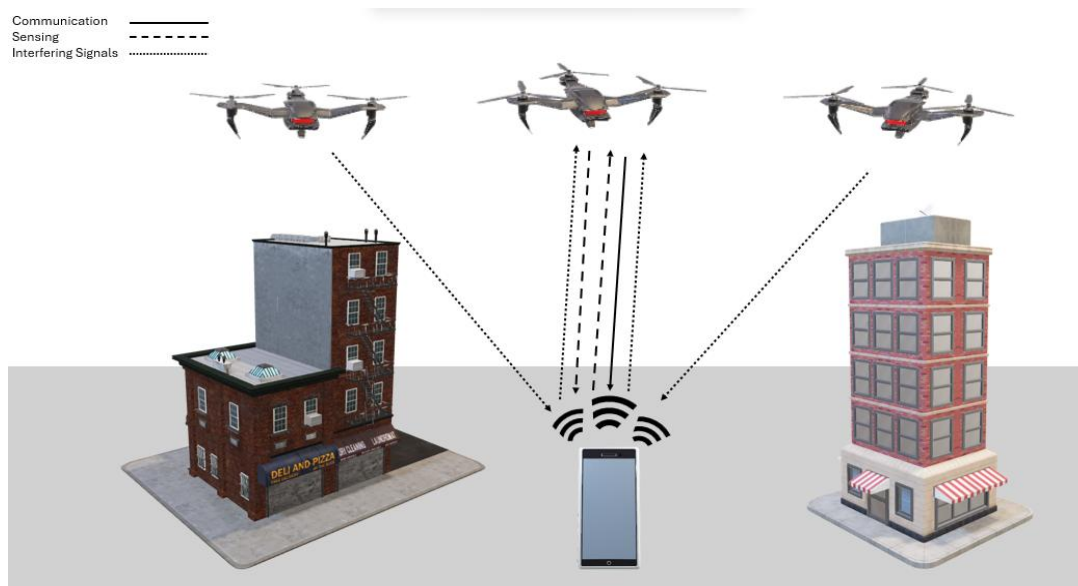
4. **Αναγνωρίσιμοι στόχοι:** Το σύστημα υποθέτει ότι μόνο οι L στόχοι από τους K είναι αναγνωρίσιμοι, δηλαδή μπορούν να διακριθούν από το σύστημα και να συμβάλλουν στις διαδρομές διάχυσης επικοινωνίας. Παρόλα αυτά, κάποια ανακλώμενα αντικείμενα που δεν συμμετέχουν άμεσα στην επικοινωνία μπορεί να επηρεάζουν τη διαδικασία ανίχνευσης ραντάρ (αυτά αναφέρονται ως θόρυβος).
5. **Θόρυβος και σημαντικοί ανακλώμενοι στόχοι:** Μερικός θόρυβος μπορεί να προέρχεται από ανακλώμενους στόχους, οι οποίοι είναι σημαντικοί για την ανίχνευση ραντάρ αλλά δεν συμμετέχουν ενεργά στην επικοινωνία. Παρόλο που δεν συμμετέχουν στην επικοινωνία, αυτοί οι στόχοι ίσως χρειαστεί να ληφθούν υπόψη κατά τη διαδικασία beamforming, που είναι η διαδικασία εστίασης του σήματος ραντάρ προς αυτούς για να βελτιωθεί η ανίχνευση.
6. **Στόχοι που δεν παρουσιάζουν ενδιαφέρον:** Μπορεί να υπάρχουν στόχοι στο περιβάλλον που δεν είναι σημαντικοί για την επικοινωνία ή την ανίχνευση ραντάρ. Για λόγους απλότητας, αυτοί οι στόχοι δεν λαμβάνονται υπόψη και τα αποτελέσματά τους θεωρούνται ως μέρος του θορύβου στο μοντέλο [11], [12], [14].

4

Joint Communication and Sensing και Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη

Η ενσωμάτωση των τεχνολογιών Joint Communication and Sensing (JCaS) με Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (UAVs) αποτελεί μια καινοτόμο προσέγγιση για την ταυτόχρονη βελτίωση της απόδοσης στην ανίχνευση και την επικοινωνία. Με την αυξανόμενη ζήτηση για προηγμένες εφαρμογές σε δίκτυα 6G, όπως τα έξυπνα δίκτυα, τα αυτόνομα συστήματα και οι αποστολές διάσωσης, η χρήση UAVs σε συνδυασμό με τεχνολογίες JCaS αναμένεται να διαδραματίσει έναν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του μέλλοντος της συνδεσιμότητας και της επιτήρησης.

Η παράλληλη ανάπτυξη των τεχνολογιών επικοινωνίας και ανίχνευσης έχει ανοίξει νέους ορίζοντες στην επιστήμη και την τεχνολογία, ειδικά όταν εφαρμόζεται στα UAVs. Οι τεχνολογίες JCaS προσφέρουν μια επαναστατική προσέγγιση, επιτυγχάνοντας την ταυτόχρονη ανίχνευση και μετάδοση δεδομένων, μειώνοντας το κόστος και αυξάνοντας την αποδοτικότητα. Τα UAVs, χάρη στην ευελιξία τους και την ικανότητά τους να επιχειρούν σε ποικίλα περιβάλλοντα, έχουν αναδειχθεί σε πρωταγωνιστές της νέας εποχής της τεχνολογικής προόδου. Από τη διαχείριση κρίσεων μέχρι την ανάπτυξη έξυπνων πόλεων, η ενσωμάτωση των JCaS στα UAVs υπόσχεται να φέρει μια επανάσταση σε πολλούς τομείς, ανοίγοντας νέες προοπτικές για την ασφαλή και αποδοτική επικοινωνία και ανίχνευση [16], [17].



Εικόνα 13 JCaS και Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (UAVs)

4.1 Πλεονεκτήματα του JCaS με UAVs

4.1.1 Βελτίωση Κάλυψης και Ποιότητας Υπηρεσιών

Τα Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (UAVs) διαθέτουν μοναδικές δυνατότητες που τους επιτρέπουν να καλύπτουν μεγάλες και απομακρυσμένες περιοχές, ειδικά σε καταστάσεις όπου οι παραδοσιακές υποδομές επικοινωνίας δεν είναι διαθέσιμες ή είναι ανεπαρκείς. Η ευελιξία τους να λειτουργούν σε τρισδιάστατο χώρο, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα τους να μετακινούνται πάνω και γύρω από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια, όπως κτήρια ή δασικές περιοχές, τους καθιστά ιδανικά για την κάλυψη περιοχών που είναι δύσκολο να φτάσουν οι παραδοσιακοί σταθμοί βάσης. Αυτή η κινητικότητα και η ικανότητα να ξεπερνούν φυσικά εμπόδια είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, όπως φυσικές καταστροφές ή περιοχές που πλήττονται από έκτακτες συνθήκες, όπου η παραδοσιακή υποδομή επικοινωνίας έχει καταστραφεί ή είναι αδύνατο να λειτουργήσει. Σε τέτοιες περιπτώσεις, τα UAVs μπορούν να εγκαθιδρύσουν άμεσα προσωρινές επικοινωνιακές υποδομές, διασφαλίζοντας την αδιάλειπτη ροή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο, η οποία είναι κρίσιμη για την αποτελεσματική διαχείριση της κρίσης και τη συντονισμένη δράση των επιχειρήσεων διάσωσης.

Η δυνατότητα να λειτουργούν μέσω συνδέσμων LoS (Line-of-Sight) ενισχύει σημαντικά την αξιοπιστία των επικοινωνιών. Η σύνδεση LoS επιτρέπει στα UAVs να επικοινωνούν χωρίς εμπόδια, μειώνοντας τις απώλειες σήματος και τις παρεμβολές που προκαλούνται από άλλες συσκευές ή φυσικά εμπόδια. Αυτό οδηγεί σε σταθερές, υψηλής ποιότητας συνδέσεις και βελτιωμένη ικανότητα μετάδοσης δεδομένων, γεγονός που είναι κρίσιμο για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αξιοπιστία, όπως η παρακολούθηση, η επιτήρηση και η επικοινωνία σε απομακρυσμένες περιοχές. Η προσαρμογή των UAVs σε δυναμικά και μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα αποτελεί επίσης ένα σημαντικό πλεονέκτημα. Σε καταστάσεις καταστροφής, όπου οι παραδοσιακοί σταθμοί βάσης μπορεί να έχουν καταστραφεί ή να είναι αδύνατο να προσπελαστούν, τα UAVs μπορούν να παρέχουν ευέλικτη και άμεση κάλυψη.

Για παράδειγμα, σε περιοχές που πλήττονται από σεισμούς ή πλημμύρες, τα UAVs μπορούν να αναλάβουν την αποστολή της αναμετάδοσης σημάτων και της συγκέντρωσης δεδομένων από τον τόπο της καταστροφής, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζουν την επικοινωνία μεταξύ των ομάδων διάσωσης και των κέντρων συντονισμού. Επιπλέον, η χρήση UAVs σε τέτοιες καταστάσεις επιτρέπει τη συνεχιζόμενη ανανέωση και βελτίωση της ποιότητας της υπηρεσίας, προσαρμόζοντας τις διαδρομές πτήσης και τη θέση τους σύμφωνα με τις ανάγκες επικοινωνίας και ανίχνευσης. Αυτό καθιστά τη χρήση UAVs πολύτιμη για την εξασφάλιση συνεχούς κάλυψης και αξιόπιστης επικοινωνίας σε περιβάλλοντα όπου άλλες επικοινωνιακές υποδομές είναι περιορισμένες ή ανύπαρκτες.

4.1.2 Συνεργασία Πολλαπλών UAVs

Η συνεργασία πολλαπλών UAVs είναι κρίσιμη για τη μεγιστοποίηση των δυνατοτήτων ανίχνευσης και επικοινωνίας. Όταν τα UAVs λειτουργούν ως ένα ενοποιημένο δίκτυο, μπορούν να διαμοιράζονται δεδομένα και να συντονίζουν τις ενέργειές τους, εξασφαλίζοντας τη βέλτιστη κάλυψη και ακριβή ανίχνευση. Η ενσωμάτωση αυτής της συντονισμένης δράσης επιτρέπει την επίτευξη υψηλότερων επιδόσεων σε σύγκριση με τη χρήση ενός μόνο UAV.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα είναι η δυνατότητα εναλλακτικής κάλυψης περιοχών με τη χρήση δυναμικών τροχιών. Όταν τα UAVs συνεργάζονται, μπορούν να αλλάζουν πορεία ανάλογα με τις ανάγκες της αποστολής, προσφέροντας συνεχιζόμενη και πλήρη κάλυψη χωρίς κενά. Αυτή η δυναμική προσαρμογή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε καταστάσεις καταστροφής ή σε επιχειρήσεις με έντονη κινητικότητα, όπου απαιτείται η άμεση κάλυψη εκτεταμένων περιοχών. Ακόμα, η συλλογική επεξεργασία δεδομένων επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της ανάλυσης, διευκολύνοντας τη μείωση των αναγκών για επαναλαμβανόμενη ανίχνευση και αυξάνοντας την ακριβή εκτίμηση των δεδομένων. Όταν τα UAVs ανταλλάσσουν δεδομένα, ο συνδυασμός των πληροφοριών που συλλέγονται από διαφορετικά σημεία και χρονικά διαστήματα ενισχύει τη συνολική αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Αυτή η συνεργασία μειώνει επίσης την ανάγκη για επανεκτίμηση δεδομένων, καθώς τα UAVs μπορούν να εστιάζουν σε διαφορετικά τμήματα της περιοχής χωρίς να επαναλαμβάνουν τις ίδιες διαδικασίες.

Η συλλογική προσέγγιση επιτρέπει, επιπλέον, την αύξηση της ακρίβειας στην ανίχνευση και την ταυτοποίηση στόχων. Εξετάζοντας δεδομένα από πολλές πηγές, η πληροφορία μπορεί να επεξεργαστεί πιο αξιόπιστα και με μεγαλύτερη ακρίβεια, γεγονός που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για κρίσιμες εφαρμογές όπως η επιτήρηση υποδομών ή η στρατηγική ανάλυση. Το αποτέλεσμα είναι μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα της περιοχής ενδιαφέροντος, χωρίς να παραλείπονται σημαντικά στοιχεία. Η συντονισμένη δράση μεταξύ των UAVs οδηγεί σε ευέλικτα δίκτυα ανίχνευσης και επικοινωνίας, τα οποία μπορούν να προσαρμοστούν στις συνεχώς μεταβαλλόμενες ανάγκες της αποστολής. Αυτά τα δικτυωμένα συστήματα προσφέρουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα και αξιοπιστία, διασφαλίζοντας ότι η επικοινωνία παραμένει αδιάλειπτη ακόμη και σε περιοχές με περιορισμένη υποδομή ή έντονα περιβαλλοντικά εμπόδια.

Αυτό το σύστημα συνεργασίας δίνει τη δυνατότητα στους UAVs να λειτουργούν συντονισμένα, επιτυγχάνοντας υψηλή απόδοση σε ποικίλες εφαρμογές, όπως η επιτήρηση, η έρευνα και διάσωση, και οι στρατιωτικές αποστολές. Με τον συνδυασμό των δυνατοτήτων τους, τα UAVs δημιουργούν ένα πιο ισχυρό και αποτελεσματικό δίκτυο για την ανίχνευση, την παρακολούθηση και την επικοινωνία σε περιβάλλοντα με αυξημένες απαιτήσεις.

4.1.3 Μειωμένο Κόστος Υποδομής

Η χρήση UAVs προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στην εξοικονόμηση πόρων και στη μείωση του κόστους υποδομής, καθώς μειώνεται η ανάγκη για την κατασκευή και συντήρηση παραδοσιακών, μόνιμων επίγειων υποδομών, οι οποίες είναι συχνά δαπανηρές και απαιτούν συνεχείς επισκευές και αναβαθμίσεις. Τα UAVs μπορούν να αναπτυχθούν και να απομακρυνθούν άμεσα, προσφέροντας ευελιξία και δυναμική απόκριση σε μεταβαλλόμενες συνθήκες και ανάγκες. Ειδικά σε περιοχές με περιορισμένη πρόσβαση ή σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, τα UAVs μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες επικοινωνίας και ανίχνευσης χωρίς την ανάγκη για σταθερές υποδομές.

Η ενσωμάτωση τεχνολογιών Joint Communication and Sensing (JCaS) στα UAVs αναδεικνύει τις δυνατότητες αυτής της προσέγγισης, καθώς επιτρέπει τη συνδυασμένη αξιοποίηση των ίδιων φυσικών πόρων, όπως είναι το hardware και το ραδιοφάσμα, για την ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων και ανίχνευση. Αυτή η συνέργεια οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς τα UAVs δεν απαιτούν επιπλέον εξοπλισμό για τις δύο διαφορετικές λειτουργίες. Η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών μειώνει τις απαιτήσεις για εξωτερικές πηγές ενέργειας και υποδομές, βελτιώνοντας τη συνολική ενεργειακή απόδοση. Αναφορικά με το λειτουργικό κόστος, η εξάλειψη της ανάγκης για παραδοσιακές σταθερές υποδομές, όπως κεραίες, σταθμοί βάσης και ενισχυτές, μειώνει τις επενδύσεις και τα έξοδα συντήρησης. Τα UAVs με JCaS επιτρέπουν την πιο αποδοτική διαχείριση των πόρων, καθώς μπορούν να λειτουργούν σε περιβάλλοντα με περιορισμένο κόστος υποδομής, ενώ οι δυνατότητες διαχείρισης της ενέργειας μέσω της κατανομής φορτίου ή της έξυπνης πλοήγησης μειώνουν τις απαιτήσεις για επιπλέον υποστήριξη.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την οικονομική αποδοτικότητα των συστημάτων UAV-JCaS, ειδικά σε αποστολές μεγάλης κλίμακας ή σε περιβάλλοντα όπου η ταχύτητα ανάπτυξης και απομάκρυνσης των συστημάτων είναι κρίσιμη. Τα UAVs μπορούν να αναλάβουν ευέλικτα καθήκοντα σε διάφορους τομείς, όπως η παρακολούθηση κρίσιμων υποδομών ή η ανίχνευση καταστροφών, χωρίς να απαιτούν εξειδικευμένη και ακριβή υποδομή στο έδαφος, μειώνοντας έτσι το συνολικό κόστος των επιχειρησιακών δραστηριοτήτων. Συνολικά, η χρήση UAVs με τεχνολογίες JCaS όχι μόνο μειώνει το κόστος υποδομής, αλλά και βελτιώνει την οικονομική βιωσιμότητα και αποδοτικότητα των συστημάτων επικοινωνίας και ανίχνευσης σε διάφορες εφαρμογές, καθιστώντας τα ελκυστικά για επιχειρήσεις και οργανισμούς που επιθυμούν να μειώσουν το λειτουργικό τους κόστος χωρίς να θυσιάσουν την ποιότητα των υπηρεσιών.

4.2 Τεχνικές Προκλήσεις

4.2.1 Σχεδιασμός Πορείας και Κατανομή Πόρων

Ο βέλτιστος σχεδιασμός πορείας για τα UAVs είναι κρίσιμης σημασίας όταν πρόκειται για την εξυπηρέτηση των ταυτόχρονων απαιτήσεων επικοινωνίας και ανίχνευσης. Τα UAVs δεν αναλαμβάνουν μόνο την αποστολή μετάδοσης δεδομένων, αλλά και την ενεργή ανίχνευση

περιβαλλοντικών στοιχείων, όπως στόχοι ή καταστάσεις, σε πραγματικό χρόνο. Αυτό απαιτεί έναν συνδυασμό πλοήγησης, επικοινωνίας και ανίχνευσης που να υποστηρίζει την αποδοτικότητα και την ασφάλεια των αποστολών.

Η πλοήγηση και η κατανομή πόρων πρέπει να προγραμματίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε τα UAVs να λειτουργούν με βέλτιστο τρόπο, ενώ ταυτόχρονα διατηρούν τις υψηλές επιδόσεις σε κάθε λειτουργία. Καθώς τα UAVs καλούνται να εκτελέσουν σύνθετες λειτουργίες, πρέπει να εξασφαλιστεί ότι κάθε πτήση και πορεία είναι σχεδιασμένη για να αποφεύγει περιοχές με υψηλή συμφόρηση, που ενδέχεται να δημιουργήσουν κινδύνους για την αποστολή ή να προκαλέσουν καθυστερήσεις. Οι περιοχές αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν αστικά κέντρα, περιοχές με πυκνή κυκλοφορία ή περιοχές με περιορισμένο πεδίο ορατότητας, όπως ορεινές ή δασικές περιοχές. Η αποφυγή τέτοιων περιοχών είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της ασφάλειας και την αποδοτικότητα της αποστολής.

Μια σημαντική πρόκληση είναι η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, ενώ παράλληλα διατηρούνται οι απαιτούμενες επιδόσεις. Τα UAVs πρέπει να διαχειρίζονται τις διαθέσιμες πηγές ενέργειας με τρόπο ώστε να μπορούν να εκτελούν αποστολές μεγάλου χρόνου και απόστασης χωρίς να αναγκαστούν να προσγειωθούν για φόρτιση ή ανεφοδιασμό. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της έξυπνης πλοήγησης, η οποία συνδυάζει τη βέλτιστη διαδρομή με τη συνεχιζόμενη παρακολούθηση των αναγκών ενέργειας και τη δυναμική προσαρμογή του UAV στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του περιβάλλοντος. Η ακριβής διαχείριση ενέργειας είναι καθοριστική για την αποτελεσματικότητα των UAVs, καθώς εξασφαλίζει ότι οι αποστολές επικοινωνίας και ανίχνευσης μπορούν να ολοκληρωθούν χωρίς εξωτερική υποστήριξη.

Ένα ακόμη κρίσιμο στοιχείο στην πλοήγηση των UAVs είναι η εξασφάλιση της αδιάλειπτης σύνδεσης με επίγειους σταθμούς βάσης και άλλους κόμβους επικοινωνίας. Αυτό απαιτεί τη σχεδίαση και εφαρμογή συστημάτων συντονισμένων δικτύων επικοινωνίας, τα οποία πρέπει να λειτουργούν με τρόπο που να διασφαλίζουν την αδιάκοπη και αξιόπιστη σύνδεση σε πραγματικό χρόνο, ακόμη και όταν τα UAVs κινούνται σε περιοχές με περιορισμένη συνδεσιμότητα ή σε δυναμικά περιβάλλοντα. Η σύνδεση πρέπει να παραμένει αξιόπιστη, ανεξαρτήτως των συνθηκών περιβάλλοντος ή της αλλαγής της γεωμετρίας της πτήσης του UAV, ώστε να διασφαλίζεται η μετάδοση δεδομένων και η διαχείριση ανίχνευσης.

Ο συνδυασμός αυτών των παραμέτρων απαιτεί τη χρήση προηγμένων αλγορίθμων πλοήγησης και κατανομής πόρων που είναι ικανοί να προσαρμόζουν τις διαδρομές και τις στρατηγικές επικοινωνίας σε πραγματικό χρόνο, με βάση τις τρέχουσες ανάγκες και τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Αυτό απαιτεί ισχυρή υπολογιστική ισχύ και καινοτόμους προσεγγίσεις στον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης, προκειμένου τα UAVs να προσαρμόζονται δυναμικά στις αλλαγές που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της αποστολής τους.

4.2.2 Παρεμβολές και Ασφάλεια

Οι σύνδεσμοι Line-of-Sight (LoS) προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα στην επικοινωνία και την ανίχνευση, ειδικά όταν τα UAVs απαιτούν καθαρή και αξιόπιστη σύνδεση για την μετάδοση δεδομένων ή την ανίχνευση στόχων σε πραγματικό χρόνο. Ωστόσο, αυτή η τεχνολογία δεν είναι χωρίς προκλήσεις, καθώς τα συστήματα LoS εκθέτουν τα UAVs σε αυξημένους κινδύνους, κυρίως σε ότι αφορά την ασφάλεια των επικοινωνιών και την ανθεκτικότητα των συστημάτων ανίχνευσης.

Οι συνδέσεις LoS χρησιμοποιούν συχνά το ίδιο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων για την επικοινωνία και την ανίχνευση, γεγονός που τα καθιστά ευάλωτα σε παρεμβολές και υποκλοπές από άλλους χρήστες του ίδιου φάσματος. Αυτές οι παρεμβολές μπορούν να οδηγήσουν σε διακοπές ή αλλοίωση των δεδομένων που μεταδίδονται, καθιστώντας τις επικοινωνίες ευάλωτες σε εξωτερικές επιθέσεις ή ακούσιες διαταραχές. Η παρεμβολή αυτή μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες για την ασφάλεια των UAVs και των αποστολών τους, ειδικά όταν πρόκειται για αποστολές που απαιτούν ακρίβεια και ακεραιότητα των δεδομένων, όπως η παρακολούθηση κρίσιμων υποδομών ή αποστολές διάσωσης. Επιπλέον, τα UAVs μπορεί να είναι ευάλωτα σε επιθέσεις jammer ή σε απρόβλεπτες παρεμβολές που προκαλούνται από ανταγωνιστικά ή εξωτερικά συστήματα, τα οποία μπορεί να έχουν ως στόχο την αποδιοργάνωση ή την παράκαμψη των συστημάτων επικοινωνίας ή ανίχνευσης. Αυτό καθιστά την εξασφάλιση της προστασίας των δεδομένων και των συστημάτων πιο δύσκολη, ενώ απαιτεί την ανάπτυξη καινοτόμων τεχνικών για την ενίσχυση της ασφάλειας.

Μια από τις κύριες στρατηγικές για την αντιμετώπιση αυτών των κινδύνων είναι η χρήση τεχνητού θορύβου ή άλλων παραπλανητικών σημάτων. Αυτές οι τεχνικές δημιουργούν παρεμβολές οι οποίες μπορούν να εμποδίσουν την αναγνώριση ή την αποκωδικοποίηση των δεδομένων από μη εξουσιοδοτημένα συστήματα. Ο τεχνητός θόρυβος μπορεί να λειτουργήσει ως "ασπίδα" για τα δεδομένα που αποστέλλονται από το UAV, κρύβοντας την πραγματική πληροφορία από εχθρικές μονάδες που προσπαθούν να παρακολουθήσουν ή να υποκλέψουν τις επικοινωνίες. Η χρήση αυτών των τεχνολογιών προστασίας επιτρέπει την ασφαλή και αδιάκοπη λειτουργία των UAVs, ακόμα και σε εχθρικά περιβάλλοντα ή περιοχές υψηλού κινδύνου.

Πέρα από τον τεχνητό θόρυβο, άλλες στρατηγικές ασφάλειας περιλαμβάνουν την κρυπτογράφηση των επικοινωνιών για την αποφυγή υποκλοπών και τη διασφάλιση της ακεραιότητας των δεδομένων, καθώς και την αναγνώριση και αποφυγή επιθέσεων DoS (Denial of Service) που μπορούν να διαταράξουν τις λειτουργίες των UAVs. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα της ασφάλειας είναι απαραίτητη για να εξασφαλιστεί ότι τα UAVs μπορούν να λειτουργούν σε περιβάλλοντα με υψηλή απειλή, προστατεύοντας την επικοινωνία και την ανίχνευση από επιθέσεις και παρεμβολές που θα μπορούσαν να υπονομεύσουν την αποστολή ή τη διαδικασία συλλογής δεδομένων.

4.2.3 Πολυπλοκότητα Υπολογισμών

Η συνδυασμένη εκτέλεση των λειτουργιών επικοινωνίας και ανίχνευσης από τα UAVs αποτελεί μια ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία που απαιτεί προηγμένα υπολογιστικά συστήματα και στρατηγικές. Η αναγκαιότητα για την ταυτόχρονη διαχείριση και ανάλυση δεδομένων από αισθητήρες, ενώ παράλληλα διασφαλίζεται η επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο, εντείνει την πολυπλοκότητα των υπολογιστικών απαιτήσεων.

Η πρώτη πρόκληση αφορά τη διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων. Τα UAVs χρησιμοποιούν ποικίλους αισθητήρες για ανίχνευση στόχων, παρακολούθηση περιοχών ή ανάλυση περιβαλλοντικών συνθηκών. Η ανάλυση αυτών των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο απαιτεί την ανάπτυξη υπολογιστικά αποδοτικών αλγορίθμων, οι οποίοι να είναι σε θέση να επεξεργάζονται τα δεδομένα άμεσα χωρίς καθυστερήσεις, εξασφαλίζοντας έτσι την ακριβή και έγκαιρη λήψη αποφάσεων. Οι αλγόριθμοι αυτοί πρέπει να μπορούν να επεξεργάζονται πολύπλοκες πληροφορίες, όπως εικόνες από κάμερες, δεδομένα από ραντάρ, καθώς και άλλες πληροφορίες αισθητήρων, χωρίς να επιβαρύνουν υπερβολικά τους υπολογιστικούς πόρους του UAV. Η υπολογιστική αποδοτικότητα είναι κρίσιμη, καθώς τα UAVs έχουν περιορισμένους πόρους, και οποιαδήποτε υπερφόρτωση των συστημάτων τους μπορεί να επηρεάσει την αποτελεσματικότητα της αποστολής.

Η ανάγκη για ευέλικτα συστήματα επεξεργασίας δεδομένων επεκτείνεται και στην κατανομή πόρων. Δεδομένου ότι τα UAVs μπορεί να λειτουργούν σε δυναμικά περιβάλλοντα με περιορισμένα υπολογιστικά αποθέματα, απαιτείται η ανάπτυξη ευέλικτων δικτύων που να επιτρέπουν την ευκολία κατανομής πόρων (όπως επεξεργαστική ισχύ, μνήμη, ενεργειακή κατανάλωση) με τρόπο που να εξασφαλίζει την υψηλή απόδοση και ανθεκτικότητα των συστημάτων. Για παράδειγμα, σε καταστάσεις όπου το UAV αντιμετωπίζει περιοχές υψηλού κινδύνου ή παρεμβολών, θα πρέπει να προσαρμόζει δυναμικά τους αλγορίθμους του, καταναλώνοντας λιγότερη ενέργεια ή ανακατευθύνοντας δεδομένα μέσω άλλων διαδρομών χωρίς να μειώνει την ποιότητα της ανίχνευσης ή της επικοινωνίας.

Η ανθεκτικότητα του δικτύου είναι εξίσου σημαντική. Τα UAVs λειτουργούν συχνά σε δυσμενείς και απρόβλεπτες συνθήκες, όπως κατά τη διάρκεια καταστροφών ή σε περιοχές με υψηλό επίπεδο παρασίτων, όπου οι επικοινωνίες και οι συνδέσεις μπορούν να υποστούν διαταραχές. Τα συστήματα επεξεργασίας δεδομένων και επικοινωνιών πρέπει να είναι ανθεκτικά σε αποτυχίες και ικανά να λειτουργούν σε περιβάλλοντα με αστάθειες ή περιορισμένες συνδέσεις. Η δημιουργία δικτύων υψηλής ανθεκτικότητας προϋποθέτει την εφαρμογή τεχνικών όπως η κατανομή φόρτου (load balancing) ή η ανακατεύθυνση δεδομένων μέσω εναλλακτικών διαδρομών, ώστε το σύστημα να παραμείνει λειτουργικό

ακόμα και όταν κάποιοι από τους κόμβους του δικτύου υποστούν βλάβη ή αντιμετωπίσουν άλλες τεχνικές δυσκολίες.

Επιπλέον, η επικοινωνία μεταξύ πολλών UAVs σε ένα δικτυωμένο σύστημα προσθέτει άλλη μια διάσταση πολυπλοκότητας, καθώς απαιτεί την εφαρμογή πρωτοκόλλων διαχείρισης δικτύου που να διασφαλίζουν τη συντονισμένη λειτουργία όλων των UAVs και την αποδοτική ανταλλαγή δεδομένων. Αυτά τα πρωτόκολλα πρέπει να διασφαλίζουν την ταυτόχρονη μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων με μικρές καθυστερήσεις, ενώ ταυτόχρονα να αποφεύγεται η υπερφόρτωση του δικτύου και να ενισχύεται η ασφάλεια των επικοινωνιών.

Συνολικά, η ανάγκη για υπολογιστικά αποδοτικούς αλγορίθμους, ευέλικτα και ανθεκτικά δίκτυα και ικανότητα διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων σε πραγματικό χρόνο είναι κρίσιμη για την αποτελεσματική και αξιόπιστη λειτουργία των UAVs σε εφαρμογές JCaS, εξασφαλίζοντας την επιτυχία τους σε πολυδιάστατα και δυναμικά περιβάλλοντα [16], [17].

4.3 Εφαρμογές

4.3.1 Επιτήρηση και Ασφάλεια

Η τεχνολογία JCaS (Joint Communication and Sensing) ενσωματωμένη σε UAVs προσφέρει επαναστατικές δυνατότητες στην επιτήρηση και ασφάλεια, επιτρέποντας την παρακολούθηση μεγάλων περιοχών και κρίσιμων υποδομών με αυξημένη αποδοτικότητα και ακρίβεια. Τα UAVs, εξοπλισμένα με αισθητήρες ανίχνευσης και συστήματα επικοινωνίας, είναι σε θέση να παρέχουν συνεχή ροή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, συνδυάζοντας τη δυνατότητα ανίχνευσης με την αποστολή κρίσιμων πληροφοριών, επιτρέποντας γρήγορη αντίδραση και παρέμβαση.

Ένας από τους πιο σημαντικούς τομείς εφαρμογής είναι η παρακολούθηση ενεργειακών εγκαταστάσεων, όπως σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, πυρηνικές εγκαταστάσεις και άλλες κρίσιμες υποδομές που απαιτούν συνεχείς ελέγχους για την αποφυγή ατυχημάτων ή τρομοκρατικών επιθέσεων. Τα UAVs μπορούν να εκτελούν περιπολίες γύρω από αυτές τις εγκαταστάσεις, ανιχνεύοντας ασυνήθιστες δραστηριότητες ή κινδύνους, όπως η εμφάνιση πυρκαγιών, διαρροές ή άλλες απειλές. Η ενσωμάτωση τεχνολογιών JCaS επιτρέπει ταυτόχρονη ανίχνευση και αποστολή δεδομένων, παρέχοντας γρήγορη και ακριβή εικόνα της κατάστασης στις υπεύθυνες αρχές.

Αντίστοιχα, τα UAVs με JCaS χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση συνόρων και ευαίσθητων περιοχών, όπως στρατηγικές τοποθεσίες, χώρους που πλήττονται από φυσικές καταστροφές ή περιοχές που επηρεάζονται από κοινωνικές αναταραχές. Χρησιμοποιώντας προηγμένα αισθητήρια, τα UAVs μπορούν να εντοπίσουν μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση ή ύποπτες κινήσεις, παρέχοντας κρίσιμες πληροφορίες για την πρόληψη εγκλημάτων ή την έγκαιρη ανταπόκριση σε

καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Ειδικά για τα σύνορα, η ικανότητα παρακολούθησης από τον αέρα παρέχει μια ευρύτερη και πιο ακριβή εικόνα των κινήσεων, εντοπίζοντας κρυφές διαδρομές ή προσπάθειες παράνομης διέλευσης, κάτι που είναι δύσκολο να επιτευχθεί με επίγειες δυνάμεις.

Ένα άλλο κρίσιμο πλεονέκτημα της χρήσης UAVs με JCaS είναι η δυνατότητα ανίχνευσης και καταγραφής απειλών σε πραγματικό χρόνο. Όταν εντοπίζεται κάποια ύποπτη δραστηριότητα ή κίνδυνος, το σύστημα μπορεί να στείλει άμεσα ενημέρωση στους ελεγκτές ή τις αρμόδιες αρχές, εξασφαλίζοντας άμεση αντίδραση και ενεργοποίηση των απαραίτητων διαδικασιών ασφαλείας. Η επικοινωνία και η ανίχνευση συνδυάζονται έτσι σε μια αποτελεσματική και συντονισμένη προσπάθεια για την προστασία κρίσιμων υποδομών και την ασφάλεια των πολιτών.

Επιπλέον, η χρήση UAVs σε αντιτρομοκρατικές αποστολές ή για την προστασία από εγκληματικές δραστηριότητες προσφέρει νέα διάσταση στην καταπολέμηση της εγκληματικότητας. Με τα JCaS UAVs να παρακολουθούν κρυφές περιοχές ή περιοχές με υψηλό κίνδυνο, είναι δυνατό να εντοπιστούν και να παρακολουθηθούν υπόπτου και ύποπτες δραστηριότητες. Η δυνατότητα να διατηρούνται σε αεροδυναμική και ασφαλή απόσταση από περιοχές υψηλού κινδύνου, ενώ ταυτόχρονα παρακολουθούν την περιοχή με αισθητήρες και επικοινωνιακά συστήματα, αποτελεί κλειδί για την αποτελεσματικότητα των επιχειρήσεων ασφαλείας.

Η συνδυασμένη χρήση επικοινωνίας και ανίχνευσης παρέχει επίσης δυνατότητες για πρόληψη καταστροφών, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών, όπως σεισμοί ή πλημμύρες. Τα UAVs μπορούν να συντονιστούν για να παρακολουθούν καταστροφικές περιοχές, να εντοπίζουν επικίνδυνες αλλαγές στο έδαφος ή στην υποδομή και να μεταφέρουν άμεσα δεδομένα στους διασώστες για να βοηθήσουν στην εκτίμηση της κατάστασης και στη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο.

Η ενσωμάτωση των τεχνολογιών JCaS με UAVs ενισχύει την αποτελεσματικότητα των πολλών εφαρμογών επιτήρησης και ασφαλείας, παρέχοντας μια πλατφόρμα με εξαιρετικές δυνατότητες ανίχνευσης και επικοινωνίας που είναι κρίσιμες για τη διαχείριση της ασφαλείας και της προστασίας τόσο των υποδομών όσο και των ανθρώπινων ζωών.

4.3.2 Καταστροφές και Αντιμετώπιση Έκτακτων Αναγκών

Η χρήση UAVs σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης αποτελεί μια επαναστατική προσέγγιση για την έγκαιρη και αποτελεσματική διαχείριση καταστροφών, επιταχύνοντας τις διαδικασίες διάσωσης και μείωσης των κινδύνων. Ο συνδυασμός τεχνολογιών JCaS (Joint Communication and Sensing) επιτρέπει στα UAVs να παρέχουν κρίσιμες υπηρεσίες, όπως ταχεία χαρτογράφηση και ακριβή ανίχνευση, συμβάλλοντας στην καλύτερη κατανόηση της κατάστασης και στην αποτελεσματική αντίδραση των αρχών.

Κατά τη διάρκεια φυσικών καταστροφών, όπως σεισμούς, πλημμύρες ή πυρκαγιές, η χαρτογράφηση περιοχών καταστροφής μέσω UAVs αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές εφαρμογές.

Χρησιμοποιώντας αισθητήρες υψηλής ακρίβειας, όπως LIDAR (Light Detection and Ranging), κάμερες υπερύθρων ή συστήματα θερμικής απεικόνισης, τα UAVs μπορούν να εκτελούν ακριβείς αεροφωτογραφίες των πληγείσων περιοχών, ακόμα και σε περιοχές που είναι δύσκολα προσβάσιμες λόγω της καταστροφής. Αυτή η χαρτογράφηση επιτρέπει στις αρχές και στους διασώστες να αποκτούν άμεση εικόνα των ζημιών, να εντοπίζουν κατεστραμμένα κτίρια και υποδομές, καθώς και να παρακολουθούν τη διασπορά των καταστροφικών φαινομένων. Αυτή η διαδικασία είναι κρίσιμη για τη διαχείριση των πόρων και τον καλύτερο συντονισμό των ομάδων διάσωσης, αφού παρέχει πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για την κατάσταση.

Επιπλέον, τα UAVs εξοπλισμένα με τεχνολογία JCaS προσφέρουν σημαντική υποστήριξη στις επιχειρήσεις διάσωσης. Κατά τη διάρκεια μιας καταστροφής, η ταχεία και ακριβής ανίχνευση θυμάτων ή επικίνδυνων περιοχών είναι κρίσιμη για την αποφυγή περαιτέρω ζημιών και την προστασία των διασωστών. Τα UAVs μπορούν να εντοπίζουν θύματα που είναι παγιδευμένα κάτω από συντρίμια, χρησιμοποιώντας θερμικές ή ακουστικές εικόνες για να ανιχνεύσουν θερμοκρασιακές διαφορές ή ήχους από κλήσεις βοήθειας. Αυτό επιτρέπει στους διασώστες να εστιάσουν τις προσπάθειές τους σε περιοχές που απαιτούν άμεση παρέμβαση, μειώνοντας το χρόνο αντίδρασης και αυξάνοντας τις πιθανότητες διάσωσης.

Τα UAVs επίσης διευκολύνουν τον εντοπισμό επικίνδυνων περιοχών κατά τη διάρκεια καταστροφών, εντοπίζοντας πηγές κινδύνου όπως διαρροές αερίων, εκρήξεις ή υπολείμματα που μπορεί να προκαλέσουν περαιτέρω καταστροφές. Μέσω της επικοινωνίας και της ανίχνευσης, τα UAVs μπορούν να αποστείλουν άμεσα προειδοποιήσεις στους διασώστες και τις αρμόδιες αρχές, επιτρέποντας την ασφαλή προσέγγιση και τις ενδεδειγμένες ενέργειες.

Ένα άλλο κρίσιμο πλεονέκτημα της χρήσης UAVs είναι η δυνατότητά τους να παρέχουν επαναλαμβανόμενη επιτήρηση των περιοχών καταστροφής. Καθώς οι καταστάσεις έκτακτης ανάγκης είναι δυναμικές και οι συνθήκες συνεχώς μεταβάλλονται, τα UAVs μπορούν να πραγματοποιούν συνεχείς πτήσεις για την παρακολούθηση των εξελίξεων και της πορείας της καταστροφής. Αυτό επιτρέπει τη συνεχιζόμενη καταγραφή των αλλαγών σε περιοχές που ενδέχεται να υφίστανται μετασχηματισμούς λόγω φυσικών παραμέτρων (π.χ., μετά από σεισμό ή πλημμύρα), διασφαλίζοντας τη συνεχιζόμενη ενημέρωση των διασωστικών ομάδων.

Επιπλέον, η δυνατότητα των UAVs να παρέχουν άμεση επικοινωνία σε απομονωμένες περιοχές καθιστά τη χρήση τους απαραίτητη για την αποκατάσταση της επικοινωνίας κατά τη διάρκεια και μετά από καταστροφές. Σε περιοχές όπου η παραδοσιακή υποδομή επικοινωνίας έχει καταρρεύσει, τα UAVs μπορούν να λειτουργούν ως κινητοί σταθμοί βάσης, παρέχοντας ταυτόχρονα επικοινωνία μεταξύ των διασωστικών ομάδων και του κέντρου συντονισμού των επιχειρήσεων.

Τελικά, η ενσωμάτωση UAVs με τεχνολογίες JCaS στην αντιμετώπιση καταστροφών και έκτακτων αναγκών προσφέρει επαναστατικές δυνατότητες στην ανακούφιση και διάσωση. Ο συνδυασμός της άμεσης ανίχνευσης, της επικοινωνίας σε πραγματικό χρόνο και της ικανότητας για γρήγορη και ευέλικτη ανταπόκριση καθιστά τα UAVs αναπόσπαστο εργαλείο για την αποτελεσματική διαχείριση καταστάσεων κρίσης και την προστασία της ανθρώπινης ζωής.

4.3.3 Έξυπνες Πόλεις

Η ένταξη UAVs με τεχνολογία JCaS σε δίκτυα έξυπνων πόλεων ανοίγει νέες προοπτικές για τη βελτίωση της λειτουργικότητας και της βιωσιμότητας αυτών των σύγχρονων αστικών περιοχών. Η δυνατότητα των UAVs να συνδυάζουν επικοινωνία και ανίχνευση επιτρέπει την ανάπτυξη και την ενίσχυση κρίσιμων υπηρεσιών σε πραγματικό χρόνο, με στόχο την καλύτερη διαχείριση των πόρων και τη βελτιστοποίηση της ποιότητας ζωής των πολιτών.

Ένα από τα πιο σημαντικά οφέλη είναι η παρακολούθηση της κυκλοφορίας σε αστικά κέντρα, όπου οι μεταφορές και οι συνθήκες κίνησης επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα ζωής. Η χρήση UAVs επιτρέπει τη συνεχιζόμενη παρακολούθηση της ροής της κυκλοφορίας, ιδίως σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα πληθυσμού, προσφέροντας χρήσιμες πληροφορίες για τη διαχείριση κυκλοφορίας, τον εντοπισμό συμφόρησης και την καλύτερη ρύθμιση των φωτεινών σηματοδοτών. Οι UAVs μπορούν να εντοπίζουν και να παρακολουθούν διάφορα σημεία συμφόρησης σε πραγματικό χρόνο, ενώ τα δεδομένα αυτά μπορούν να διαβιβάζονται άμεσα στις αρχές για την προσαρμογή της κυκλοφορίας ή την ενημέρωση των πολιτών μέσω εφαρμογών για κινητά τηλέφωνα. Με την ικανότητά τους να ανιχνεύουν και να παρακολουθούν την κυκλοφορία σε ολόκληρη την πόλη, τα UAVs εξασφαλίζουν έναν πιο αποδοτικό και ασφαλή τρόπο μετακίνησης.

Η παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών σε πυκνοκατοικημένες περιοχές αποτελεί επίσης σημαντικό ζήτημα για τις έξυπνες πόλεις, και οι UAVs μπορούν να αναλάβουν σημαντικό ρόλο στην εξασφάλιση αυτών των υπηρεσιών. Στην περίπτωση περιοχών όπου η παραδοσιακή υποδομή δεν είναι επαρκής ή δεν υπάρχει δυνατότητα γρήγορης εγκατάστασης, τα UAVs μπορούν να λειτουργούν ως προσωρινοί ή κινητοί σταθμοί βάσης, προσφέροντας υψηλής ταχύτητας συνδέσεις μέσω δικτύων 5G ή 6G. Ειδικά σε πυκνές αστικές περιοχές όπου το έδαφος είναι δύσκολα προσβάσιμο και η δημιουργία νέων υποδομών επικοινωνίας είναι χρονοβόρα και δαπανηρή, τα UAVs παρέχουν την απαραίτητη ευρυζωνικότητα με ελάχιστες παρεμβολές.

Επιπλέον, η χρήση πολλαπλών UAVs ενισχύει τη διαχείριση αισθητήρων και τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Μέσω ενός συνεργατικού δικτύου UAVs, οι αισθητήρες σε κάθε UAV μπορούν να ανιχνεύουν ποικίλες παραμέτρους της πόλης, όπως ποιότητα αέρα, επίπεδα θορύβου, κίνηση, και περιβαλλοντικές συνθήκες, με μεγάλη ακρίβεια. Η συνεργασία αυτών των UAVs σε ένα ενιαίο δίκτυο επιτρέπει την αποτελεσματική κατανομή των πόρων για την ανάλυση και τη μετάδοση των δεδομένων με χαμηλές καθυστερήσεις και ελάχιστες παρεμβολές. Αυτή η τεχνολογία όχι μόνο ενισχύει την αποδοτικότητα των συστημάτων παρακολούθησης, αλλά διασφαλίζει και την ανθεκτικότητα του συστήματος, καθώς οι UAVs μπορούν να λειτουργούν εναλλακτικά ή να αναλαμβάνουν επιπλέον καθήκοντα όταν είναι απαραίτητο.

Η δυνατότητα αυτών των UAVs να παρακολουθούν συνεχώς και σε πραγματικό χρόνο τις συνθήκες της πόλης, να αναλύουν δεδομένα και να παρέχουν άμεση ανατροφοδότηση στις αρχές και στους πολίτες είναι καθοριστική για την ανάπτυξη έξυπνων συστημάτων μεταφορών και αυτόνομων υπηρεσιών πόλης, όπως η αποδοτική κατανομή πόρων (ενέργεια, ύδρευση, καθαριότητα) και η βελτιστοποίηση των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης. Επιπλέον, αυτή η πληροφορία

συμβάλλει στην προγνωστική συντήρηση των υποδομών της πόλης, όπως οι δρόμοι και τα κτίρια, εντοπίζοντας νωρίς φθορές ή ανάγκες συντήρησης, μειώνοντας το κόστος και τις καθυστερήσεις στις διαδικασίες αποκατάστασης.

Η εφαρμογή UAVs στις έξυπνες πόλεις μπορεί να επηρεάσει θετικά τη διαχείριση του περιβάλλοντος, την ασφάλεια, την κοινωνική ευημερία και την οικονομική ανάπτυξη, καθιστώντας τις πόλεις πιο βιώσιμες, έξυπνες και ανταγωνιστικές. Η αλληλεπίδραση της τεχνολογίας ανίχνευσης και επικοινωνίας μέσω UAVs με τα ήδη υπάρχοντα δίκτυα έξυπνων πόλεων παρέχει μία εξελιγμένη και ασφαλή πλατφόρμα για την αντιμετώπιση σύγχρονων προκλήσεων και την ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων στον αστικό χώρο.

4.3.4 Συνεργασία UAVs για Βελτιστοποίηση Κάλυψης

Η συνεργασία πολλαπλών UAVs ενσωματώνει την ικανότητα διαχείρισης αισθητήρων και συλλογής δεδομένων με ελάχιστες παρεμβολές και καθυστερήσεις, και προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στη βελτιστοποίηση της κάλυψης και της ποιότητας των υπηρεσιών σε μεγάλες περιοχές. Η συνδυασμένη λειτουργία πολλών UAVs καθιστά δυνατή την αποτελεσματική και αποδοτική παρακολούθηση εκτεταμένων περιοχών, ειδικά σε περιβάλλοντα όπου η χρήση παραδοσιακών υποδομών είναι περιορισμένη ή αδύνατη, όπως σε απομακρυσμένες περιοχές ή κατά τη διάρκεια καταστροφών.

Ο βασικός στόχος αυτής της συνεργασίας είναι η βελτιστοποίηση του χώρου κάλυψης μέσω της αλληλοενημέρωσης και συνεργασίας των UAVs. Όταν πολλά UAVs συνεργάζονται σε ένα δίκτυο, μπορούν να κατανεμηθούν στρατηγικά για να καλύψουν διαφορετικές περιοχές χωρίς να επαναλαμβάνουν την ανίχνευση του ίδιου στόχου. Η δυναμική προσαρμογή των τροχιών τους εξασφαλίζει ότι οι περιοχές που απαιτούν παρακολούθηση ή ανίχνευση είναι συνεχώς καλυμμένες, μειώνοντας τις περιοχές χωρίς κάλυψη ή τις περιοδικές καθυστερήσεις στην ανταλλαγή δεδομένων.

Μια τέτοια κατανομή των UAVs επιτρέπει την ευέλικτη διαχείριση των αισθητήρων, δεδομένου ότι κάθε UAV μπορεί να αναλάβει συγκεκριμένο ρόλο στην παρακολούθηση διαφορετικών τύπων δεδομένων ή περιοχών, και να μεταδίδει τις πληροφορίες που συλλέγει σε πραγματικό χρόνο. Για παράδειγμα, ένα UAV μπορεί να εστιάζει σε παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων (όπως ποιότητα αέρα ή θερμοκρασία), ενώ άλλο μπορεί να εντοπίζει κινητά αντικείμενα ή ανθρώπους, ενώ άλλοι UAVs εξασφαλίζουν επικοινωνία και υποστήριξη μέσω δικτύου. Αυτή η συνεργατική προσέγγιση εξασφαλίζει τη μέγιστη απόδοση σε όλες τις λειτουργίες της αποστολής.

Μια από τις κύριες προκλήσεις στην εφαρμογή πολυ-UAV συνεργασίας είναι η ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων στην επικοινωνία και η αποφυγή παρεμβολών, ειδικά σε περιοχές με περιορισμένο διαθέσιμο φάσμα ή έντονη ηλεκτρονική δραστηριότητα. Η συγχρονισμένη επικοινωνία μεταξύ των UAVs είναι κρίσιμη για την επιτυχή συλλογή δεδομένων και την αποδοτική ανταλλαγή πληροφοριών. Στη συνεργασία αυτών των UAVs, τα δεδομένα που συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο από τα διάφορα σημεία της περιοχής που παρακολουθείται, αποστέλλονται

αμέσως σε κεντρικά συστήματα, διασφαλίζοντας την ελάχιστη καθυστέρηση και την υψηλή ποιότητα των δεδομένων.

Η ευέλικτη επαναπροσαρμογή των UAVs σε περίπτωση αλλαγής συνθηκών είναι επίσης ένα σημαντικό πλεονέκτημα της πολυ-UAV συνεργασίας. Εάν ένα UAV αντιμετωπίσει τεχνικό πρόβλημα ή η περιοχή κάλυψης του απαιτεί ανανέωση, άλλοι UAVs από το δίκτυο μπορούν να αναλάβουν το έργο, ελαχιστοποιώντας τον κίνδυνο διακοπής της κάλυψης ή της ποιότητας των υπηρεσιών. Αυτή η αλληλοϋποστήριξη μεταξύ των UAVs εξασφαλίζει την ανθεκτικότητα και την αδιάλειπτη λειτουργία του συστήματος, ακόμη και σε δυναμικά ή επικίνδυνα περιβάλλοντα.

Η συνδυασμένη δυνατότητα ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας και της αυξημένης απόδοσης μέσω αυτής της συνεργασίας συμβάλλει στην αυξημένη αποτελεσματικότητα των αποστολών. Καθώς τα UAVs συνεργάζονται, καταφέρνουν να μειώσουν τις υπερβολικές επαναλήψεις εργασιών ή τη χρήση άχρηστης ενέργειας, ενισχύοντας την αυτονομία τους για μεγαλύτερες περιόδους και εξασφαλίζοντας την ολοκλήρωση των αποστολών τους χωρίς να χρειάζεται συνεχής υποστήριξη.

Συνολικά, η πολυ-UAV συνεργασία εξασφαλίζει τη βελτιστοποίηση της κάλυψης σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές, ενισχύοντας ταυτόχρονα την ποιότητα των υπηρεσιών που παρέχονται, όπως η παρακολούθηση περιβαλλοντικών συνθηκών, η ανίχνευση κινητών στόχων ή η παρακολούθηση κυκλοφορίας, παρέχοντας έτσι πιο ολοκληρωμένες και αξιόπιστες λύσεις σε τομείς όπως η ασφάλεια, η διάσωση και η παρακολούθηση κρίσιμων υποδομών.

5

Εφαρμογή Μηχανικής Μάθησης σε JCaS Συστήματα

Τα συστήματα Κοινής Επικοινωνίας και Ανίχνευσης (JCaS, Joint Communication and Sensing) αντιπροσωπεύουν μια καινοτόμα τεχνολογική προσέγγιση που ενοποιεί τις λειτουργίες ανίχνευσης (sensing) και επικοινωνίας μέσα από κοινές υποδομές και σήματα. Η ιδέα βασίζεται στη χρήση των ίδιων ραδιοσημάτων τόσο για τη μετάδοση δεδομένων όσο και για την ανίχνευση αντικειμένων ή αλλαγών στο περιβάλλον. Αυτό το πεδίο έρευνας αποκτά τεράστια σημασία στην πορεία προς την 6G εποχή, όπου οι απαιτήσεις για αποδοτικότητα, ακρίβεια και ενσωμάτωση πληροφοριών είναι υψηλότερες από ποτέ.

Η ανάγκη για πιο αποδοτικά και ακριβή συστήματα επικοινωνίας και ανίχνευσης έχει γίνει επιτακτική λόγω των εξελισσόμενων απαιτήσεων του κόσμου της τεχνολογίας, και ιδιαίτερα στην εποχή της 6G. Η ενοποίηση των λειτουργιών επικοινωνίας και ανίχνευσης δεν αποτελεί απλώς τεχνική εξέλιξη, αλλά και βασικό εργαλείο για την υλοποίηση εφαρμογών που υπόσχονται να αλλάξουν τον τρόπο που ζούμε και αλληλοεπιδρούμε με το περιβάλλον. Από αυτόνομα οχήματα που απαιτούν ακριβή και ταχύτατη ανίχνευση εμποδίων έως έξυπνες πόλεις που βασίζονται στην παρακολούθηση και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, τα JCaS συστήματα είναι το κλειδί για την εκπλήρωση αυτών των στόχων. Επιπλέον, εφαρμογές όπως τα αμυντικά συστήματα και οι ασύρματες επικοινωνίες υψηλής ακρίβειας βασίζονται στις δυνατότητες αυτής της τεχνολογίας για να λειτουργήσουν αποδοτικά σε σύνθετα και δυναμικά περιβάλλοντα [3].

5.1.1 Οι Προκλήσεις της Ενοποίησης Συστήματος

Η συνδυασμένη χρήση επικοινωνίας και ανίχνευσης θέτει προκλήσεις που σχετίζονται με τη σχεδίαση, την πολυπλοκότητα των συστημάτων, την επεξεργασία δεδομένων και την αποδοτική κατανομή πόρων.

Για παράδειγμα:

- Τα σήματα που χρησιμοποιούνται για επικοινωνία μπορεί να είναι ανεπαρκή για την ακρίβεια που απαιτεί η ανίχνευση, λόγω θορύβου, παρεμβολών και διάδοσης μέσω πολλαπλών διαδρομών.
- Η συγχώνευση δεδομένων από πολλαπλούς αισθητήρες και η αξιοποίηση της πληροφορίας σε πραγματικό χρόνο απαιτούν εξαιρετική επεξεργαστική ισχύ.
- Η ταυτόχρονη λειτουργία των δύο συστημάτων μπορεί να δημιουργήσει συγκρούσεις στην κατανομή των διαθέσιμων ραδιοφασμάτων.

Αυτές οι δυσκολίες υπογραμμίζουν την ανάγκη για προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας δεδομένων και σήματος που να μπορούν να διαχειριστούν αυτές τις πολυπλοκότητες, επιτυγχάνοντας βέλτιστη απόδοση και για τις δύο λειτουργίες.

5.1.2 Ο Ρόλος της Μηχανικής Μάθησης

Η Μηχανική Μάθηση (ML) εισέρχεται δυναμικά στο πεδίο των JCaS συστημάτων ως η τεχνολογία που μπορεί να αντιμετωπίσει αυτές τις προκλήσεις. Η ML βασίζεται σε αλγόριθμους μάθησης από δεδομένα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξαγάγει χρήσιμες πληροφορίες από περίπλοκα και θορυβώδη δεδομένα, να αναγνωρίσει μοτίβα και να βελτιστοποιήσει διαδικασίες σε πραγματικό χρόνο [3], [12].

Πώς η ML υποστηρίζει τα JCaS Συστήματα

- **Αυτοματοποίηση Επεξεργασίας Δεδομένων:** Οι ML αλγόριθμοι μπορούν να επεξεργάζονται δεδομένα επικοινωνίας και ανίχνευσης ταχύτερα και αποδοτικότερα από τις παραδοσιακές τεχνικές.
- **Ανάλυση Μεγάλων Όγκων Δεδομένων:** Οι σύγχρονες εφαρμογές JCaS συλλέγουν τεράστιες ποσότητες δεδομένων. Η ML μπορεί να επεξεργαστεί αυτά τα δεδομένα και να εξαγάγει γνώση που είναι χρήσιμη για τη λήψη αποφάσεων.
- **Προσαρμοστικότητα:** Τα συστήματα ML μπορούν να προσαρμόζονται σε δυναμικές αλλαγές στο περιβάλλον και στις απαιτήσεις των χρηστών. Για παράδειγμα, μπορούν να εντοπίζουν παρεμβολές και να αλλάζουν παραμέτρους λειτουργίας αυτόνομα.
- **Βελτιστοποίηση Πόρων:** Μέσω ML, τα JCaS συστήματα μπορούν να διαχειρίζονται αποδοτικότερα τους περιορισμένους πόρους, όπως το φάσμα και την επεξεργαστική ισχύ.

5.1.3 Σημασία της Μηχανικής Μάθησης για το Μέλλον των JCaS

Η μηχανική μάθηση δεν είναι απλώς μια υποστηρικτική τεχνολογία για τα JCaS συστήματα, αλλά αποτελεί την θεμελιώδη αρχή για την περαιτέρω ανάπτυξή τους. Οι δυνατότητες που προσφέρει ανοίγουν τον δρόμο για την υλοποίηση λειτουργιών όπως:

- **Διανεμημένη Ανίχνευση:** Η συγχώνευση δεδομένων από πολλαπλές πηγές μέσω federated learning.
- **Ανάλυση Περιβάλλοντος:** Δυνατότητα ενσωμάτωσης πολλαπλών πηγών δεδομένων, όπως επικοινωνίες, κάμερες, ραντάρ, για τη δημιουργία ακριβών μοντέλων περιβάλλοντος.
- **Αυτονομία:** Ενεργοποίηση έξυπνων συστημάτων που μπορούν να λειτουργούν με ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση.

5.2 Αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης για Επεξεργασία Δεδομένων

Η μηχανική μάθηση (ML) έχει καταστεί θεμελιώδης για την ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων σε συστήματα Κοινής Επικοινωνίας και Ανίχνευσης (JCaS). Σε αυτά τα συστήματα, τα δεδομένα προέρχονται από διαφορετικούς αισθητήρες (π.χ., ραντάρ, κάμερες, αισθητήρες θερμοκρασίας, LiDAR) και περιλαμβάνουν ένα πλήθος παραμέτρων, όπως τα χαρακτηριστικά σήματος, τα μοτίβα ανίχνευσης και τις μεταβλητές του περιβάλλοντος. Η μηχανική μάθηση παρέχει τα εργαλεία για να αποκαλύψει χρήσιμες πληροφορίες και να βελτιώσει τη λειτουργία αυτών των συστημάτων.

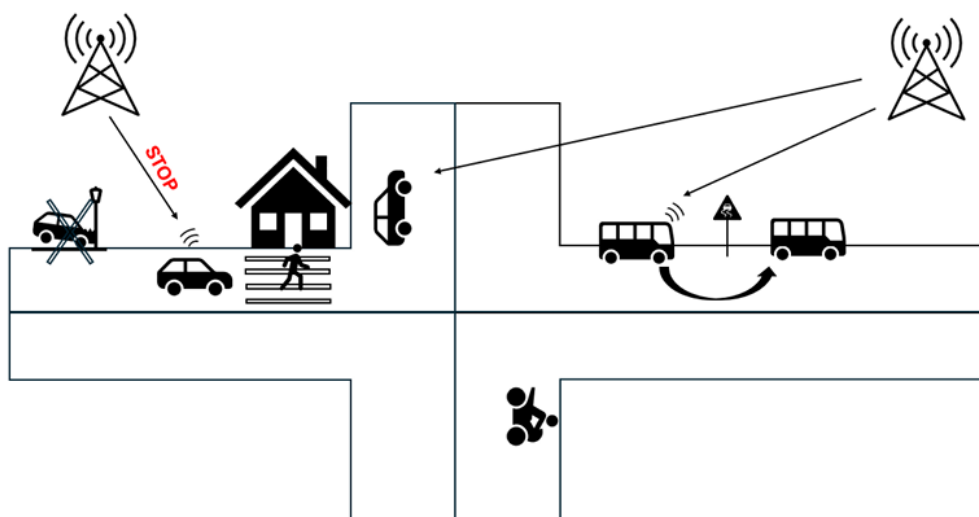
5.2.1 Βασικές Κατηγορίες Αλγορίθμων

Στη συνέχεια, θα εξετάσουμε και θα αναλύσουμε τις βασικές κατηγορίες των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία δεδομένων σε JCaS, με συγκεκριμένα παραδείγματα και σενάρια εφαρμογής.

- **Επιβλεπόμενη Μάθηση**

Η επιβλεπόμενη μάθηση (Supervised Learning) απαιτεί επισημασμένα δεδομένα, στα οποία κάθε δείγμα συνοδεύεται από μια ετικέτα (label). Οι αλγόριθμοι προσπαθούν να μάθουν μια συνάρτηση που θα επιτρέπει την ταξινόμηση ή την πρόβλεψη νέων, μη επισημασμένων δειγμάτων. Στην περίπτωση των JCaS συστημάτων, αυτό είναι πολύ χρήσιμο όταν οι αισθητήρες συλλέγουν δεδομένα με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που πρέπει να αναγνωριστούν ή να ταξινομηθούν.

- **Παράδειγμα 1: Εκπαίδευση ενός CNN για την αναγνώριση αντικειμένων σε δεδομένα ραντάρ**

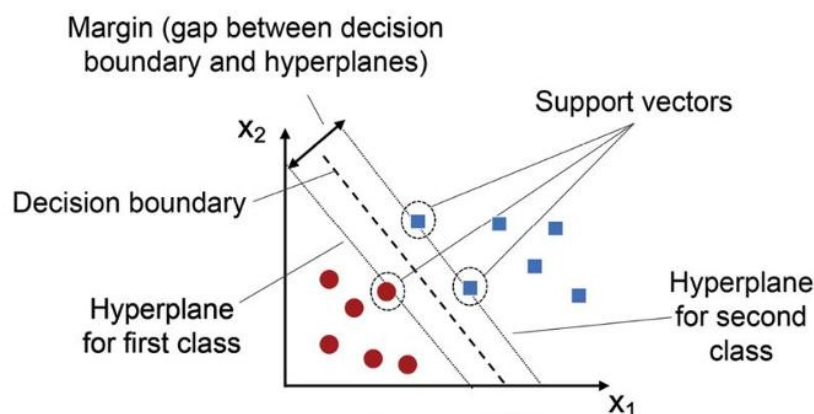


Εικόνα 14 Εκπαίδευση ενός CNN για την αναγνώριση αντικειμένων σε δεδομένα ραντάρ

Σενάριο: Ένα σύστημα αυτόνομου οχήματος εξοπλισμένο με ραντάρ και κάμερες χρησιμοποιεί επιβλεπόμενη μάθηση για να αναγνωρίσει αντικείμενα στον δρόμο, όπως άλλα οχήματα, πεζούς ή εμπόδια. Τα δεδομένα από το ραντάρ (που περιλαμβάνουν την ανακλώμενη ένταση του σήματος από διάφορα αντικείμενα) εκλαμβάνονται ως είσοδοι και οι αντίστοιχες ετικέτες είναι οι κατηγορίες των αντικειμένων (π.χ., "όχημα", "πεζός", "δρομολόγιο"). Ο αλγόριθμος CNN εκπαιδεύεται με την παρακολούθηση των δεδομένων ραντάρ και κατηγοριοποιεί τα αντικείμενα στις αντίστοιχες ετικέτες τους [3].

- **Παράδειγμα 2: Χρήση Support Vector Machines (SVM) για την ταξινόμηση ανακλώμενων σημάτων σε κινητά ή σταθερά αντικείμενα**

Σενάριο: Σε ένα σύστημα JCaS, τα σήματα που ανακλώνται από διάφορα αντικείμενα (π.χ., κτήρια ή οχήματα) μπορούν να ταξινομηθούν με τη βοήθεια ενός αλγορίθμου SVM. Στην περίπτωση αυτή, τα χαρακτηριστικά των σημάτων, όπως η ένταση και η συχνότητα ανακλάσεως, χρησιμοποιούνται ως είσοδος, ενώ οι ετικέτες είναι οι τύποι των αντικειμένων (στατικά ή κινητά). Ο SVM δημιουργεί μια υπερ-επίπεδη διάκριση που επιτρέπει την κατηγοριοποίηση των σημάτων σε κινητά ή σταθερά αντικείμενα.



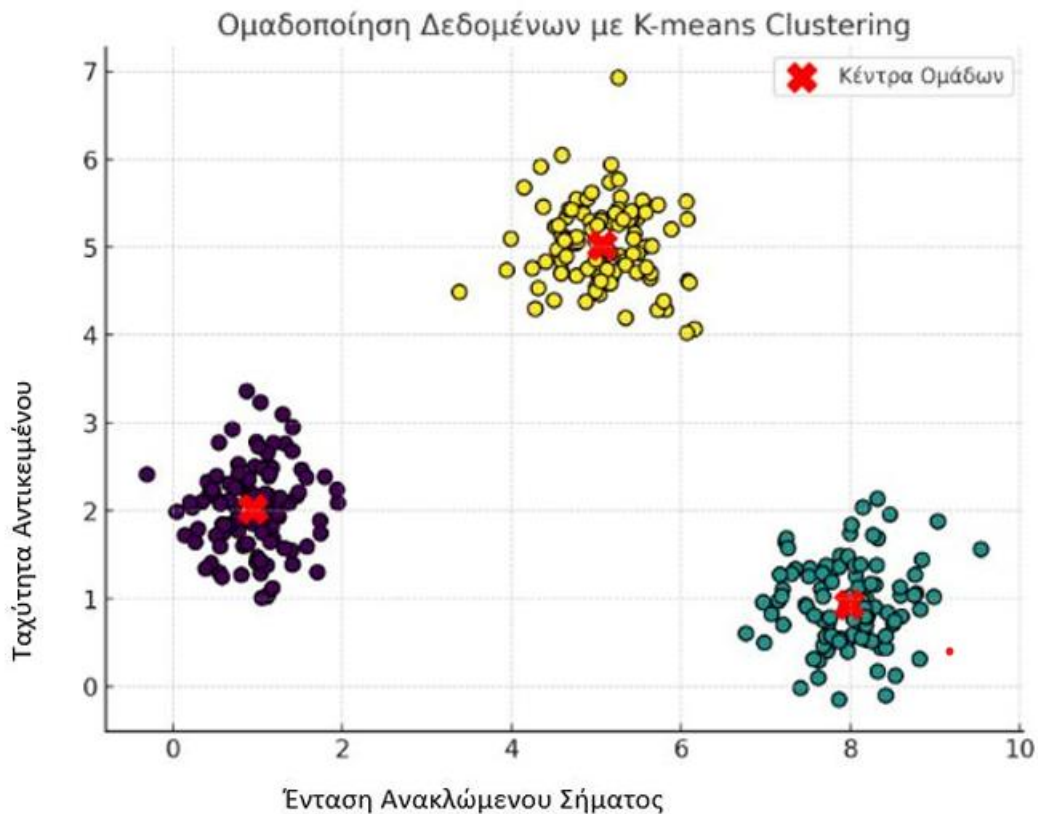
Εικόνα 15 Χρήση SVM για την ταξινόμηση ανακλώμενων σημάτων σε κινητά ή σταθερά αντικείμενα[20]

- **Μη Επιβλεπόμενη Μάθηση**

Στην περίπτωση της μη επιβλεπόμενης μάθησης (Unsupervised Learning), δεν υπάρχουν ετικέτες για τα δεδομένα. Αντίθετα, ο στόχος είναι η ανακάλυψη κρυφών δομών ή μοτίβων μέσα στα δεδομένα.

- **Παράδειγμα: Clustering δεδομένων για την ομαδοποίηση τύπων αντικειμένων που ανιχνεύονται σε ένα περιβάλλον**

Σενάριο: Σε ένα σύστημα ανίχνευσης που χρησιμοποιεί ένα δίκτυο αισθητήρων σε μια πόλη, οι αισθητήρες καταγράφουν ανακλώμενα σήματα από διαφορετικά αντικείμενα στο περιβάλλον, όπως αυτοκίνητα, πεζούς και ποδήλατα. Χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο Clustering όπως το K-means, το σύστημα μπορεί να ομαδοποιήσει αυτά τα σήματα σε διάφορες κατηγορίες χωρίς να γνωρίζει εκ των προτέρων τον τύπο των αντικειμένων.



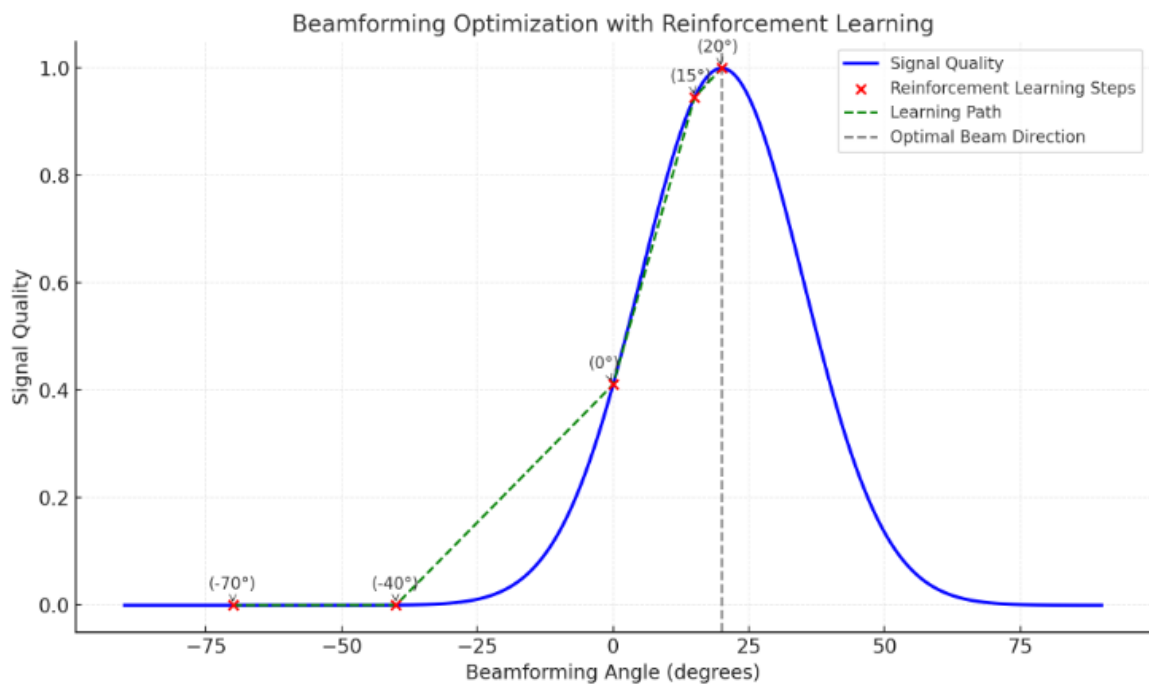
Εικόνα 16 Διάγραμμα Ομαδοποίησης Δεδομένων με K-means Clustering

- **Ενισχυτική Μάθηση**

Η ενισχυτική μάθηση (Reinforcement Learning) χρησιμοποιείται σε περιβάλλοντα όπου το σύστημα μαθαίνει μέσω αλληλεπιδράσεων και ανατροφοδότησης από το περιβάλλον. Στα JCaS συστήματα, αυτό είναι χρήσιμο για δυναμικές εφαρμογές που απαιτούν συνεχή προσαρμογή.

- **Παράδειγμα: Προσαρμογή της κατεύθυνσης εκπομπής δοκών (beamforming) για τη βελτιστοποίηση ανίχνευσης**

Σενάριο: Σε ένα σύστημα επικοινωνίας και ανίχνευσης, η βελτιστοποίηση της κατεύθυνσης εκπομπής των δοκών (beamforming) είναι κρίσιμη για την αποδοτικότητα του συστήματος. Χρησιμοποιώντας ενισχυτική μάθηση, το σύστημα μπορεί να μάθει πώς να προσαρμόσει δυναμικά την κατεύθυνση εκπομπής του για τη βελτίωση της ποιότητας ανίχνευσης ή τη μείωση της παρεμβολής. Το σύστημα αλληλοεπιδρά με το περιβάλλον και προσαρμόζεται σύμφωνα με τις ανατροφοδοτήσεις που λαμβάνει από την ποιότητα του σήματος και την ακρίβεια ανίχνευσης.



Εικόνα 17 Διάγραμμα Βελτιστοποίησης Beamforming με Ενισχυτική Μάθηση [3]

- **Βαθιά Μάθηση**

Η βαθιά μάθηση (Deep Learning) χρησιμοποιεί πολύπλοκα νευρωνικά δίκτυα για την επεξεργασία δεδομένων υψηλής διάστασης και πολυπλοκότητας, όπως εικόνες, βίντεο και δεδομένα σήματος.

- **Παράδειγμα: Δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων περιβάλλοντος από δεδομένα ανίχνευσης**

Σενάριο: Ένα αυτόνομο όχημα ή σύστημα ανίχνευσης μπορεί να χρησιμοποιήσει δεδομένα από αισθητήρες LiDAR και ραντάρ για να δημιουργήσει ένα τρισδιάστατο μοντέλο του περιβάλλοντος του. Τα δεδομένα ανίχνευσης, όπως η απόσταση και η θέση των αντικειμένων, εισάγονται σε ένα νευρωνικό δίκτυο βαθιάς μάθησης (π.χ., CNN ή Transformer), το οποίο χρησιμοποιεί αυτά τα δεδομένα για να ανακατασκευάσει

τρισδιάστατους χάρτες της περιοχής γύρω από το όχημα. Αυτοί οι χάρτες χρησιμοποιούνται για την πλοήγηση και την ανίχνευση εμποδίων σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 18 Τρισδιάστατο μοντέλο περιβάλλοντος από δεδομένα ανίχνευσης

5.3 Επεξεργασία Δεδομένων σε Συστήματα JCaS

Η επεξεργασία δεδομένων σε σύνθετα συστήματα επικοινωνίας και ανίχνευσης (JCaS) αντιμετωπίζει δύο σημαντικές προκλήσεις: την πολυπλοκότητα σημάτων και παρεμβολών και τη συγχώνευση δεδομένων από πολλαπλές πηγές. Οι λύσεις που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων βασίζονται σε σύγχρονες τεχνικές μηχανικής μάθησης και νευρωνικών δικτύων, όπως τα Generative Adversarial Networks (GANs) και τα Graph Neural Networks (GNNs).

5.3.1 Πολυπλοκότητα Σημάτων και Παρεμβολές

Η πολυπλοκότητα σημάτων αναφέρεται στην ανάγκη να διαχειριστούν δεδομένα που περιέχουν θόρυβο και παρεμβολές από εξωτερικές ή εσωτερικές πηγές. Στα σύγχρονα συστήματα ανίχνευσης και επικοινωνίας, η ικανότητα για την ακριβή ανάκτηση των καθαρών σημάτων είναι καθοριστική, καθώς τα θορυβώδη ή παραμορφωμένα δεδομένα ενδέχεται να οδηγήσουν σε λάθη ανίχνευσης ή αναγνώρισης. Ο θόρυβος μπορεί να προέρχεται από διάφορες πηγές, όπως παρεμβολές από άλλες συσκευές, ατμοσφαιρικές συνθήκες ή εσωτερικές ανωμαλίες του συστήματος, κάτι που καθιστά τα δεδομένα λιγότερο αξιόπιστα και δυσκολεύει την ανάλυση.

• **Λύση μέσω Generative Adversarial Networks**

Τα Generative Adversarial Networks (GANs) είναι ένα εξαιρετικά ισχυρό εργαλείο για την ανακατασκευή καθαρών σημάτων από θορυβώδη ή παρεμβολικά δεδομένα. Ένα GAN αποτελείται από δύο βασικά μέρη:

- Το γεννητικό δίκτυο (generator): Το οποίο προσπαθεί να δημιουργήσει δεδομένα που μοιάζουν με τα πραγματικά, αλλά ενδέχεται να είναι θολά ή παραμορφωμένα λόγω θορύβου.
- Το διακριτικό δίκτυο (discriminator): Το οποίο προσπαθεί να καταλάβει αν τα δεδομένα που παράγονται είναι πραγματικά ή αν προέρχονται από τον γεννήτορα.

Η σύγκρουση μεταξύ αυτών των δύο δικτύων επιτρέπει στο GAN να βελτιώσει συνεχώς την ικανότητά του να δημιουργεί καθαρά δεδομένα. Στο πλαίσιο των JCaS, τα GANs χρησιμοποιούνται για την αναπαραγωγή καθαρών σημάτων από θορυβώδη δεδομένα, με στόχο την αποκατάσταση της αρχικής ποιότητας των σημάτων. Αυτή η τεχνική είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε εφαρμογές που απαιτούν ακριβή ανίχνευση, όπως τα συστήματα ραντάρ ή τα αισθητήρια LiDAR, όπου οι παρεμβολές από εξωτερικούς θορύβους ή άλλες πηγές ενδέχεται να αλλοιώσουν τα σήματα.

Η ικανότητα του γεννητικού δικτύου να "μάθει" από το θόρυβο και να αναπαράγει καθαρά σήματα καθιστά τα GANs ιδανικά για τέτοιες εφαρμογές. Επιπλέον, τα GANs επιτρέπουν την εκπαίδευση του μοντέλου με δεδομένα που περιλαμβάνουν διάφορους τύπους θορύβου, προσαρμόζοντας δυναμικά τη διαδικασία αποκατάστασης για να βελτιστοποιήσει τα αποτελέσματα σε πραγματικά δεδομένα. Αυτό επιτρέπει την ενσωμάτωση διαφόρων τύπων θορύβου, όπως ο θόρυβος από το περιβάλλον, τεχνικές παρεμβολές, και άλλες μηχανικές ανωμαλίες, κάνοντας το σύστημα πιο ευέλικτο και ανθεκτικό στις πραγματικές συνθήκες.

Η εφαρμογή GANs σε συστήματα ανίχνευσης όπως τα ραντάρ, τα συστήματα LiDAR και οι κάμερες επιτρέπει τη βελτίωση της απόδοσης, εξασφαλίζοντας την ανίχνευση και αναγνώριση σε πιο απαιτητικά περιβάλλοντα.

5.4 Συγχώνευση Δεδομένων από Πολλαπλές Πηγές

Η συγχώνευση δεδομένων από διαφορετικούς αισθητήρες και πηγές αποτελεί μια πρόκληση λόγω των διαφορών στον τύπο και τη μορφή των δεδομένων που συλλέγονται. Ειδικότερα, οι αισθητήρες όπως οι κάμερες, το LiDAR, το ραντάρ και άλλοι παράγουν δεδομένα σε διαφορετικές διαστάσεις και μοντέλα αναπαράστασης. Η συγχώνευση αυτών των δεδομένων με ακρίβεια είναι απαραίτητη για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών, όπως η ανίχνευση αντικειμένων, η παρακολούθηση κίνησης και η αναγνώριση περιβαλλόντων.

• **Λύση μέσω Graph Neural Networks**

Τα Graph Neural Networks (GNNs) αποτελούν μια σύγχρονη προσέγγιση για τη συγχώνευση δεδομένων από πολλαπλές και διαφορετικές πηγές. Τα GNNs είναι νευρωνικά δίκτυα που λει-

τουργούν πάνω σε γραφήματα, δηλαδή, δομές δεδομένων όπου οι κόμβοι (nodes) αντιπροσωπεύουν οντότητες (όπως αισθητήρες ή δεδομένα από αυτούς) και οι ακμές (edges) αναπαριστούν τις σχέσεις ή τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών των οντοτήτων.

Η συγχώνευση δεδομένων μέσω GNNs επιτρέπει τη συνδυασμένη αξιοποίηση δεδομένων από διαφορετικούς αισθητήρες, όπως κάμερες, ραντάρ και LiDAR, για να αναγνωρίσουμε τις αλληλεπιδράσεις και τις σχέσεις μεταξύ τους. Αυτό επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση του περιβάλλοντος, με την έννοια ότι τα δεδομένα που προέρχονται από διαφορετικές πηγές μπορούν να ενωθούν σε ένα κοινό μοντέλο, το οποίο ενσωματώνει τόσο τις εικόνες όσο και τις τρισδιάστατες πληροφορίες.

Τα GNNs βοηθούν στην εξαγωγή πιο ακριβών και πλούσιων πληροφοριών από τα δεδομένα, καθώς επιτρέπουν την εκμετάλλευση της επικοινωνίας και των σχέσεων μεταξύ διαφορετικών αισθητήρων. Αυτή η διαδικασία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ανίχνευση αντικειμένων, την παρακολούθηση κίνησης και τη χαρτογράφηση του περιβάλλοντος, με ακρίβεια και συνέπεια, ακόμα και σε περιβάλλοντα με περιορισμένη ορατότητα ή ακανόνιστα χαρακτηριστικά.

Η εφαρμογή των GNNs είναι ζωτικής σημασίας σε τομείς όπως:

- **Αυτόνομα οχήματα:** Για την ασφαλή πλοήγηση σε δύσκολες συνθήκες και σε περιβάλλοντα με περιορισμένη ορατότητα. Η συγχώνευση δεδομένων από κάμερες, LiDAR και ραντάρ είναι κρίσιμη για τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο.
- **Συστήματα παρακολούθησης:** Για την ακριβή ανίχνευση κινήσεων και την αναγνώριση αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο, ενσωματώνοντας δεδομένα από διαφορετικούς αισθητήρες και αναλύοντας την αλληλεπίδραση μεταξύ τους.
- **Στρατηγικά και αμυντικά συστήματα:** Για την ανάλυση δεδομένων από διάφορους αισθητήρες και την αναγνώριση απειλών. Η συγχώνευση των δεδομένων επιτρέπει τη συνεχιζόμενη παρακολούθηση και αξιολόγηση των απειλών σε πραγματικό χρόνο.

Η χρήση των GNNs επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα κάθε τύπου αισθητήρα και εξάγοντας πιο αξιόπιστες και χρήσιμες πληροφορίες, βελτιώνοντας την ποιότητα των αποφάσεων και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων σε πραγματικές εφαρμογές.

5.5 Χρήση Μηχανικής Μάθησης για Επεξεργασία Σήματος

Η επεξεργασία σήματος είναι θεμελιώδης για την αποτελεσματική λειτουργία των συστημάτων JCaS (Σύστημα Κοινής Επικοινωνίας και Ανίχνευσης). Στα συστήματα αυτά, τα σήματα που χρησιμοποιούνται για επικοινωνία και ανίχνευση συχνά περιλαμβάνουν θόρυβο και παρεμβολές που προκύπτουν από εξωτερικούς ή εσωτερικούς παράγοντες, οι οποίες πρέπει να αντιμετωπιστούν με βέλτιστες τεχνικές ανάλυσης. Η εφαρμογή τεχνικών μηχανικής μάθησης (ML) στην επεξεργασία σήματος προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις στην ακρίβεια, την ταχύτητα και την ποιό-

τητα της ανάλυσης των σημάτων, καθιστώντας τα συστήματα πιο αποδοτικά και αξιόπιστα. Εξετάζοντας τα βασικά εργαλεία και τεχνικές που χρησιμοποιούνται, μπορούμε να κατανοήσουμε πώς συμβάλλουν στην αναβάθμιση της λειτουργικότητας αυτών των συστημάτων.

5.5.1 Εργαλεία και Τεχνικές Μηχανικής Μάθησης για Επεξεργασία Σήματος

- **Μείωση Θορύβου και Παρεμβολών**

- **Autoencoders:**

Τα Autoencoders είναι νευρωνικά δίκτυα που μπορούν να ανακατασκευάσουν δεδομένα μειώνοντας ανακριβείς ή περιττές πληροφορίες, αφήνοντας μόνο τα πιο χρήσιμα χαρακτηριστικά. Σε περιβάλλοντα με θόρυβο, τα Autoencoders μπορούν να μάθουν να αναγνωρίζουν και να απομακρύνουν τον θόρυβο από τα δεδομένα, ανακατασκευάζοντας καθαρές εκδοχές του σήματος. Αυτή η τεχνική είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε εφαρμογές όπως η ανάλυση σήματος από ραντάρ ή τις συσκευές επικοινωνίας, όπου ο θόρυβος μπορεί να αλλοιώσει την ποιότητα του σήματος. Η ικανότητα των Autoencoders να διαχωρίζουν το θόρυβο από τα σημαντικά δεδομένα επιτρέπει την εξαιρετική αποδοτικότητα στην καθαρότητα των σημάτων, γεγονός που ενισχύει τη λειτουργία του συστήματος.

- **Generative Adversarial Networks (GANs):**

Τα GANs προσφέρουν ισχυρές λύσεις για τη διαχωρισμό σημάτων από θόρυβο. Με τη χρήση ενός γεννητικού και ενός διακριτικού δικτύου, τα GANs μπορούν να "μάθουν" το χαρακτηριστικό μοτίβο του θορύβου και να το αφαιρέσουν από τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, κάτι που είναι εξαιρετικά χρήσιμο σε δυναμικά περιβάλλοντα όπου οι συνθήκες του θορύβου αλλάζουν συνεχώς, όπως σε ασύρματες επικοινωνίες ή συστήματα ανίχνευσης σε εξωτερικούς χώρους. Η δυνατότητα των GANs να εξελίσσουν τη μάθηση τους σε πραγματικό χρόνο τα καθιστά ιδανικά για την αντιμετώπιση παρεμβολών και της συνεχούς αλλαγής του θορύβου σε εξωτερικά περιβάλλοντα.

- **Ανάλυση υψηλής ευκρίνειας**

- **Χρήση CNNs για ανάλυση υψηλής ευκρίνειας:**

Η ανάλυση υψηλής ευκρίνειας (super resolution) είναι η διαδικασία ενίσχυσης της ανάλυσης εικόνας ή δεδομένων από μικρής ανάλυσης δεδομένα. Τα Convolutional Neural Networks (CNNs) είναι ιδανικά για αυτή την εφαρμογή, καθώς μπορούν να μάθουν τα πιο κρίσιμα χαρακτηριστικά και να συνδυάσουν πολλές εικόνες ή σήματα για να δημιουργήσουν δεδομένα υψηλότερης ανάλυσης. Στα JCaS συστήματα, η ανάλυση υψηλής ευκρίνειας χρησιμοποιείται για τη δημιουργία υψηλής ανάλυσης χαρτών από δεδομένα που συλλέγονται με χαμηλότερη ακρίβεια, όπως από ραντάρ ή αισθητήρες LiDAR, διευκολύνοντας την ακριβή ανίχνευση και παρακολούθηση. Οι CNNs επιτρέπουν επίσης την ενίσχυση της εικόνας ή του

σήματος σε περιοχές με περιορισμένες πληροφορίες, επιτυγχάνοντας βελτιωμένη ανάλυση και αναγνώριση αντικειμένων σε περιβάλλοντα με περιορισμένη ορατότητα.

- **Εκτίμηση Καναλιών**

- **RNNs για Εκτίμηση Καναλιών:**

Τα Recurrent Neural Networks (RNNs) χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς των καναλιών επικοινωνίας. Αυτά τα δίκτυα είναι ιδανικά για την επεξεργασία δεδομένων με ακολουθιακή φύση, καθώς μπορούν να "θυμούνται" προηγούμενα στάδια και να προσαρμόζουν την εκτίμηση του καναλιού με βάση τις προηγούμενες τιμές. Αυτό είναι σημαντικό όταν τα χαρακτηριστικά του καναλιού αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου, όπως για παράδειγμα σε επικοινωνίες μέσω ασύρματων καναλιών όπου η ισχύς του σήματος ή η απόσταση μεταβάλλονται συνεχώς. Οι RNNs προσφέρουν τη δυνατότητα σε συστήματα JCaS να προσαρμόζουν τις εκτιμήσεις τους σε πραγματικό χρόνο, εξασφαλίζοντας τη βέλτιστη επικοινωνία.

- **Transformers για Εκτίμηση Καναλιών σε Πραγματικό Χρόνο:**

Οι Transformers, που κερδίζουν δημοτικότητα τα τελευταία χρόνια, είναι ιδανικοί για την πρόβλεψη παραμέτρων του καναλιού σε πραγματικό χρόνο. Αντί για τα παραδοσιακά RNNs, οι Transformers χρησιμοποιούν μηχανισμούς προσοχής για να επικεντρωθούν στα πιο σημαντικά μέρη των δεδομένων, επιτρέποντας τη γρηγορότερη και πιο ακριβή πρόβλεψη παραμέτρων του καναλιού σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Αυτή η τεχνική ενισχύει την ικανότητα των JCaS συστημάτων να παρέχουν ακριβείς εκτιμήσεις καναλιών χωρίς καθυστερήσεις, κάτι που είναι κρίσιμο σε περιβάλλοντα όπου η ακριβής και γρήγορη επικοινωνία είναι απαραίτητη.

- **Πρόβλεψη Παρεμβολών**

- **Ενισχυτική Μάθηση για Παρεμβολές:**

Η ενισχυτική μάθηση (Reinforcement Learning) χρησιμοποιείται για τη δυναμική προσαρμογή συχνοτήτων εκπομπής σε συστήματα όπου οι παρεμβολές είναι συχνές και η ανάγκη για γρήγορη προσαρμογή είναι υψηλή. Επιτρέπει στο σύστημα να μάθει από την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον και να βελτιστοποιήσει την επιλογή συχνοτήτων για την ελαχιστοποίηση της παρεμβολής, ενισχύοντας την απόδοση του συστήματος. Η ενισχυτική μάθηση προσφέρει τη δυνατότητα αυτομάτως προσαρμοζόμενων στρατηγικών που επιτρέπουν στους αισθητήρες και τα συστήματα επικοινωνίας να λειτουργούν σε βέλτιστο επίπεδο, ακόμη και όταν οι συνθήκες της συχνότητας είναι ασταθείς ή υπόκεινται σε δυναμικές μεταβολές.

5.6 Παραδείγματα Εφαρμογής

- **Αυτόνομα Οχήματα**

Τα αυτόνομα οχήματα χρησιμοποιούν ML για την ανάλυση δεδομένων ραντάρ και επικοινωνίας για να εντοπίσουν εμπόδια και να αποφύγουν συγκρούσεις. Η ML βελτιώνει την ακρίβεια και ταχύτητα ανίχνευσης σε πραγματικό χρόνο, συνδυάζοντας δεδομένα από κάμερες, ραντάρ και LiDAR για την αναγνώριση αντικειμένων και την πλοήγηση του οχήματος σε πολύπλοκα περιβάλλοντα. Εφαρμογές ML, όπως η μείωση θορύβου και η ανάλυση υψηλής ευκρίνειας, επιτρέπουν τη βελτίωση των αισθητήρων και την ακριβή ανίχνευση σε δύσκολες συνθήκες [19].

- **Έξυπνες Πόλεις**

Η διαχείριση της κυκλοφορίας σε έξυπνες πόλεις χρησιμοποιεί ML για την ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, όπως η ροή κυκλοφορίας, οι συνθήκες του δρόμου και η συμπεριφορά των οδηγών. Με τη χρήση τεχνικών ανάλυσης σήματος και την ανάλυση υψηλής ευκρίνειας, τα συστήματα μπορούν να δημιουργήσουν ακριβείς χάρτες και προβλέψεις για τη βελτίωση της κυκλοφορίας. Η δυνατότητα του ML να προσαρμόζεται και να προβαίνει σε εκτιμήσεις σε πραγματικό χρόνο, βοηθά στην ανάπτυξη πιο έξυπνων συστημάτων μετακίνησης.

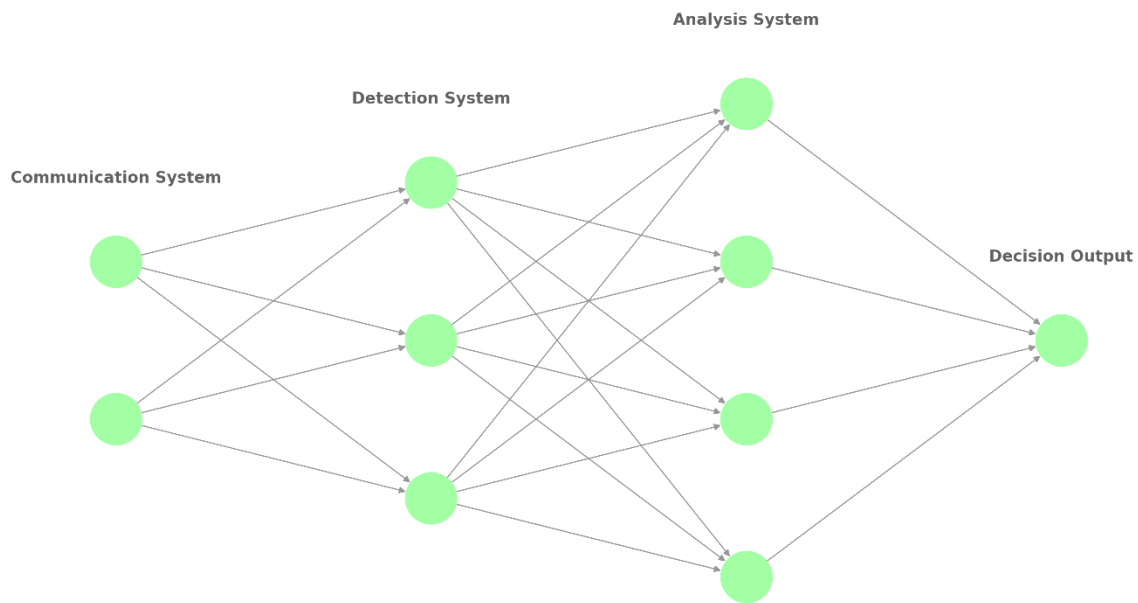
- **Στρατιωτικές Εφαρμογές**

Στο πεδίο της άμυνας, τα JCaS συστήματα χρησιμοποιούν ML για την ανίχνευση drones ή μη επανδρωμένων αεροσκαφών σε συνθήκες χαμηλής ορατότητας, όπως περιοχές με περιορισμένο φωτισμό ή κακές καιρικές συνθήκες. Τα μοντέλα μηχανικής μάθησης μπορούν να συνδυάσουν δεδομένα από ραντάρ, αισθητήρες θερμικής ή υπέρυθρης ανίχνευσης και κάμερες για να εντοπίσουν και να παρακολουθήσουν τις απειλές, ενώ η ενισχυτική μάθηση βελτιστοποιεί τις στρατηγικές εκπομπής και επικοινωνίας για την αποφυγή παρεμβολών.

5.6.1 Οπτική Αναπαράσταση και Διαγράμματα Εφαρμογών

- **Διάγραμμα Λειτουργίας JCaS με Εφαρμογές ML**

Περιγραφή: Το διάγραμμα απεικονίζει τη λειτουργική σύνδεση μεταξύ των συστημάτων επικοινωνίας, ανίχνευσης και ανάλυσης δεδομένων σε ένα σύστημα JCaS. Θα δείξει πώς τα μοντέλα μηχανικής μάθησης (π.χ., CNN, RNN, Transformers) ενσωματώνονται για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης.

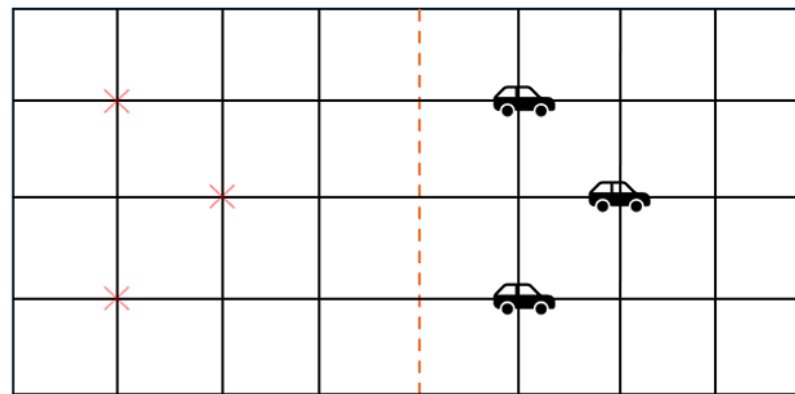


Εικόνα 19 Διάγραμμα Λειτουργίας JCaS με Εφαρμογές ML

- **Communication System (Σύστημα Επικοινωνίας):** Τα δεδομένα εισόδου από αισθητήρες όπως ραντάρ και LiDAR.
- **Detection System (Σύστημα Ανίχνευσης):** Επεξεργασία και φιλτράρισμα των δεδομένων για εντοπισμό αντικειμένων.
- **Analysis System (Σύστημα Ανάλυσης):** Εφαρμογές μηχανικής μάθησης όπως CNN, RNN και Transformers.
- **Decision Output (Αποτέλεσμα Απόφασης):** Βελτιστοποιημένες αποφάσεις για την ενίσχυση της απόδοσης.

• Ανάλυση Δεδομένων Υψηλής Πυκνότητας

Περιγραφή: Το διάγραμμα απεικονίζει έναν χάρτη που δημιουργείται από δεδομένα ML με ανάλυση υψηλής ευκρίνειας, που δείχνει τα αντικείμενα σε ένα περιβάλλον υψηλής πυκνότητας. Το διάγραμμα θα παρουσιάσει πώς οι τεχνικές ML ενισχύουν την ανάλυση των δεδομένων από ραντάρ ή LiDAR.



Δεδομένα από Ραντάρ ή LiDAR

Τεχνικές ML

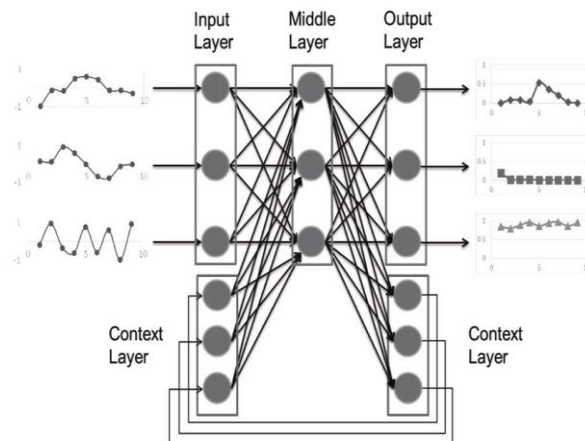
✗ : Απεικόνιση οχήματος από radar ή LiDAR. Παρατηρούμε ότι δεν έχουμε το ακριβές σχήμα του αυτοκινήτου καθώς δεν είναι και ευκρινές.

🚗 : Μέσω της μηχανικής μάθησης έχουμε την κανονική απεικόνιση ενός οχήματος

Εικόνα 20 Διάγραμμα Ανάλυσης Δεδομένων Υψηλής Πυκνότητας μέσω Super-Resolution

- **Εκτίμηση Δυναμικής Καναλιών μέσω RNN**

Περιγραφή: Το διάγραμμα απεικονίζει τη ροή δεδομένων μέσω ενός μοντέλου **RNN** για την εκτίμηση καναλιών σε εφαρμογές JCaS, δείχνοντας πώς τα δεδομένα του καναλιού επικοινωνίας περνούν μέσα από το RNN για να δημιουργήσουν μια πρόβλεψη για τη δυναμική του καναλιού.



Εικόνα 21 Διάγραμμα Εκτίμησης Δυναμικής Καναλιών μέσω RNN [21]

Βιβλιογραφία

- [1] 6G Wireless Communications Networks: A Comprehensive Survey, Muntadher Alsa-bah; Marwah Abdulrazzaq Naser; Basheera M. Mahmmod; Sadiq H. Abdulhussain; Mo-hammad R. Eissa, Ahmed Al-Baidhani, 02 November 2021, IEEE
- [2] Integrated Sensing and Communication (ISAC), Alireza Bayesteh , Jia He , Yan Chen , Peiy-ing Zhu , Jianglei Ma , Nov 2022, Huawei
- [3] Integrated Sensing and Communication for 6G: Ten Key Machine Learning Roles, Umut Demirhan; Ahmed Alkhateeb, 22 February 2023, IEEE
- [4] Unveiling the Evolution of Mobile Networks: From 1G to 7G, Ellie Zontou, 31 October, 2023, University of Patras
- [5] Standard Propagation Channel Models for MIMO Communication Systems, Agbotiname Lucky Imoize and K. V. N. Kavitha, 16 February 2021, Hindawi
- [6] A Survey on Fundamental Limits of Integrated Sensing and Communication, An Liu , Zhe Huang, February 7, 2022
- [7] Code-Division OFDM Joint Communication and Sensing System for 6G Machine-Type Communication, Xu Chen Zhiqing Wei , Student Member, IEEE, Zhiyong Feng , Member, IEEE, Ping Zhang, February 19, 2021,
- [8] Enabling Joint Communication and Radar Sensing in Mobile Networks—A Survey, J. An-drew Zhang , Senior Member, IEEE, Md. Lushanur Rahman ,KaiWu Xiaojing Huang, Octo-ber 25, 2021
- [9] Evolution of wireless communication networks: from 1G to 6G and future perspective, Ahmed Amin Ahmed Solyman, Khalid Yahya, Feb 25, 2022, International Journal of Elec-trical and Computer Engineering (IJECE)
- [10] Integrated Sensing and Communication Waveform Design: A Survey, WENXING ZHOU, RUOYU ZHANG ANDWENWU, 10 October 2022, ComSec
- [11] Joint Communication and Sensing Toward 6G: Models and Potential of Using MIMO, Models and Potential of Using MIMO Xinran Fang Yunfei Chen , Student Member, IEEE, 2 December 2022, IEEE
- [12] Joint Communication, Sensing, and Computation Enabled 6G Intelligent Machine Sys-tem, Zhiyong Feng, Zhiqing Wei, Xu Chen, Heng Yang, Qixun Zhang, and Ping Zhang,
- [13] Joint Design of Communication and Sensing for Beyond 5G and 6G Systems, THORSTEN WILD VOLKER BRAUN2, AND HARISH VISWANATHA, February 15, 2021, IEEE
- [14] Joint Radar and Communication Design: Applications, State-of-the-Art, and the Road Ahead, Fan Liu , Member, IEEE, Christos Masouros Hugh Griffiths, February 8, 2020, IEEE

- [15] OTFS-Based Joint Communication and Sensing for Future Industrial IoT, Kai Wu , J. Andrew Zhang , Senior Member, IEEE, Xiaojing Huang, 20 December 2021, IEEE
- [16] Performance of Joint Sensing-Communication Cooperative Sensing UAV Network, Xu Chen , Student Member, IEEE, Zhiyong Feng Feifei Gao, December 4, 2020, IEEE
- [17] UAV-Enabled Integrated Sensing and Communication: Opportunities and Challenges, Kaitao Meng, Member, IEEE, Qingqing Wu, Senior Member, IEEE, Jie Xu, Senior Member, IEEE, Wen Chen, Senior Member, IEEE, Zhiyong Feng, February 10, 2022, IEEE
- [18] Using Massive MIMO Arrays for Joint Communication and Sensing, Stefano Buzzi , Carmen D’Andrea and Marco Lops, 20 December 2022, IEEE
- [19] Visible Light Communication (VLC) for 6G Technology : The Potency and Research Challenges, Sri Ariyanti Muhammad Suryanegara, October 2, 2020, IEEE
- [20] medium.com/@jainvidip/understanding-support-vector-machines-svms-1f7c78bad934
- [21] <https://builtin.com/data-science/recurrent-neural-networks-and-lstm>