ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Προσομοίωση Συστήματος Integrated Sensing and Communication για Δίκτυα 6G

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Δημήτρη Αδαμόπουλου

Επιβλέπων : Κ. Μαλιάτσος, Επίκουρος Καθηγητής

Μέλη εξεταστικής επιτροπής: Δ. Σκούτας, Ν. Νομικός

Σάμος, Ιούνιος 2026

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πρόλογος και ευχαριστίες

Πρόλογος και ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου για την υπομονή του. Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τη χαρά και την ικανοποίησή μου για την προσωπική μου προσπάθεια.

Αφιερώνω αυτή την εργασία στον εαυτό μου.

.

©2026

του

Δημήτρη Αδαμόπουλου

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πίνακας περιεχομένων

1 Εισαγωγή 1

1.1 Αντικείμενο διπλωματικής 1

1.2 Δομή της διπλωματικής 2

2 Δίκτυα 6G και τεχνολογία ISAC 3

2.1 Δίκτυα 6G: Όραμα, απαιτήσεις και τεχνολογικές κατευθύνσεις 3

2.1.1 Εισαγωγή στα δίκτυα 6G 3

2.1.2 Βασικές απαιτήσεις και δείκτες απόδοσης 4

2.1.3 Βασικά σενάρια χρήσης (Use Cases) 6

2.1.4 Κύριες τεχνολογίες που υποστηρίζουν το 6G 9

2.1.5 Από την επικοινωνία στην αντίληψη: Ο ρόλος του ISAC 9

2.1.6 Προκλήσεις και ανοικτά ερευνητικά ζητήματα 9

2.2 Integrated Sensing and Communication (ISAC) 10

2.2.1 Εισαγωγή στην έννοια του ISAC 10

2.2.2 Κίνητρα και βασικά πλεονεκτήματα του ISAC 11

2.2.3 Βασικές αρχιτεκτονικές ISAC 12

2.2.4 Σχεδίαση κυματομορφών (Waveform Design) 12

2.2.5 Ισοζύγια μεταξύ sensing και communication 13

2.2.6 Μοντελοποίηση καναλιού σε ISAC συστήματα 13

2.2.7 Εφαρμογές του ISAC 14

2.2.8 Από το ISAC στο ISCC 16

2.2.9 Προκλήσεις και ερευνητικές κατευθύνσεις 16

3 Θεωρητικό υπόβαθρο 18

3.1 Ψηφιακές Επικοινωνίες 18

3.1.1 Αντιστοίχιση bits σε σύμβολα (Bit-to-Symbol Mapping) 18

3.1.2 QPSK Διαμόρφωση 19

3.1.3 Διαγράμματα Αστερισμού (Constellation Diagrams) 19

3.1.4 Προσθετικός Λευκός Γκαουσιανός Θόρυβος (AWGN) 19

3.1.5 Λόγος Σήματος προς Θόρυβο (SNR) 19

3.2 Συστήματα OFDM 20

3.2.1 Βασική Αρχή Λειτουργίας 20

3.2.2 Υποφορείς (Subcarriers) 20

3.2.3 Μετασχηματισμοί FFT και IFFT 20

3.2.4 Κυκλικό Πρόθεμα (Cyclic Prefix) *22*
3.2.5 Δομή Πλαισίου OFDM *22*
3.2.6 Πιλοτικοί Υποφορείς και Υποφορείς Δεδομένων *22*
3.2.7 Χρονικά Διαστήματα - Guard Intervals *22*
3.2.8 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί της OFDM *23*
3.3 Μοντελοποίηση Καναλιού (Channel Modeling) 23
3.3.1 Ελεύθερη Διάδοση και Εξασθένηση (Free-Space Propagation) *23*
3.3.2 Πολυδιαδρομική Διάδοση (Multipath Propagation) *23*
3.3.3 Καθυστέρηση Διάδοσης (Propagation Delay) *24*
3.3.4 Δειγματοληψία και Σχέση με την Απόσταση *24*
3.3.5 Φαινόμενο Doppler *25*
3.3.6 Μοντελοποίηση Ανακλάσεων και Στόχων *26*
3.3.7 Γωνιακή Εξάρτηση και Aspect Angle *26*
3.4 Εκτίμηση Καναλιού (Channel Estimation) 27
3.5 Εκτίμηση και Αντιστάθμιση Doppler 28
3.6 Εξισορρόπηση Καναλιού (Equalization) 28
3.7 Κεραίες και Beamforming 29
3.8 Επεξεργασία Σήματος Radar 30
3.8.1 Διάστημα επανάληψης παλμών και Συχνότητα επανάληψης παλμών (Pulse Repetition Interval και Pulse Repetition Frequency) *30*
3.8.2 Fast-Time και Slow-Time *30*
3.8.3 Διπλή Έννοια του Slow-Time *31*
3.8.4 Εκτίμηση Απόστασης (Range Estimation) *31*
3.8.5 Εκτίμηση Ταχύτητας (Doppler Processing) *31*
3.8.6 Εκτίμηση Γωνίας και Beamforming *31*
3.8.7 Ανάλυση (Resolution) *32*
3.8.8 Χάρτες Range-Angle και Range-Velocity *33*
3.8.9 Καταστολή Clutter *33*
3.9 Ενοποίηση Επικοινωνίας και Sensing (ISAC) 33
4 Υλοποίηση και Προσομοίωση Συστήματος ISAC 35
4.1 Παράμετροι Συστήματος και Αρχικοποίηση 35
4.1.1 Ορισμός βασικών παραμέτρων OFDM συστήματος *35*
4.1.2 Καθορισμός Pilot και Data Subcarriers *36*
4.1.3 Δημιουργία Δεδομένων και QPSK Διαμόρφωση *37*
4.1.4 Οργάνωση OFDM Συμβόλων και Χρονικές Παράμετροι *37*
4.2 Δημιουργία OFDM frame και μοντελοποίηση κεραίων 38

4.2.1 Μοντελοποίηση Κεραιών και Διάταξης Λήψης ... *38*
4.2.2 Κατασκευή OFDM Frame και Δημιουργία Κυματομορφής Μετάδοσης ... *40*
4.3 Μοντελοποίηση Καναλιού Επικοινωνίας και Στόχων ... 41
4.3.1 Ορισμός Καναλιού Επικοινωνίας και Παραμέτρων Στόχων ... *41*
4.3.2 Προσομοίωση Καναλιού Επικοινωνίας με Doppler και Ανακλάσεις Στόχων ... *42*
4.4 Αποδιαμόρφωση και Επεξεργασία OFDM Σήματος ... 44
4.4.1 OFDM Αποδιαμόρφωση Λαμβανόμενου Σήματος ... *44*
4.4.2 Εκτίμηση Καναλιού με Pilot Symbols ... *45*
4.4.3 Εκτίμηση Doppler Μετατόπισης ... *46*
4.4.4 Αντιστάθμιση Doppler και Επαναληπτική OFDM Επεξεργασία ... *47*
4.4.5 Εκτίμηση Καναλιού μετά την Αντιστάθμιση Doppler και Ισοστάθμιση ... *48*
4.4.6 Τελική Αποδιαμόρφωση και Ανάκτηση Μηνύματος ... *49*
4.5 Επεξεργασία Radar και Εξαγωγή Πληροφορίας Στόχων ... 49
4.5.1 Λήψη και Δημιουργία Radar Cube για Radar Επεξεργασία ... *49*
4.5.2 Δημιουργία Χάρτη Απόστασης–Γωνίας (Range–Angle Map) ... *51*
4.5.3 Δημιουργία Χάρτη Απόστασης–Ταχύτητας (Range–Velocity) ... *52*
5 Αποτελέσματα και Αξιολόγηση Συστήματος ... 55
5.1 Αποτελέσματα Συστήματος Επικοινωνίας ... 55
5.1.1 Αστερισμός Μεταδιδόμενου QPSK Σήματος ... *55*
5.1.2 Αστερισμός Λαμβανόμενου Σήματος πριν από την Αντιστάθμιση Doppler ... *56*
5.1.3 Αστερισμός πριν από την Ισοστάθμιση Καναλιού ... *58*
5.1.4 Εκτίμηση Doppler από Pilot Symbols ... *59*
5.1.5 Αντιστάθμιση Doppler και Ισοστάθμιση Καναλιού ... *59*
5.1.6 Ανακατασκευή και Ανάκτηση Μηνύματος ... *61*
5.2 Αποτελέσματα Radar Λειτουργίας ... 62
5.2.1 Χάρτης Range–Angle (Range–Angle Map) ... *62*
5.2.2 Χάρτης Range–Velocity (Range–Velocity Map) ... *63*
5.3 Πειραματική Αξιολόγηση και Παραμετρική Ανάλυση ... 65
5.3.1 Επίδραση του SNR στην Ποιότητα Επικοινωνίας ... *65*
5.3.2 Πιθανότητα Ανίχνευσης Radar ως προς Απόσταση και Υλικό Στόχου ... *68*
5.3.3 Επίδραση Αριθμού Κεραιών στη Radar Απόδοση ... *70*
6 Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα ... 72
6.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων ... 72
6.2 Συμπεράσματα ... 73
6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα ... 75
Βιβλιογραφία ... 76

Λίστα Σχημάτων

Εικόνα 1: Η οραματιζόμενη αρχιτεκτονική 6G 5
Εικόνα 2: Σενάρια Χρήσης για το 6G 7
Εικόνα 3: Πλαίσια λειτουργίας ISAC στο 6G 11
Εικόνα 4: Εφαρμογές ISAC 15
Εικόνα 5: παράμετροι OFDM 36
Εικόνα 6: Pilots και data subcarriers 36
Εικόνα 7: Μήνυμα και QPSK 37
Εικόνα 8: OFDM και χρονικές παράμετροι 38
Εικόνα 9: Διάταξη κεραιών 39
Εικόνα 10: Πολικό διάγραμμα αντινοβολίας της κεραίας εκπομπής 39
Εικόνα 11: OFDM Frame 40
Εικόνα 12: Κανάλι και στόχοι 41
Εικόνα 13: Υλοποίηση καναλιού με direct path, ανακλάσεις στόχων και Doppler μετατόπιση 43
Εικόνα 14: OFDM αποδιαμόρφωση και FFT στο λαμβανόμενο σήμα 44
Εικόνα 15: Εκτίμηση καναλιού με pilot symbols 45
Εικόνα 16: Εκτίμηση ολίσθησης Doppler 46
Εικόνα 17: Αντιστάθμιση μετατόπισης Doppler και επαναληπτική OFDM αποδιαμόρφωση 47
Εικόνα 18: Επανεκτίμηση καναλιού μετά την αντιστάθμιση Doppler και διαδικασία ισοστάθμισης OFDM υποφερουσών 48
Εικόνα 19: Τελική αποδιαμόρφωση QPSK και ανακατασκευή του λαμβανόμενου μηνύματος 49
Εικόνα 20: Δημιουργία radar cube και προσομοίωση λήψης radar ανακλάσεων μέσω πολυκεραίακής διάταξης 51
Εικόνα 21: Δημιουργία χάρτη Range - Angle 52
Εικόνα 22: Range-Velocity 54
Εικόνα 23: Αστερισμός μεταδιδόμενου QPSK σήματος πριν από την επίδραση του καναλιού επικοινωνίας 56
Εικόνα 24: Αστερισμός λαμβανόμενου QPSK σήματος πριν από την αντιστάθμιση Doppler 57
Εικόνα 25: Αστερισμός QPSK μετά την OFDM αποδιαμόρφωση και πριν από την ισοστάθμιση καναλιού 58
Εικόνα 26: Εκτίμηση Doppler συχνότητας μέσω της εξέλιξης φάσης των pilot 59
Εικόνα 27: QPSK constellation μετά από Doppler compensation και channel equalization 60
Εικόνα 28: ενδεικτικό απόσπασμα του ανακατασκευασμένου μηνύματος μετά την αποδιαμόρφωση και ισοστάθμιση 61
Εικόνα 29: ενδεικτικό απόσπασμα του ανακατασκευασμένου μηνύματος με γνωστό μήνυμα "hello" 61
Εικόνα 30: Ενδεικτικό Range-Angle map για materials: "wood", "iron". "iron" 62

Εικόνα 31: Ενδεικτικό Range-Angle map για materials: "wood", "wood", "concrete" 63
Εικόνα 32: Ενδεικτικό Range-Velocity map για materials: "wood" , "wood", "concrete" 64
Εικόνα 33: Ενδεικτικό Range-Velocity map για materials: "wood", "iron", "iron" 64
Εικόνα 34: Constellation για SNR = 10dB 66
Εικόνα 35: Constellation για SNR = 0dB 66
Εικόνα 36: Constellation για SNR = 30dB 66
Εικόνα 37: BER vs SNR 67
Εικόνα 38: Doppler estimation error vs SNR 68
Εικόνα 39: Detection probability vs Range 69
Εικόνα 40: Range-Angle με numRx = 2 70
Εικόνα 41: Range-Angle με numRx = 4 70
Εικόνα 42: Range-Angle με numRx = 16 71
Εικόνα 43: Range-Angle με numRx = 8 71

Ακρωνύμια

ISAC	Integrated Sensing and Communications
RIS	Reconfigurable Intelligent Surfaces
MIMO	Multiple Input Multiple Output
SNR	Signal-to-Noise-Ratio
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
KPI	Key Performance Indicator
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
CP	Cyclic Prefix
AoA	Angle of Arrival
PRI	Pulse Repetition Interval
PRF	Pulse Repetition Frequency
ISI	Inter-Symbol Interference
mmWave	Millimeter Wave
IoT	Internet of Things
THz	Terahertz
PCHIP	Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial
XR	Extended Reality
AR	Augmented Reality
VR	Virtual Reality
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
ULA	Uniform Linear Array
RCS	Radar Cross Section
ISCC	Integrated Sensing, Communication and Computation
IoV	Internet of Vehicles
IIoT	Industrial Internet of Things
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
HAP	High Altitude Platform
LEO	Low Earth Orbit
MEO	Medium Earth Orbit
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communications
mMTC	Massive Machine-Type Communications

uMBB	Ubiquitous Mobile Broadband
ULBC	Ultra-Low Bitrate Communication
mULC	Massive Ultra-Reliable Low-Latency Communications
HTC	Human-Type Communications
AWGN	Additive White Gaussian Noise
FFT	Fast Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
ICI	Inter-Carrier Interference
LS	Least Squares

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά την τεχνολογία Ολοκλήρωσης Ανίχνευσης (Ραδιοεπισκόπισης) και Επικοινωνιών - Integrated Sensing and Communication (ISAC) στο πλαίσιο των δικτύων 6G και παρουσιάζει τη μοντελοποίηση και προσομοίωση ενός ISAC συστήματος σε περιβάλλον MATLAB. Βασικός στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας ταυτόχρονης λειτουργίας ασύρματης επικοινωνίας και λειτουργίας ραντάρ μέσω κοινής κυματομορφής Ορθογώνιας Πολυπλεξίας Διαίρεσης Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM) και κοινής χρήσης φασματικών πόρων.

Αναπτύχθηκε μοντέλο προσομοίωσης το οποίο περιλαμβάνει λειτουργίες ψηφιακής επικοινωνίας και radar επεξεργασίας στο ίδιο σύστημα. Το OFDM σήμα χρησιμοποιείται τόσο για τη μετάδοση πληροφορίας όσο και για την ανίχνευση στόχων μέσω των ανακλάσεων που δημιουργούνται από αντικείμενα του περιβάλλοντος. Η αρχιτεκτονική του συστήματος περιλαμβάνει άμεση επικοινωνία μεταξύ πομπού και κινούμενου δέκτη, καθώς και λήψη ανακλώμενων σημάτων από πολλαπλούς στόχους μέσω διάταξης κεραιών λήψης (στοιχειοκεραία - antenna array), επιτρέποντας την εκτίμηση απόστασης, γωνίας και ταχύτητας.

Στο κομμάτι των επικοινωνιών υλοποιήθηκαν τεχνικές OFDM διαμόρφωσης, εκτίμηση καναλιού μέσω πιλότων (pilot-based channel estimation), εκτίμηση Doppler και εξισορρόπηση (equalization), με στόχο την αξιόπιστη ανάκτηση του μεταδιδόμενου μηνύματος. Παράλληλα, στο κομμάτι της ανίχνευσης πραγματοποιήθηκε μορφοποίηση δέσμης ακτινοβολίας (beamforming) και επεξεργασία Doppler για τη δημιουργία χαρτών Απόστασης – Γωνίας (Range–Angle) και Απόστασης – Ταχύτητας (Range–Velocity), επιτρέποντας τον εντοπισμό στόχων στο χώρο.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε πειραματική αξιολόγηση του συστήματος μέσω παραμετρικών αναλύσεων, εξετάζοντας την επίδραση παραμέτρων. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιβεβαιώνουν ότι τα ISAC συστήματα μπορούν να υποστηρίξουν αποτελεσματικά ταυτόχρονες λειτουργίες επικοινωνίας και sensing, αποτελώντας μία ιδιαίτερα υποσχόμενη τεχνολογία για τα μελλοντικά δίκτυα 6G.

Λέξεις Κλειδιά: *ISAC, Δίκτυα 6G, OFDM, Radar Sensing, Doppler, Εκτίμηση Καναλιού, Channel Estimation, Εξομοίωση MATLAB, Radar Processing, Στοιχειοκεραίες.*

Abstract

This thesis studies the technology of Integrated Sensing and Communication (ISAC) in the context of 6G networks and presents the modeling and simulation of an integrated ISAC system in the MATLAB environment. The main objective of this work is to investigate the capability of simultaneously supporting wireless communication and radar sensing through a common OFDM waveform and shared spectral resources.

A simulation model was developed that incorporates both digital communication and radar processing functionalities within the same system. The OFDM signal is utilized both for information transmission and for target detection through reflections generated by objects in the environment. The system architecture includes direct communication between a transmitter and a moving receiver, as well as the reception of reflected signals from multiple targets through a receive antenna array, enabling the estimation of range, angle, and target velocity.

In the communication part, OFDM modulation, pilot-based channel estimation, Doppler estimation, and equalization techniques were implemented in order to achieve reliable recovery of the transmitted message. At the same time, the radar part employs beamforming and Doppler processing techniques for the generation of Range–Angle and Range–Velocity maps, enabling target localization in space.

Furthermore, an experimental evaluation of the system was carried out through parametric analyses, investigating the impact of parameters. The simulation results confirm that ISAC systems can effectively support simultaneous communication and sensing operations, constituting a highly promising technology for future 6G networks.

Keywords: *ISAC, 6G Networks, OFDM, Radar Sensing, Doppler, Channel Estimation, MATLAB Simulation, Radar Processing, Antenna Arrays.*

1 *Εισαγωγή*

1.1 Αντικείμενο διπλωματικής

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μοντελοποίηση και προσομοίωση ενός συστήματος Ολοκλήρωσης Ανίχνευσης (Ραδιοεπισκόπισης) και Επικοινωνιών (Integrated Sensing and Communication - ISAC) σε περιβάλλον MATLAB. Τα ISAC συστήματα αποτελούν μία σύγχρονη τεχνολογία ασύρματων συστημάτων, στην οποία το ίδιο σήμα χρησιμοποιείται ταυτόχρονα τόσο για μετάδοση δεδομένων όσο και για λειτουργίες radar sensing.

Στην εργασία υλοποιείται ένα ISAC σύστημα βασισμένο Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM κυματομορφή, όπου ένας πομπός εκπέμπει ασύρματο σήμα προς έναν κινούμενο δέκτη επικοινωνίας. Το λαμβανόμενο σήμα περιλαμβάνει τόσο την απευθείας μετάδοση (direct path), όσο και ανακλάσεις από αντικείμενα του περιβάλλοντος, που οφείλονται σε φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath propagation).

Παράλληλα, τα ίδια αντικείμενα λειτουργούν και ως radar στόχοι, ανακλώντας το εκπεμπόμενο σήμα προς μια στοιχειοκεραία (antenna array) λήψης. Μέσω της επεξεργασίας των επιστρεφόμενων radar echoes, το σύστημα μπορεί να εκτιμήσει χαρακτηριστικά των στόχων, όπως η απόσταση, η γωνία άφιξης, και η σχετική ταχύτητα κίνησης.

Με τον τρόπο αυτό, η ίδια ασύρματη υποδομή χρησιμοποιείται ταυτόχρονα για λειτουργίες επικοινωνίας και sensing, χωρίς να απαιτούνται ξεχωριστά επικοινωνιακά και radar συστήματα.

Η προσομοίωση περιλαμβάνει πολλαπλούς στόχους με διαφορετικές αποστάσεις, γωνίες, ταχύτητες και υλικά ανακλαστικότητας, επιτρέποντας τη μελέτη της συμπεριφοράς του ISAC συστήματος σε διαφορετικά σενάρια λειτουργίας.

Στόχος της εργασίας είναι η κατανόηση της βασικής αρχιτεκτονικής και λειτουργίας των ISAC συστημάτων, καθώς και η διερεύνηση της δυνατότητας συνύπαρξης επικοινωνίας και radar sensing σε μία κοινή ασύρματη πλατφόρμα επόμενης γενιάς.

1.2 Δομή της διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία οργανώνεται σε έξι κεφάλαια, ακολουθώντας μία σταδιακή πορεία από τη θεωρητική εισαγωγή μέχρι την ανάπτυξη της προσομοίωσης και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δίκτυα 6G και η τεχνολογία Integrated Sensing and Communication (ISAC). Αναλύεται η γενική φιλοσοφία των ISAC συστημάτων, οι βασικές δυνατότητές τους και ο ρόλος τους στα ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για την ανάπτυξη της προσομοίωσης. Εισάγονται οι βασικές έννοιες και οι μαθηματικές σχέσεις πάνω στις οποίες βασίζεται η λειτουργία του συστήματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η μοντελοποίηση και η υλοποίηση του ISAC συστήματος σε περιβάλλον MATLAB. Παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική της προσομοίωσης, η ανάπτυξη του κώδικα και η συνολική λειτουργία του συστήματος επικοινωνίας και sensing.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και πραγματοποιείται αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος σε διαφορετικά σενάρια και παραμέτρους λειτουργίας.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία, καθώς και πιθανές κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και περαιτέρω ανάπτυξη των ISAC συστημάτων.

2 Δίκτυα 6G και τεχνολογία ISAC

2.1 Δίκτυα 6G: Όραμα, απαιτήσεις και τεχνολογικές κατευθύνσεις

2.1.1 Εισαγωγή στα δίκτυα 6G

Η εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών αποτελεί έναν από τους βασικούς πυλώνες της σύγχρονης ψηφιακής κοινωνίας, επηρεάζοντας καθοριστικά τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι, οι συσκευές και τα συστήματα αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Από τα πρώτα αναλογικά δίκτυα πρώτης γενιάς (1G), τα οποία υποστήριζαν αποκλειστικά φωνητική επικοινωνία, μέχρι τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G) που επιτρέπουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και μαζική συνδεσιμότητα, κάθε γενιά εισήγαγε σημαντικές τεχνολογικές καινοτομίες.

Παρά την πρόοδο αυτή, τα σύγχρονα δίκτυα 5G αρχίζουν ήδη να προσεγγίζουν τα όριά τους, ιδιαίτερα σε σενάρια που απαιτούν εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, υπερυψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και αυξημένη ευφυΐα δικτύου. Η συνεχής ανάπτυξη εφαρμογών όπως η εικονική και επαυξημένη πραγματικότητα (VR/AR), τα αυτόνομα οχήματα, οι έξυπνες πόλεις και τα βιομηχανικά συστήματα αυτοματισμού δημιουργεί νέες απαιτήσεις που δεν μπορούν να καλυφθούν πλήρως από τις υπάρχουσες τεχνολογίες.

Σε αυτό το πλαίσιο, τα δίκτυα έκτης γενιάς (6G) αναδύονται ως η επόμενη εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών, εισάγοντας μια νέα φιλοσοφία λειτουργίας. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες γενιές, όπου ο κύριος στόχος ήταν η μετάδοση δεδομένων, τα 6G δίκτυα στοχεύουν στη δημιουργία ενός ενοποιημένου και «έξυπνου» οικοσυστήματος, το οποίο συνδυάζει επικοινωνία, υπολογιστική ισχύ και δυνατότητες αντίληψης του περιβάλλοντος.

Η μετάβαση αυτή οδηγεί στην έννοια των “perceptive networks”, όπου το δίκτυο δεν λειτουργεί απλώς ως μέσο μεταφοράς πληροφορίας, αλλά ως ενεργός παράγοντας που συλλέγει, επεξεργάζεται και αξιοποιεί δεδομένα από το περιβάλλον σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, τα 6G δίκτυα αναμένεται να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της μελλοντικής ψηφιακής κοινωνίας, επιτρέποντας την ανάπτυξη εφαρμογών που σήμερα θεωρούνται είτε πειραματικές είτε μη εφικτές [1], [2], [3].

2.1.2 Βασικές απαιτήσεις και δείκτες απόδοσης

Η υλοποίηση του οράματος των 6G δικτύων συνοδεύεται από ένα σύνολο αυστηρών τεχνικών απαιτήσεων, οι οποίες αποτυπώνονται μέσω συγκεκριμένων δεικτών απόδοσης (Key Performance Indicators, KPIs). Οι δείκτες αυτοί αντικατοπτρίζουν την ανάγκη υποστήριξης εφαρμογών υψηλής πολυπλοκότητας και καθορίζουν τον σχεδιασμό των νέων τεχνολογιών.

Ένας από τους βασικότερους στόχους των 6G δικτύων είναι η επίτευξη εξαιρετικά υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, οι οποίοι εκτιμάται ότι θα φτάσουν έως και το 1 Tbps. Η απαίτηση αυτή προκύπτει από την ανάγκη υποστήριξης εφαρμογών όπως οι ολογραφικές επικοινωνίες και τα εμβυθιστικά (immersive) περιβάλλοντα εικονικής πραγματικότητας, όπου η μετάδοση δεδομένων πρέπει να γίνεται με υψηλή ακρίβεια και χωρίς καθυστερήσεις. Σε τέτοιες εφαρμογές, ακόμη και μικρές απώλειες δεδομένων ή καθυστερήσεις μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά την εμπειρία του χρήστη.

Εξίσου σημαντική είναι η απαίτηση για εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, με στόχο τιμές μικρότερες από 0.1 ms. Η επίτευξη τέτοιων επιπέδων λανθάνουσας καθυστέρησης (latency) είναι κρίσιμη για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως η απομακρυσμένη χειρουργική, τα αυτόνομα οχήματα και τα βιομηχανικά συστήματα ελέγχου. Σε αυτά τα σενάρια, η ταχύτητα απόκρισης του δικτύου μπορεί να επηρεάσει άμεσα την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα των λειτουργιών.

Παράλληλα, η συνεχής αύξηση του αριθμού των συνδεδεμένων συσκευών οδηγεί στην ανάγκη υποστήριξης εξαιρετικά υψηλής πυκνότητας χρηστών, η οποία εκτιμάται ότι θα φτάσει έως και 10^7 συσκευές ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο. Η τάση αυτή σχετίζεται με την εξάπλωση του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT), όπου αισθητήρες, έξυπνες συσκευές και αυτόνομα συστήματα επικοινωνούν διαρκώς μεταξύ τους.

Η αξιοπιστία των επικοινωνιών αποτελεί επίσης κρίσιμο παράγοντα, ιδιαίτερα για εφαρμογές που χαρακτηρίζονται ως mission-critical. Τα 6G δίκτυα στοχεύουν σε επίπεδα αξιοπιστίας που προσεγγίζουν το 99.99999%, εξασφαλίζοντας σχεδόν αδιάλειπτη λειτουργία ακόμη και σε απαιτητικά περιβάλλοντα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές όπως τα αυτόνομα συστήματα μεταφοράς και οι έξυπνες ενεργειακές υποδομές.

Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η ενεργειακή αποδοτικότητα. Τα 6G δίκτυα αναμένεται να είναι έως και 100 φορές πιο αποδοτικά ενεργειακά σε σύγκριση με τα δίκτυα 5G. Η απαίτηση αυτή προκύπτει τόσο από την ανάγκη μείωσης του λειτουργικού κόστους όσο και από περιβαλλοντικούς παράγοντες, καθώς η κατανάλωση ενέργειας των δικτύων επικοινωνιών αυξάνεται συνεχώς.

Επίσης, ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην παροχή τρισδιάστατης κάλυψης, μέσω της ενσωμάτωσης επίγειων, εναέριων και δορυφορικών συστημάτων σε ένα ενιαίο και ετερογενές δίκτυο. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά κυψελωτά δίκτυα, τα οποία βασίζονται κυρίως σε επίγειους σταθμούς βάσης, τα δίκτυα 6G υιοθετούν μια πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική (multi-layer architecture), όπου συνυπάρχουν διαφορετικά επίπεδα υποδομών.

Στο χαμηλότερο επίπεδο, τα επίγεια δίκτυα συνεχίζουν να παρέχουν υψηλής χωρητικότητας επικοινωνία σε αστικές και πυκνοκατοικημένες περιοχές, αξιοποιώντας τεχνολογίες όπως τα πυκνά δίκτυα μικροκυψελών (dense small cells) και τα συστήματα (cell-free) χωρίς κυψελοποίηση. Πάνω από αυτά, εναέρια μέσα, όπως μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAVs) και high-altitude platforms

(HAPs), λειτουργούν ως ευέλικτοι κόμβοι επικοινωνίας, επεκτείνοντας την κάλυψη σε περιοχές με περιορισμένη υποδομή ή σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Σε ακόμη υψηλότερο επίπεδο, δορυφορικά συστήματα χαμηλής και μέσης τροχιάς (LEO/MEO satellites) εξασφαλίζουν παγκόσμια κάλυψη, επιτρέποντας τη συνδεσιμότητα σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές, όπως ωκεανοί, ορεινές περιοχές και αγροτικά περιβάλλοντα.

Η ενοποίηση αυτών των ετερογενών επιπέδων οδηγεί στη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου δικτύου “space–air–ground–sea”, το οποίο υποστηρίζει αδιάκοπτη συνδεσιμότητα ανεξαρτήτως γεωγραφικής θέσης. Παράλληλα, η αρχιτεκτονική αυτή επιτρέπει τη δυναμική προσαρμογή των πόρων του δικτύου, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής, υποστηρίζοντας σενάρια όπως μαζική συνδεσιμότητα IoT, αυτόνομα συστήματα, απομακρυσμένη παρακολούθηση και επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο.

Επιπλέον, η πολυεπίπεδη αυτή προσέγγιση συνδυάζεται με τεχνολογίες, όπως η τεχνητή νοημοσύνη για τη διαχείριση του δικτύου, οι Αναδιαμορφώσιμες Ευφυείς Επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces – RISs) για τον έλεγχο του καναλιού και οι τεχνικές ISAC για την ταυτόχρονη επικοινωνία και ανίχνευση. Με τον τρόπο αυτό, τα 6G δίκτυα δεν περιορίζονται στην παροχή συνδεσιμότητας, αλλά εξελίσσονται σε ένα ευφυές και προσαρμοστικό οικοσύστημα που υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. [1], [2]

\

Εικόνα 1: Η οραματιζόμενη αρχιτεκτονική 6G

2.1.3 Βασικά σενάρια χρήσης (Use Cases)

Τα δίκτυα 6G δεν σχεδιάζονται μόνο με βάση τεχνικές προδιαγραφές, αλλά και με γνώμονα τις εφαρμογές που καλούνται να υποστηρίξουν. Τα νέα σενάρια χρήσης που αναδύονται απαιτούν συνδυασμό υψηλής απόδοσης, χαμηλής καθυστέρησης και αυξημένης ευφυΐας δικτύου.

Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η εμβυθιστική επικοινωνία (immersive communication), η οποία περιλαμβάνει εφαρμογές όπως οι ολογραφικές κλήσεις, η εικονική και επαυξημένη πραγματικότητα και η έννοια της ψηφιακής παρουσίας (digital presence). Σε τέτοια περιβάλλοντα, οι χρήστες μπορούν να αλληλεπιδρούν σε έναν ψηφιακό χώρο σαν να βρίσκονται φυσικά στον ίδιο χώρο, γεγονός που απαιτεί εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και σχεδόν μηδενική καθυστέρηση.

Ένα δεύτερο σημαντικό πεδίο εφαρμογών αφορά τα αυτόνομα συστήματα και τα οχήματα. Η ασφαλής και αποδοτική λειτουργία τους βασίζεται στην ικανότητα ανταλλαγής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μεταξύ οχημάτων, υποδομών και αισθητήρων. Αυτό απαιτεί όχι μόνο αξιόπιστη επικοινωνία, αλλά και δυνατότητες αντίληψης του περιβάλλοντος, οι οποίες επιτρέπουν την ανίχνευση εμποδίων και την πρόβλεψη κινήσεων.

Στον τομέα της βιομηχανίας, τα 6G δίκτυα αναμένεται να υποστηρίξουν την εξέλιξη προς τη Βιομηχανία 4.0 και 5.0, όπου τα εργοστάσια λειτουργούν με υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης και διασύνδεσης. Οι εφαρμογές αυτές απαιτούν έλεγχο σε πραγματικό χρόνο (real-time), αξιόπιστη επικοινωνία και δυνατότητες υπολογιστικής στα άκρα (edge computing) για την επεξεργασία δεδομένων κοντά στην πηγή.

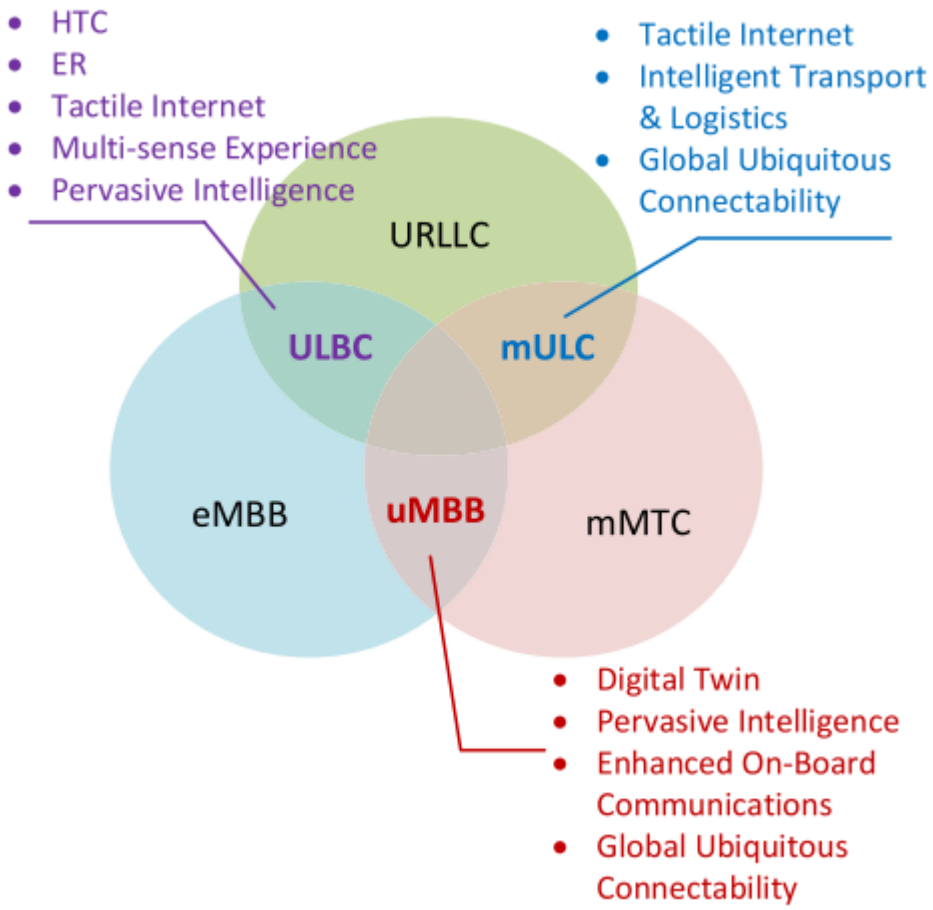
Επίσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η έννοια των ψηφιακών διδύμων (digital twins), όπου φυσικά συστήματα αναπαρίστανται σε ψηφιακό περιβάλλον και ενημερώνονται συνεχώς μέσω δεδομένων από αισθητήρες. Η υλοποίηση τέτοιων συστημάτων απαιτεί συνεχή και αξιόπιστη ροή δεδομένων, υψηλή ακρίβεια εντοπισμού και δυνατότητες επεξεργασίας σε πραγματικό χρόνο, καθιστώντας τα 6G δίκτυα απαραίτητο υποστηρικτικό παράγοντα.

Σε αντίθεση με τα δίκτυα 5G, τα οποία βασίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες υπηρεσιών (eMBB, URLLC και mMTC), τα δίκτυα 6G επεκτείνουν το μοντέλο αυτό εισάγοντας νέες, ενισχυμένες κατηγορίες χρήσης που ανταποκρίνονται σε πιο απαιτητικά και πολύπλοκα σενάρια. Συγκεκριμένα, η έννοια του ultra-Massive Broadband (uMBB) αναφέρεται σε εφαρμογές που απαιτούν εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και χωρητικότητα, όπως τα ψηφιακά δίδυμα υψηλής πιστότητας και τα πλήρως εμβυθιστικά περιβάλλοντα.

Παράλληλα, η έννοια της επικοινωνίας εξαιρετικά μικρής καθυστέρησης και υπερυψηλής αξιοπιστίας (Ultra Reliable Low Latency Communications - URLLC) επεκτείνει τις δυνατότητες των συστημάτων χαμηλής καθυστέρησης, υποστηρίζοντας εφαρμογές όπου η απόκριση σε πραγματικό χρόνο είναι κρίσιμη, όπως η αλληλεπίδραση με ψηφιακά δίδυμα σε βιομηχανικά ή ιατρικά περιβάλλοντα. Τέλος, το massive Ultra-Reliable Low-Cost Communications (mULC) επικεντρώνεται στη μαζική συνδεσιμότητα με υψηλή αξιοπιστία και χαμηλό κόστος, επιτρέποντας την υποστήριξη μεγάλου αριθμού αισθητήρων και συσκευών που τροφοδοτούν συνεχώς τα ψηφιακά μοντέλα με δεδομένα.

Η συνδυασμένη υποστήριξη αυτών των νέων κατηγοριών υπηρεσιών επιτρέπει την υλοποίηση προηγμένων εφαρμογών, όπως τα δυναμικά και σε πραγματικό χρόνο ενημερωμένα ψηφιακά δίδυμα,

τα οποία απαιτούν ταυτόχρονα υψηλή χωρητικότητα, ελάχιστη καθυστέρηση και αξιόπιστη συνδεσιμότητα. Με τον τρόπο αυτό, τα 6G δίκτυα δημιουργούν το απαραίτητο υπόβαθρο για τη σύγκλιση φυσικού και ψηφιακού κόσμου, υποστηρίζοντας εφαρμογές που μέχρι σήμερα θεωρούνταν ιδιαίτερα δύσκολες ή μη εφικτές [1], [3].



Εικόνα 2: Σενάρια Χρήσης για το 6G

- **Holographic-Type Communication (HTC):**

  Αναφέρεται σε προηγμένες μορφές επικοινωνίας που υποστηρίζουν μετάδοση τρισδιάστατων ολογραφικών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, απαιτώντας εξαιρετικά υψηλό ρυθμό μετάδοσης και πολύ χαμηλή καθυστέρηση. Οι εφαρμογές αυτές βασίζονται σε τεράστιους όγκους δεδομένων και αυστηρό συγχρονισμό, ώστε να επιτρέπεται η ρεαλιστική αναπαράσταση ανθρώπων ή αντικειμένων σε απομακρυσμένες τοποθεσίες.

- **Extended Reality (XR):**

  Περιλαμβάνει τεχνολογίες όπως εικονική (VR), επαυξημένη (AR) και μικτή πραγματικότητα (MR), όπου ο χρήστης αλληλοεπιδρά με ψηφιακά και φυσικά στοιχεία σε ένα ενιαίο περιβάλλον. Οι εφαρμογές XR απαιτούν υψηλό ρυθμό μετάδοσης και πολύ χαμηλή

καθυστέρηση, ώστε να εξασφαλίζεται ομαλή και ρεαλιστική εμπειρία χωρίς καθυστερήσεις ή ασυγχρονίες.

- **Tactile Internet:**

  Επιτρέπει τη μετάδοση απτικής πληροφορίας (touch/feedback) με εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, υποστηρίζοντας εφαρμογές όπως απομακρυσμένος έλεγχος, ρομποτική και τηλεχειρουργική. Η βασική πρόκληση είναι η επίτευξη σχεδόν άμεσης απόκρισης, ώστε ο χρήστης να αισθάνεται ότι αλληλεπιδρά φυσικά με το απομακρυσμένο περιβάλλον.

- **Multi-sense Experience:**

  Αναφέρεται σε εμπειρίες που συνδυάζουν πολλαπλές αισθήσεις, όπως όραση, ήχο και αφή, δημιουργώντας ένα πλήρως εμβυθιστικό περιβάλλον. Η υλοποίηση τέτοιων εφαρμογών απαιτεί συγχρονισμένη και αξιόπιστη μετάδοση ετερογενών δεδομένων, ώστε να διατηρείται η συνοχή μεταξύ των διαφορετικών αισθητηριακών ερεθισμάτων.

- **Pervasive Intelligence:**

  Περιγράφει την ευρεία ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης τόσο στο δίκτυο όσο και στις τελικές συσκευές, επιτρέποντας αυτοματοποιημένη λήψη αποφάσεων και προσαρμοστική λειτουργία. Η έννοια αυτή σχετίζεται με τη δυνατότητα του δικτύου να μαθαίνει από τα δεδομένα, να προβλέπει καταστάσεις και να βελτιστοποιεί τη λειτουργία του σε πραγματικό χρόνο.

- **Intelligent Transport and Logistics:**

  Αναφέρεται σε έξυπνα συστήματα μεταφορών και εφοδιαστικής αλυσίδας, όπου οχήματα, αισθητήρες και υποδομές συνεργάζονται για τη βελτιστοποίηση της κυκλοφορίας και της διανομής αγαθών. Η συνεχής ανταλλαγή δεδομένων και η δυνατότητα ανίχνευσης του περιβάλλοντος συμβάλλουν στη μείωση καθυστερήσεων, κόστους και ατυχημάτων.

- **Global Ubiquitous Connectivity:**

  Περιγράφει την παροχή συνεχούς και αξιόπιστης συνδεσιμότητας παντού, ανεξαρτήτως γεωγραφικής θέσης, μέσω της ενοποίησης επίγειων, εναέριων και δορυφορικών δικτύων. Η έννοια αυτή είναι θεμελιώδης για τα 6G, καθώς επιτρέπει την υποστήριξη εφαρμογών σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές.

- **Enhanced On-board Communications:**

  Αναφέρεται σε προηγμένες δυνατότητες επικοινωνίας εντός οχημάτων ή άλλων κινητών πλατφορμών, υποστηρίζοντας εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων σε δεδομένα και αξιοπιστία. Περιλαμβάνει τόσο την εσωτερική επικοινωνία μεταξύ συστημάτων του οχήματος όσο και τη

διασύνδεση με εξωτερικά δίκτυα, συμβάλλοντας στη βελτίωση της ασφάλειας και της εμπειρίας χρήστη.

2.1.4 Κύριες τεχνολογίες που υποστηρίζουν το 6G

Για την επίτευξη των παραπάνω απαιτήσεων, έχουν προταθεί διάφορες καινοτόμες τεχνικές και τεχνολογίες, οι οποίες αποτελούν τη βάση των 6G δικτύων ώστε να μπορούν να παρέχουν τις απαιτούμενες υπηρεσίες.

Η χρήση υψηλών συχνοτήτων, όπως τα mmWave και τα THz, επιτρέπει την εκμετάλλευση μεγάλου εύρους ζώνης, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση των ρυθμών μετάδοσης. Ωστόσο, οι συχνότητες αυτές χαρακτηρίζονται από υψηλή εξασθένηση και ευαισθησία σε εμπόδια, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την ανάπτυξη προηγμένων τεχνικών διαμόρφωσης δέσμης.

Η τεχνολογία Massive MIMO αποτελεί επίσης βασικό στοιχείο των 6G δικτύων, επιτρέποντας τη χρήση μεγάλου αριθμού κεραιών για τη βελτίωση της χωρητικότητας και της αξιοπιστίας. Η εξέλιξή της οδηγεί σε πιο προηγμένες αρχιτεκτονικές, όπως τα cell-free δίκτυα, όπου πολλαπλά σημεία πρόσβασης συνεργάζονται για την εξυπηρέτηση των χρηστών.

Η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης στο δίκτυο επιτρέπει την αυτοματοποιημένη διαχείριση πόρων, την πρόβλεψη κίνησης και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, τεχνολογίες όπως οι Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) επιτρέπουν τον δυναμικό έλεγχο του περιβάλλοντος διάδοσης του σήματος.

Ιδιαίτερη σημασία έχει και η τεχνολογία ISAC, η οποία συνδυάζει τις λειτουργίες επικοινωνίας και ανίχνευσης σε ένα ενιαίο σύστημα, ανοίγοντας τον δρόμο για νέες εφαρμογές και αυξημένη αποδοτικότητα. [1], [2], [3].

2.1.5 Από την επικοινωνία στην αντίληψη: Ο ρόλος του ISAC

Ένα από τα πιο καινοτόμα χαρακτηριστικά των 6G δικτύων είναι η μετάβαση από τα παραδοσιακά δίκτυα επικοινωνίας σε δίκτυα που διαθέτουν δυνατότητες αντίληψης του περιβάλλοντος. Η εξέλιξη αυτή αντικατοπτρίζει την ανάγκη για συστήματα που δεν περιορίζονται στη μεταφορά δεδομένων, αλλά μπορούν να κατανοούν και να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον τους.

Η τεχνολογία ISAC είναι ακριβώς αυτό, επιτρέποντας την ταυτόχρονη εκτέλεση λειτουργιών επικοινωνίας και sensing. Μέσω αυτής της προσέγγισης, το δίκτυο μπορεί να εντοπίζει αντικείμενα, παρακολουθεί κινήσεις και να υποστηρίζει διαδικασίες λήψης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο [4].

2.1.6 Προκλήσεις και ανοικτά ερευνητικά ζητήματα

Παρά τις σημαντικές δυνατότητες που προσφέρουν τα 6G δίκτυα, η υλοποίησή τους συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις. Η αυξημένη πολυπλοκότητα των συστημάτων απαιτεί νέες προσεγγίσεις στον σχεδιασμό και τη διαχείριση των δικτύων. Οι υψηλές απαιτήσεις συγχρονισμού και επεξεργασίας δεδομένων δημιουργούν και άλλες δυσκολίες.

Επιπλέον, η ανάγκη για νέα μοντέλα καναλιού, ιδιαίτερα σε υψηλές συχνότητες, καθώς και ζητήματα που σχετίζονται με την ενεργειακή κατανάλωση και την ασφάλεια των δεδομένων, αποτελούν βασικά ερευνητικά πεδία. Η ενοποίηση πολλαπλών λειτουργιών, όπως η επικοινωνία, το sensing και η υπολογιστική επεξεργασία, δημιουργεί νέα ισοζύγια (trade-offs) που πρέπει να μελετηθούν [1], [2], [4].

2.2 Integrated Sensing and Communication (ISAC)

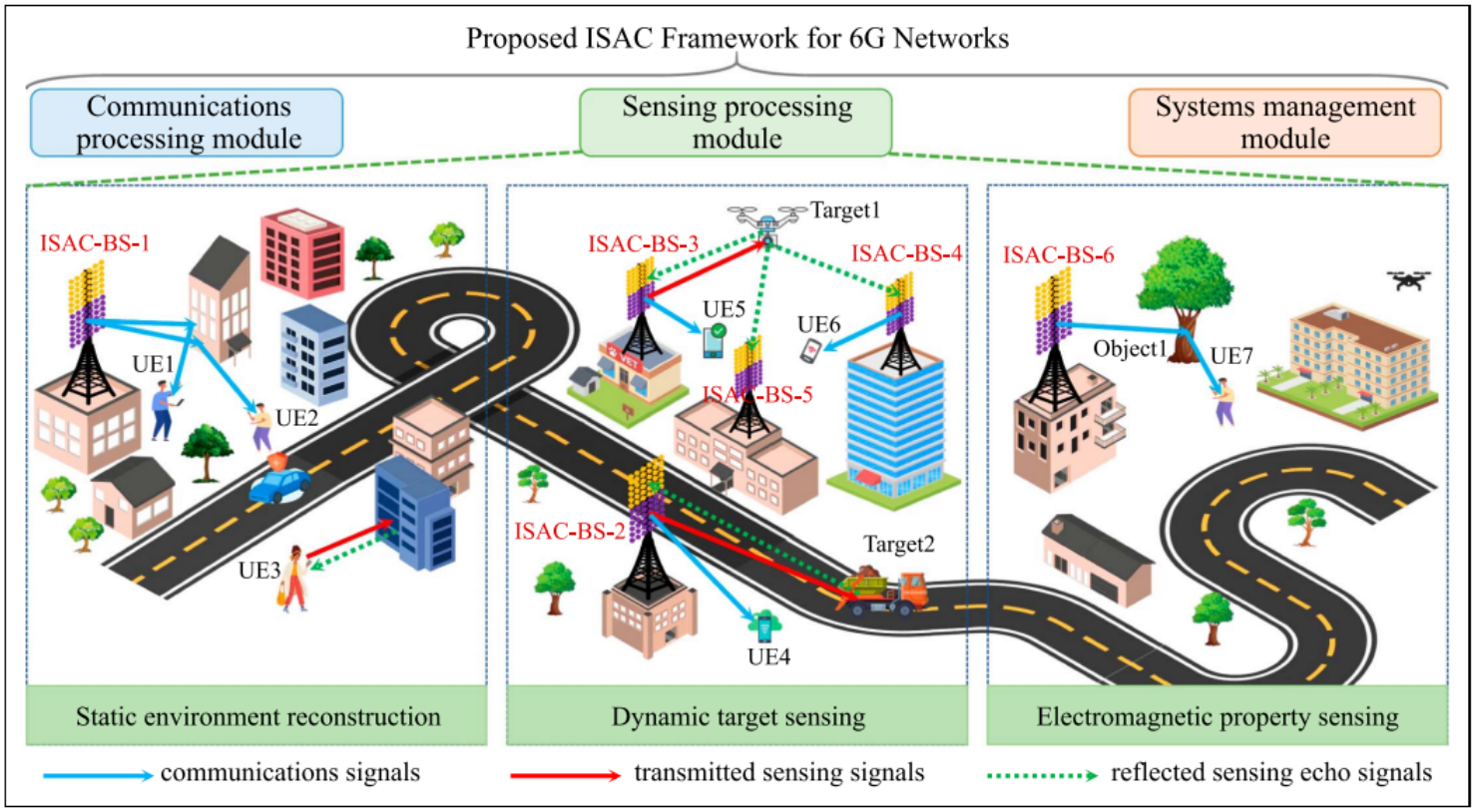
2.2.1 Εισαγωγή στην έννοια του ISAC

Τα παραδοσιακά ασύρματα συστήματα έχουν σχεδιαστεί ιστορικά με σαφή διαχωρισμό μεταξύ των λειτουργιών επικοινωνίας και ανίχνευσης (sensing). Από τη μία πλευρά, τα συστήματα επικοινωνίας στοχεύουν στη μετάδοση πληροφορίας μεταξύ χρηστών ή συσκευών, με κύρια κριτήρια απόδοσης τον ρυθμό μετάδοσης, την αξιοπιστία και την καθυστέρηση. Από την άλλη πλευρά, τα συστήματα sensing, όπως τα ραντάρ, έχουν ως βασικό σκοπό την ανίχνευση, τον εντοπισμό και την παρακολούθηση αντικειμένων στο φυσικό περιβάλλον.

Η ανεξάρτητη ανάπτυξη αυτών των δύο κατηγοριών συστημάτων οδήγησε σε λύσεις που, αν και βελτιστοποιημένες για τον εκάστοτε σκοπό τους, παρουσιάζουν σημαντικούς περιορισμούς σε επίπεδο συνολικής αποδοτικότητας (να δουλεύουν μαζί). Συγκεκριμένα, η χρήση διαφορετικών φασματικών πόρων, η ανάγκη για ξεχωριστό υλικό (hardware) και η έλλειψη συνεργασίας μεταξύ των δύο λειτουργιών οδηγούν σε αυξημένο κόστος, μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας και μη βέλτιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος.

Με στόχο την λύση αυτού του προβλήματος, εισάγεται η έννοια του ISAC, η οποία προτείνει την ενοποίηση των δύο λειτουργιών σε ένα ενιαίο σύστημα. Στα ISAC συστήματα, η επικοινωνία και το sensing πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας κοινό φάσμα, κοινές υποδομές και, σε πολλές περιπτώσεις, κοινές κυματομορφές. Η προσέγγιση αυτή δεν είναι απλώς μια τεχνολογική βελτίωση, είναι μια θεμελιώδη αλλαγή στον τρόπο σχεδιασμού των ασύρματων δικτύων.

Στο πλαίσιο των δικτύων 6G, το ISAC σχετίζεται με την υλοποίηση των λεγόμενων «αντιληπτικών δικτύων» (perceptive networks), όπου το δίκτυο αποκτά τη δυνατότητα να αντιλαμβάνεται το περιβάλλον του και να προσαρμόζει τη λειτουργία του σε πραγματικό χρόνο. Η ενοποίηση αυτή επιτρέπει τη βελτίωση της απόδοσης και την ανάπτυξη νέων εφαρμογών που απαιτούν ταυτόχρονα επικοινωνία και επίγνωση του περιβάλλοντος [4], [5].



Εικόνα 3: Πλαίσια λειτουργίας ISAC στο 6G

2.2.2 Κίνητρα και βασικά πλεονεκτήματα του ISAC

Η μετάβαση προς τα ISAC συστήματα καθοδηγείται από μια σειρά τεχνολογικών και πρακτικών αναγκών, οι οποίες σχετίζονται με την αυξανόμενη πολυπλοκότητα των εφαρμογών και τους περιορισμούς των διαθέσιμων πόρων.

Ένα από τα σημαντικότερα κίνητρα είναι η αποδοτική χρήση του φάσματος. Το ραδιοφάσμα είναι ένας περιορισμένος πόρος, πλέον και στις υψηλές συχνότητες όπου η ζήτηση αυξάνεται συνεχώς. Στα παραδοσιακά συστήματα, οι λειτουργίες επικοινωνίας και sensing καταλαμβάνουν ξεχωριστές ζώνες συχνοτήτων, αυτό οδηγεί σε κατακερματισμό και μη αποτελεσματική αξιοποίηση του φάσματος. Αντίθετα, στα ISAC συστήματα, η χρήση κοινών φασματικών πόρων επιτρέπει τη συνδυασμένη εκτέλεση των δύο λειτουργιών, μειώνοντας τη συνολική κατανάλωση φάσματος.

Παράλληλα, η ενοποίηση των λειτουργιών οδηγεί σε σημαντική μείωση του κόστους και της πολυπλοκότητας του συστήματος. Η χρήση κοινών υποδομών και εξοπλισμού περιορίζει την ανάγκη για πολλαπλά συστήματα και μειώνει και την κατανάλωση ενέργειας. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπως τα δίκτυα έξυπνων πόλεων ή τα βιομηχανικά συστήματα, όπου το κόστος ανάπτυξης και λειτουργίας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα.

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα ανάπτυξης νέων εφαρμογών που βασίζονται στη συνδυασμένη χρήση επικοινωνίας και sensing. Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα αυτόνομων οχημάτων, η δυνατότητα ταυτόχρονης ανταλλαγής δεδομένων και ανίχνευσης του περιβάλλοντος επιτρέπει τη λήψη πιο ακριβών και έγκαιρων αποφάσεων. Επιπλέον, η ενσωμάτωση

πληροφοριών sensing μπορεί να βελτιώσει την απόδοση της επικοινωνίας, παρέχοντας καλύτερη γνώση του καναλιού και των συνθηκών διάδοσης.

Τέλος, ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό των ISAC συστημάτων είναι η αμοιβαία ενίσχυση των δύο λειτουργιών. Η πληροφορία που συλλέγεται μέσω sensing μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της επικοινωνίας, ενώ τα δεδομένα επικοινωνίας μπορούν να υποστηρίξουν την ανάλυση και την επεξεργασία των sensing δεδομένων. Η συνέργεια αυτή δημιουργεί ένα πιο αποδοτικό και ευέλικτο σύστημα, ικανό να προσαρμόζεται δυναμικά στις απαιτήσεις του περιβάλλοντος [4].

2.2.3 Βασικές αρχιτεκτονικές ISAC

Η υλοποίηση των ISAC συστημάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί με διαφορετικά επίπεδα ενοποίησης μεταξύ των λειτουργιών επικοινωνίας και sensing. Οι αρχιτεκτονικές αυτές διαφέρουν ως προς την πολυπλοκότητα, την απόδοση και τις απαιτήσεις υλοποίησης.

Στην πιο απλή μορφή, γνωστή ως συνύπαρξη (co-existence), τα δύο συστήματα λειτουργούν ανεξάρτητα, μοιράζοντας απλώς το ίδιο φάσμα ή το ίδιο περιβάλλον λειτουργίας. Σε αυτή την περίπτωση, δεν υπάρχει ουσιαστική συνεργασία μεταξύ των λειτουργιών και αυτό περιορίζει τα πιθανά οφέλη της ενοποίησης. Η προσέγγιση αυτή είναι εύκολη στην υλοποίηση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μεταβατικό στάδιο προς πιο ολοκληρωμένες λύσεις.

Ένα πιο προχωρημένο επίπεδο είναι η συνεργασία (cooperation), όπου υπάρχει ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των συστημάτων επικοινωνίας και sensing. Για παράδειγμα, δεδομένα που προκύπτουν από sensing μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της εκτίμησης καναλιού, ενώ πληροφορίες επικοινωνίας μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της ακρίβειας ανίχνευσης. Η προσέγγιση αυτή επιτυγχάνει καλύτερη απόδοση, αλλά εξακολουθεί να διατηρεί έναν βαθμό διαχωρισμού μεταξύ των λειτουργιών.

Η πιο εξελιγμένη μορφή είναι η πλήρης ενοποίηση (full integration), όπου οι δύο λειτουργίες σχεδιάζονται από κοινού και υλοποιούνται χρησιμοποιώντας κοινές κυματομορφές, κοινό hardware και ενιαία επεξεργασία σήματος. Σε αυτή την περίπτωση, το σύστημα αντιμετωπίζεται ως ένα ενιαίο σύνολο, με στόχο τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ επικοινωνίας και sensing. Η προσέγγιση αυτή θεωρείται η πιο υποσχόμενη για τα δίκτυα 6G, αν και συνοδεύεται από αυξημένη πολυπλοκότητα σχεδιασμού [4].

2.2.4 Σχεδίαση κυματομορφών (Waveform Design)

Η σχεδίαση των κυματομορφών αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα ζητήματα στα ISAC συστήματα, διότι το ίδιο σήμα καλείται να εξυπηρετήσει ταυτόχρονα δύο διαφορετικούς στόχους: την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων και την ακριβή ανίχνευση του περιβάλλοντος.

Μία προσέγγιση είναι ο σχεδιασμός επικεντρωμένος στην επικοινωνία (communication-centric design), δηλαδή οι κυματομορφές βελτιστοποιούνται πρωτίστως για υψηλό ρυθμό μετάδοσης και χαμηλό σφάλμα, ενώ οι δυνατότητες sensing προκύπτουν ως δευτερεύον χαρακτηριστικό. Αν και αυτή

η προσέγγιση διατηρεί υψηλή ποιότητα επικοινωνίας, η ακρίβεια του sensing μπορεί να είναι περιορισμένη.

Αντίθετα, στον σχεδιασμό επικεντρωμένο στο sensing (sensing-centric design), το σήμα βελτιστοποιείται για την ανίχνευση και τον εντοπισμό στόχων, όπως συμβαίνει στα παραδοσιακά ραντάρ. Σε αυτή την περίπτωση, η απόδοση της επικοινωνίας ενδέχεται να υποβαθμιστεί, καθώς το σήμα δεν είναι σχεδιασμένο για μεταφορά δεδομένων με υψηλή αποδοτικότητα.

Η πιο σύγχρονη και αποτελεσματική προσέγγιση είναι ο κοινός σχεδιασμός (joint design), όπου επιδιώκεται η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση και των δύο λειτουργιών. Μέσω τεχνικών βελτιστοποίησης, το σύστημα επιτυγχάνει έναν συμβιβασμό μεταξύ ρυθμού μετάδοσης και ακρίβειας sensing, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα απαιτητική υπολογιστικά, αλλά είναι η καλύτερη [7].

2.2.5 Ισοζύγια μεταξύ sensing και communication

Η ενοποίηση των λειτουργιών επικοινωνίας και sensing συνεπάγεται την ύπαρξη αναπόφευκτων συμβιβασμών που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό των ISAC συστημάτων.

Ένας από τους βασικούς συμβιβασμούς αφορά τη σχέση μεταξύ ρυθμού μετάδοσης και ακρίβειας ανίχνευσης. Η αύξηση του ρυθμού επικοινωνίας συχνά απαιτεί τη χρήση πιο σύνθετων σχημάτων διαμόρφωσης που μπορεί να μειώσουν την ακρίβεια του sensing. Αντίστοιχα, η βελτιστοποίηση για sensing μπορεί να περιορίσει την αποδοτικότητα της επικοινωνίας.

Ένας δεύτερος σημαντικός παράγοντας είναι η κατανομή της ισχύος. Το διαθέσιμο ενεργειακό budget πρέπει να κατανεμηθεί μεταξύ των δύο λειτουργιών, με τρόπο που να εξασφαλίζει την ικανοποίηση των απαιτήσεων της εφαρμογής. Η σωστή κατανομή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το περιβάλλον διάδοσης και η κινητικότητα των χρηστών.

Τέλος, η κατανομή του εύρους ζώνης είναι επίσης ζήτημα. Το φάσμα μπορεί να μοιραστεί μεταξύ των δύο λειτουργιών είτε στατικά είτε δυναμικά, ανάλογα με τις ανάγκες του συστήματος. Η επιλογή της κατάλληλης στρατηγικής επηρεάζει την απόδοση [4], [7].

2.2.6 Μοντελοποίηση καναλιού σε ISAC συστήματα

Η μοντελοποίηση του καναλιού στα ISAC συστήματα είναι πολύ πιο σύνθετη σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα επικοινωνίας, καθώς πρέπει να λαμβάνει υπόψη τόσο τη μετάδοση σημάτων όσο και την αλληλεπίδρασή τους με το περιβάλλον.

Εκτός από τους κλασικούς παράγοντες, όπως ο θόρυβος και η εξασθένηση, τα ISAC μοντέλα πρέπει να περιλαμβάνουν στοιχεία όπως οι στόχοι (targets), οι ανεπιθύμητες ανακλάσεις (clutter) και οι πολλαπλές διαδρομές διάδοσης. Πρέπει να γίνει σωστή μοντελοποίηση αυτών των φαινομένων ώστε να έχουμε υψηλή ακρίβεια στο sensing.

Η πρόκληση γίνεται ακόμη μεγαλύτερη σε περιβάλλοντα υψηλών συχνοτήτων, όπως τα mmWave και τα THz, εκεί τα φαινόμενα διάδοσης είναι πιο έντονα και απρόβλεπτα. Για τον λόγο αυτό, χρειάζονται νέα μοντέλα καναλιού που συνδυάζουν χαρακτηριστικά επικοινωνίας και radar.

Η πολυπλοκότητα της μοντελοποίησης στα ISAC συστήματα σχετίζεται επίσης με το είδος της πληροφορίας που επιδιώκεται να εξαχθεί από το περιβάλλον. Οι λειτουργίες sensing μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε διαφορετικές κατηγορίες, ανάλογα με τον τύπο των στόχων και των φυσικών χαρακτηριστικών που ανιχνεύονται.

Μία κατηγορία είναι η ανακατασκευή στατικού περιβάλλοντος (static environment reconstruction), όπου το σύστημα επιδιώκει να δημιουργήσει μια αναπαράσταση του χώρου, συμπεριλαμβάνοντας στοιχεία όπως τοίχους, κτίρια και άλλα σταθερά εμπόδια. Η πληροφορία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για εφαρμογές χαρτογράφησης και πλοήγησης, καθώς και για τη βελτίωση της εκτίμησης του καναλιού.

Μια δεύτερη κατηγορία αφορά την ανίχνευση δυναμικών στόχων (dynamic target sensing), η οποία επικεντρώνεται στην αναγνώριση και παρακολούθηση κινούμενων αντικειμένων, όπως οχήματα ή άνθρωποι. Η δυνατότητα αυτή είναι κρίσιμη για εφαρμογές όπως τα αυτόνομα οχήματα και τα έξυπνα συστήματα μεταφορών.

Τέλος, το μεγαλύτερο ενδιαφέρον το έχει η ανίχνευση ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων (electromagnetic property sensing), όπου το σύστημα εκτιμά χαρακτηριστικά των υλικών, όπως η ανακλαστικότητα ή η απορρόφηση του σήματος. Η πληροφορία αυτή χρησιμεύει αν θέλουμε να κάνουμε αναγνώριση υλικών και ανάλυση περιβάλλοντος [6].

2.2.7 Εφαρμογές του ISAC

Οι δυνατότητες των ISAC συστημάτων ανοίγουν τον δρόμο για νέες εφαρμογές, καλύπτοντας τόσο παραδοσιακούς τομείς των ασύρματων επικοινωνιών όσο και νέα πεδία που βασίζονται στη σύγκλιση επικοινωνίας και αντίληψης του περιβάλλοντος.

Στον τομέα των μεταφορών, τα ISAC συστήματα σχετίζονται με την υλοποίηση προηγμένων συστημάτων Vehicle-to-Everything (V2X), όπου οχήματα, υποδομές και χρήστες επικοινωνούν και αλληλεπιδρούν σε πραγματικό χρόνο. Μέσω της ταυτόχρονης ανταλλαγής δεδομένων και της ανίχνευσης του περιβάλλοντος, γίνεται δυνατή η αναγνώριση εμποδίων, η πρόβλεψη κινήσεων και η αποφυγή συγκρούσεων,. Αυτό προφανώς ενισχύει την οδική ασφάλεια και την αποδοτικότητα των μεταφορών.

Στις έξυπνες πόλεις, το ISAC μπορεί να αξιοποιηθεί για την παρακολούθηση και διαχείριση αστικών υποδομών. Εφαρμογές όπως η διαχείριση κυκλοφορίας, η παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα και η ανίχνευση περιβαλλοντικών συνθηκών βασίζονται στη συνεχή συλλογή και ανάλυση δεδομένων. Η ενσωμάτωση sensing και επικοινωνίας επιτρέπει την ανάπτυξη πιο προσαρμοστικών αστικών συστημάτων, τα οποία μπορούν να ανταποκρίνονται δυναμικά στις μεταβαλλόμενες ανάγκες.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν επίσης οι εφαρμογές περιβαλλοντικής και απομακρυσμένης ανίχνευσης (environmental and remote sensing), όπου τα ISAC συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση φυσικών φαινομένων, την ανίχνευση καταστροφών και τη συλλογή δεδομένων σε δυσπρόσιτες περιοχές. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η συνδυασμένη λειτουργία επικοινωνίας και sensing μειώνει την ανάγκη για ξεχωριστές υποδομές και επιτρέπει πιο αποδοτική αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων.

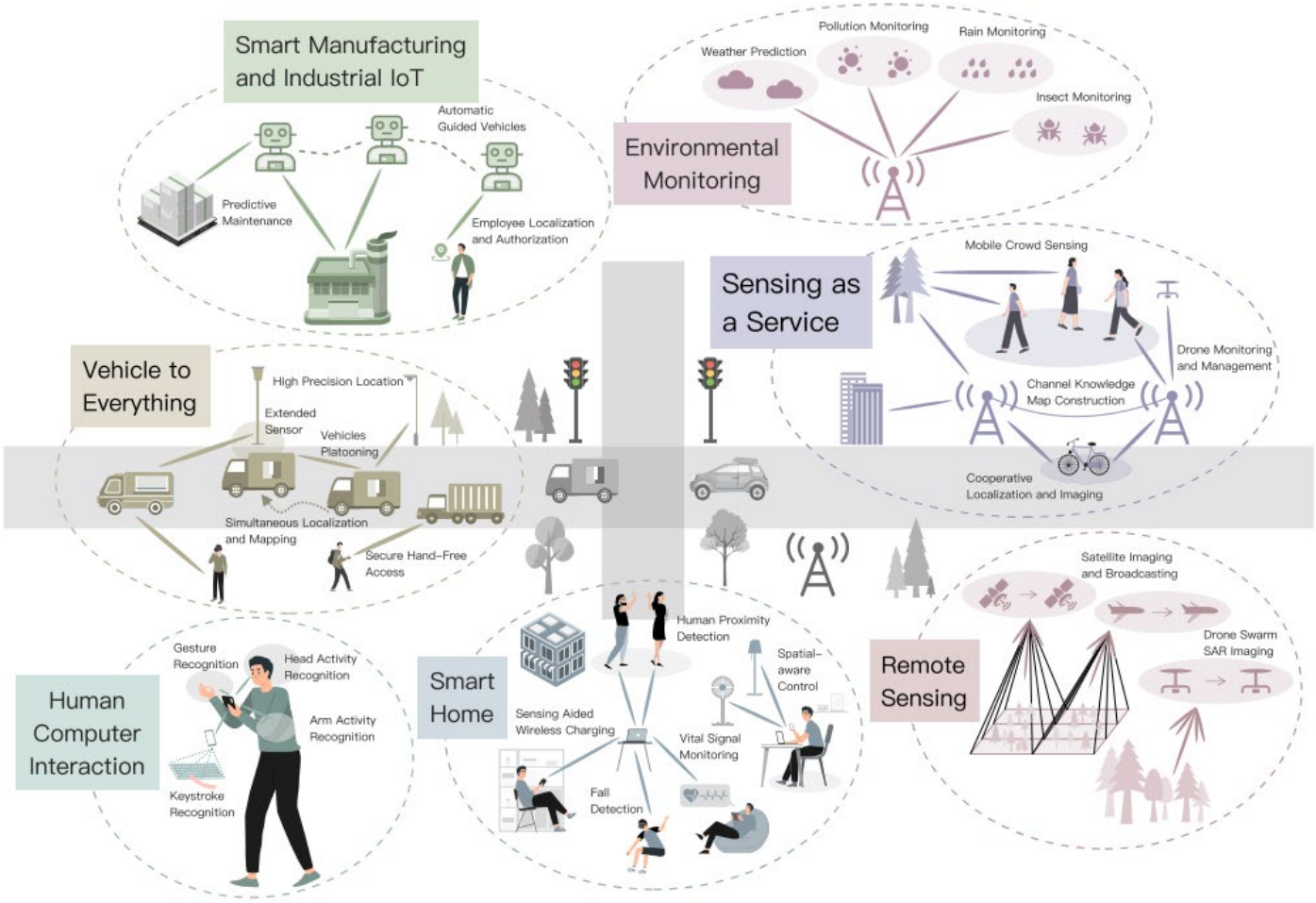
Στον βιομηχανικό τομέα, τα ISAC συστήματα υποστηρίζουν την εξέλιξη προς τα έξυπνα

εργοστάσια (smart manufacturing) και το Industrial Internet of Things (IIoT). Μέσω δυνατοτήτων real-time monitoring και ακριβούς εντοπισμού, γίνονται ποιο αποδοτικές οι διαδικασίες παραγωγής και η πρόληψη βλαβών. Παράλληλα, η ενσωμάτωση sensing επιτρέπει την ασφαλή συνεργασία μεταξύ ανθρώπων και ρομποτικών συστημάτων σε δυναμικά περιβάλλοντα.

Ένας ακόμη σημαντικός τομέας εφαρμογών είναι η αλληλεπίδραση ανθρώπου–υπολογιστή (Human–Computer Interaction), όπου τα ISAC συστήματα επιτρέπουν τη δημιουργία πιο φυσικών και αποδοτικών τρόπων επικοινωνίας μεταξύ ανθρώπων και ψηφιακών συστημάτων, όπως η ρομποτική όραση. Επίσης μέσω της ανίχνευσης κινήσεων, θέσης και χειρονομιών, καθίσταται δυνατή η ανάπτυξη προηγμένων εφαρμογών σε περιβάλλοντα επαυξημένης και εικονικής πραγματικότητας.

Επιπλέον, τα ISAC συστήματα βρίσκουν εφαρμογή και σε οικιακά περιβάλλοντα, όπως τα έξυπνα σπίτια (smart homes), όπου μπορούν να υποστηρίξουν λειτουργίες όπως η ανίχνευση παρουσίας, η παρακολούθηση δραστηριότητας και η βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας (του smart home).

Τέλος, μια ιδιαίτερα σημαντική και αναδυόμενη έννοια είναι το sensing-as-a-service, όπου οι δυνατότητες sensing παρέχονται ως υπηρεσία μέσω του δικτύου. Σε αυτό το μοντέλο, οι πάροχοι δικτύων μπορούν να συλλέγουν και να επεξεργάζονται δεδομένα περιβάλλοντος και να τα διαθέτουν σε τρίτους, υποστηρίζοντας εφαρμογές όπως η ανάλυση κυκλοφορίας, η αστική σχεδίαση και οι υπηρεσίες ασφάλειας. Συνολικά, οι εφαρμογές του ISAC εκτείνονται σε πολλούς τομείς και



Εικόνα 4: Εφαρμογές ISAC

αναμένεται να αποτελέσουν βασικό παράγοντα για την υλοποίηση των δικτύων 6G, καθώς επιτρέπουν τη δημιουργία συστημάτων που συνδυάζουν επικοινωνία, αντίληψη και ευφυΐα. [4], [5]

2.2.8 Από το ISAC στο ISCC

Μια φυσική εξέλιξη του ISAC είναι η ενσωμάτωση της υπολογιστικής διάστασης, οδηγώντας στην έννοια του Integrated Sensing, Communication and Computation (ISCC). Ενώ το ISAC εστιάζει στην ενοποίηση της επικοινωνίας και της ανίχνευσης, το ISCC επεκτείνει περαιτέρω αυτή την προσέγγιση ενσωματώνοντας και τη δυνατότητα επεξεργασίας δεδομένων ως εγγενές στοιχείο του δικτύου. Με τον τρόπο αυτό, το δίκτυο δεν λειτουργεί μόνο ως μέσο μεταφοράς και συλλογής πληροφορίας, αλλά και ως πλατφόρμα υπολογιστικής επεξεργασίας.

Στα ISCC συστήματα, τα δεδομένα που συλλέγονται μέσω sensing δεν μεταδίδονται απλώς σε απομακρυσμένα κέντρα για επεξεργασία, αλλά μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο είτε στο άκρο του δικτύου (edge computing) είτε σε κατανεμημένες υπολογιστικές υποδομές (fog/cloud computing). Αυτό μειώνει σημαντικά την καθυστέρηση, περιορίζει την ανάγκη για μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων και επιτρέπει την ταχύτερη εξαγωγή χρήσιμης πληροφορίας.

Η βασική διαφορά μεταξύ ISAC και ISCC είναι η προσθήκη της υπολογιστικής διάστασης. Στο ISAC, η έμφαση δίνεται στη συλλογή και μετάδοση δεδομένων με αποδοτικό τρόπο, ενώ στο ISCC η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται αναπόσπαστο μέρος του συστήματος. Αυτό οδηγεί σε ένα πιο «ευφυές» δίκτυο, ικανό όχι μόνο να αντιλαμβάνεται το περιβάλλον, αλλά και να λαμβάνει αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο.

Η σημασία του ISCC γίνεται ιδιαίτερα εμφανής σε εφαρμογές όπως το Internet of Vehicles (IoV), όπου μεγάλος όγκος δεδομένων παράγεται συνεχώς από αισθητήρες, οχήματα και υποδομές. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, η απλή μετάδοση των δεδομένων σε ένα κεντρικό σύστημα δεν αρκεί, λόγω των αυστηρών απαιτήσεων σε καθυστέρηση και αξιοπιστία. Αντίθετα, μέσω του ISCC, τα δεδομένα μπορούν να αναλυθούν τοπικά, επιτρέποντας την άμεση λήψη αποφάσεων, όπως η αποφυγή συγκρούσεων, η προσαρμογή της πορείας ή η διαχείριση της κυκλοφορίας.

Επιπλέον, το ISCC επιτρέπει τη συνεργατική επεξεργασία δεδομένων μεταξύ πολλαπλών κόμβων του δικτύου. Για παράδειγμα, οχήματα, roadside units και edge servers μπορούν να μοιράζονται υπολογιστικούς πόρους και πληροφορία, δημιουργώντας ένα κατανεμημένο σύστημα νοημοσύνης. Η προσέγγιση αυτή βελτιώνει την ακρίβεια των αποφάσεων και αυξάνει την ανθεκτικότητα του συστήματος σε σφάλματα.

Συνολικά, το ISCC αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό βήμα προς τα πλήρως ενοποιημένα και ευφυή δίκτυα 6G, όπου η επικοινωνία, η αντίληψη και η υπολογιστική επεξεργασία συνυπάρχουν και δουλεύουν σαν ένα [8].

2.2.9 Προκλήσεις και ερευνητικές κατευθύνσεις

Παρά τις σημαντικές δυνατότητες του ISAC, η πρακτική υλοποίησή του συνοδεύεται από διάφορες προκλήσεις. Η σχεδίαση κοινών κυματομορφών που να ικανοποιούν ταυτόχρονα τις απαιτήσεις επικοινωνίας και sensing αποτελεί ένα από τα πιο δύσκολα προβλήματα. Σε αντίθεση με τα

παραδοσιακά συστήματα, όπου οι κυματομορφές σχεδιάζονται με έναν σαφή στόχο, στα ISAC συστήματα απαιτείται ένας προσεκτικός συμβιβασμός μεταξύ αντικρουόμενων απαιτήσεων. Για παράδειγμα, τα σήματα επικοινωνίας βελτιστοποιούνται για υψηλό ρυθμό μετάδοσης και ανθεκτικότητα σε θόρυβο, ενώ τα σήματα sensing απαιτούν υψηλή χρονική και φασματική ανάλυση για τον ακριβή εντοπισμό στόχων. Η ανάπτυξη joint waveforms που να επιτυγχάνουν ικανοποιητική απόδοση και στους δύο τομείς αποτελεί ενεργό πεδίο έρευνας, με προσεγγίσεις που βασίζονται σε τεχνικές βελτιστοποίησης, διαμορφώσεις πολλαπλών φερόντων (π.χ. OFDM-based ISAC) και προσαρμοστικά σήματα.

Επιπλέον, η διαχείριση παρεμβολών αποτελεί κρίσιμο ζήτημα, καθώς τα σήματα sensing και επικοινωνίας συνυπάρχουν στο ίδιο φάσμα και ενδέχεται να αλληλοεπηρεάζονται. Η ανάγκη για ακριβή συγχρονισμό σε χρόνο και συχνότητα είναι επίσης ιδιαίτερα απαιτητική, ειδικά σε κατανεμημένα ή cell-free δίκτυα, όπου πολλαπλοί κόμβοι συνεργάζονται ταυτόχρονα.

Ένα ακόμη σημαντικό εμπόδιο είναι η αυξημένη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Η ταυτόχρονη επεξεργασία δεδομένων επικοινωνίας και sensing, σε συνδυασμό με την ανάγκη για real-time λειτουργία, απαιτεί ισχυρές υπολογιστικές υποδομές και αποδοτικούς αλγορίθμους. Η ενσωμάτωση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης είναι μια λύση, αλλά εισάγει επιπλέον προκλήσεις, όπως η ανάγκη για εκπαίδευση μοντέλων και η διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων.

Ιδιαίτερη σημασία αποκτούν επίσης ζητήματα ασφάλειας και ιδιωτικότητας. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά δίκτυα επικοινωνίας, όπου μεταδίδονται κυρίως δεδομένα χρηστών, τα ISAC συστήματα συλλέγουν και επεξεργάζονται πληροφορίες που σχετίζονται άμεσα με το φυσικό περιβάλλον, όπως θέση, κίνηση και χαρακτηριστικά αντικειμένων ή ακόμα και ανθρώπων. Αυτό δημιουργεί νέους κινδύνους παραβίασης ιδιωτικότητας, καθώς είναι δυνατή η έμμεση εξαγωγή ευαίσθητων πληροφοριών χωρίς τη γνώση ή συγκατάθεση των χρηστών.

Για παράδειγμα, μέσω sensing δεδομένων μπορεί να εξαχθούν πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά, τις κινήσεις ή την παρουσία ενός ατόμου σε έναν χώρο. Σε εφαρμογές έξυπνων κατοικιών ή έξυπνων πόλεων, αυτό εγείρει σημαντικά ηθικά και νομικά ζητήματα. Επιπλέον, η ενοποίηση sensing και επικοινωνίας αυξάνει την επιφάνεια επίθεσης του συστήματος, καθιστώντας το πιο ευάλωτο σε κακόβουλες παρεμβάσεις, όπως spoofing ή jamming που επηρεάζουν τόσο την επικοινωνία όσο και την αντίληψη του περιβάλλοντος.

Για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων, απαιτείται η ανάπτυξη μηχανισμών που διασφαλίζουν την προστασία της ιδιωτικότητας ήδη από το στάδιο του σχεδιασμού (privacy-by-design), όπως τεχνικές ανωνυμοποίησης, ασφαλούς επεξεργασίας δεδομένων και ελεγχόμενης πρόσβασης. Παράλληλα, η ενσωμάτωση προηγμένων μηχανισμών ασφάλειας σε επίπεδο φυσικού στρώματος (physical layer security) μπορεί να συμβάλει στην προστασία τόσο της επικοινωνίας όσο και των sensing δεδομένων.

Συνολικά, η επιτυχής υλοποίηση των ISAC συστημάτων προϋποθέτει τη συνδυασμένη αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, μέσω της ανάπτυξης νέων αλγορίθμων, αρχιτεκτονικών και τεχνολογιών, καθώς και τη στενή συνεργασία μεταξύ διαφορετικών επιστημονικών πεδίων, όπως οι ασύρματες επικοινωνίες, η επεξεργασία σήματος, η τεχνητή νοημοσύνη και η ασφάλεια πληροφοριών. [4], [6], [7], [9]

3

Θεωρητικό υπόβαθρο

Το παρόν κεφάλαιο βασίζεται στην ακόλουθη βιβλιογραφία: οι βασικές αρχές OFDM και διαμόρφωσης παρουσιάζονται στις εργασίες [10], [14] , οι τεχνικές beamforming και ISAC στις [11] , [12] , οι θεμελιώδεις έννοιες ασύρματων επικοινωνιών στην [13] , η επεξεργασία OFDM radar στην [15] , οι βασικές αρχές radar στην [16] , ενώ οι έννοιες μετασχηματισμού Fourier και ψηφιακής επεξεργασίας σήματος στην [17] .

3.1 Ψηφιακές Επικοινωνίες

3.1.1 Αντιστοίχιση bits σε σύμβολα (Bit-to-Symbol Mapping)

Η διαδικασία μετάδοσης ξεκινά με την αντιστοίχιση των bits σε σύμβολα ενός αστερισμού (constellation). Η αντιστοίχιση αυτή καθορίζεται από το χρησιμοποιούμενο σχήμα διαμόρφωσης και επηρεάζει άμεσα την απόδοση του συστήματος ως προς τον ρυθμό μετάδοσης και την ανθεκτικότητα σε θόρυβο.

Συνήθως, τα bits ομαδοποιούνται σε σύνολα σταθερού μεγέθους και κάθε ομάδα αντιστοιχίζεται σε ένα σημείο στον μιγαδικό χώρο. Η επιλογή του τρόπου αντιστοίχισης (mapping) μπορεί να επηρεάσει την πιθανότητα σφάλματος, με τεχνικές όπως το Gray mapping να χρησιμοποιούνται για τη μείωση των λαθών.

3.1.2 QPSK Διαμόρφωση

Η Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) είναι σχήμα ψηφιακής διαμόρφωσης. Σε αυτήν, κάθε σύμβολο μεταφέρει δύο bits πληροφορίας, αξιοποιώντας τέσσερις διακριτές φάσεις του φέροντος σήματος.

Τα σύμβολα απεικονίζονται στον μιγαδικό επίπεδο, σχηματίζοντας έναν τετραγωνικό αστερισμό. Η QPSK προσφέρει έναν ισορροπημένο συνδυασμό φασματικής αποδοτικότητας και ανθεκτικότητας σε θόρυβο, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για χρήση σε πολυφορείς τεχνικές όπως το OFDM.

Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται και περιστροφή του αστερισμού (π.χ. κατά π/4), η οποία συμβάλλει στη βελτίωση της συμπεριφοράς του σήματος σε δυναμικά περιβάλλοντα μετάδοσης.

3.1.3 Διαγράμματα Αστερισμού (Constellation Diagrams)

Τα διαγράμματα αστερισμού είναι για την οπτικοποίηση των συμβόλων στον μιγαδικό χώρο. Κάθε σημείο αντιστοιχεί σε ένα σύμβολο, ενώ η κατανομή των σημείων παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα της μετάδοσης.

Σε ιδανικές συνθήκες, τα σύμβολα βρίσκονται ακριβώς στις θεωρητικές τους θέσεις. Ωστόσο, η παρουσία θορύβου, παρεμβολών και φαινομένων καναλιού προκαλεί διασπορά των σημείων γύρω από αυτές. Η ανάλυση αυτής της διασποράς επιτρέπει την αξιολόγηση της επίδρασης του καναλιού και της αποτελεσματικότητας των τεχνικών επεξεργασίας σήματος.

3.1.4 Προσθετικός Λευκός Γκαουσιανός Θόρυβος (AWGN)

Κατά τη μετάδοση ενός σήματος μέσω ασύρματου καναλιού, αυτό επηρεάζεται από θόρυβο. Ένα από τα πιο διαδεδομένα μοντέλα είναι ο Προσθετικός Λευκός Γκαουσιανός Θόρυβος (Additive White Gaussian Noise), ο οποίος χαρακτηρίζεται από μηδενική μέση τιμή και σταθερή φασματική πυκνότητα ισχύος.

Ο θόρυβος αυτός προστίθεται στο σήμα και προκαλεί τυχαίες μεταβολές στο πλάτος και τη φάση του, επηρεάζοντας την ακρίβεια της ανίχνευσης των συμβόλων. Παρά την απλότητά του, το μοντέλο AWGN χρησιμοποιείται ευρέως για την ανάλυση και αξιολόγηση συστημάτων επικοινωνίας.

3.1.5 Λόγος Σήματος προς Θόρυβο (SNR)

Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio) επηρεάζει την ποιότητα ενός συστήματος επικοινωνίας. Εκφράζει τη σχέση μεταξύ της ισχύος του χρήσιμου σήματος και της ισχύος του θορύβου, εκφράζεται σε decibel (dB).

Υψηλές τιμές SNR οδηγούν σε πιο αξιόπιστη μετάδοση, καθώς τα σύμβολα μπορούν να διακριθούν ευκολότερα. Αντίθετα, χαμηλές τιμές SNR αυξάνουν την πιθανότητα σφαλμάτων. Η έννοια του SNR είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της απόδοσης της επικοινωνίας.

3.2 Συστήματα OFDM

Η Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) είναι μια τεχνική διαμόρφωσης και πολυπλεξίας που χρησιμοποιείται στα σύγχρονα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας. Η τεχνική αυτή επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων υψηλού ρυθμού μέσω της διαίρεσης του διαθέσιμου εύρους ζώνης σε πολλαπλούς υποφορείς (subcarriers) χαμηλότερου ρυθμού.

Η OFDM είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για περιβάλλοντα με πολυδιαδρομική διάδοση (multipath propagation), καθώς μετατρέπει ένα επιλεκτικό κατά συχνότητα κανάλι σε ένα σύνολο σχεδόν επίπεδων υποκαναλιών, απλοποιώντας σημαντικά τη διαδικασία ανίχνευσης και επεξεργασίας του σήματος.

3.2.1 Βασική Αρχή Λειτουργίας

Η βασική ιδέα της OFDM είναι η ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών συμβόλων σε διαφορετικές συχνότητες (υποφορείς), οι οποίοι είναι μεταξύ τους ορθογώνιοι. Η ορθογωνιότητα αυτή επιτρέπει την επικάλυψη των φασμάτων των υποφορέων χωρίς να δημιουργούνται παρεμβολές μεταξύ τους (Inter-Carrier Interference, ICI).

Κάθε υποφορέας μεταφέρει ένα σύμβολο χαμηλού ρυθμού, με αποτέλεσμα η συνολική μετάδοση να είναι πιο ανθεκτική σε φαινόμενα χρονικής διασποράς που προκαλούνται από το κανάλι.

$$\int_0^T e^{j\,2\pi\,\mathrm{fk}\,t}\cdot\ \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\,2\pi\,fm\,t}dt = 0\ ,\qquad \mathrm{k}\neq\mathrm{m}$$

όπου fk και fm είναι οι συχνότητες δύο διαφορετικών υποφορέων και T η διάρκεια του συμβόλου. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών σημάτων στο ίδιο εύρος ζώνης χωρίς αλληλοπαρεμβολή.

3.2.2 Υποφορείς (Subcarriers)

Στο OFDM, το συνολικό εύρος ζώνης χωρίζεται σε έναν μεγάλο αριθμό στενών υποφορέων. Κάθε υποφορέας μεταφέρει ανεξάρτητα δεδομένα και θεωρείται ότι υφίσταται επίπεδη απόκριση καναλιού (flat fading), αυτό απλοποιεί σημαντικά την επεξεργασία στο δέκτη.

Η απόσταση μεταξύ των υποφορέων επιλέγεται έτσι ώστε να διατηρείται η ορθογωνιότητά τους. Αυτό σημαίνει ότι η συχνότητα κάθε υποφορέα είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της βασικής συχνότητας, εξασφαλίζοντας ότι οι υποφορείς δεν παρεμβάλλονται μεταξύ τους κατά την αποδιαμόρφωση.

3.2.3 Μετασχηματισμοί FFT και IFFT

Η υλοποίηση της OFDM βασίζεται στον διακριτό μετασχηματισμό Fourier. Στον πομπό, τα σύμβολα στο πεδίο της συχνότητας μετατρέπονται σε σήμα στο πεδίο του χρόνου μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT). Αντίστοιχα, στον

δέκτη, εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός Fourier (FFT) για την ανάκτηση των συμβόλων από το λαμβανόμενο σήμα.

Η χρήση των FFT, IFFT καθιστά την υλοποίηση της OFDM ιδιαίτερα αποδοτική υπολογιστικά, επιτρέποντας την πρακτική εφαρμογή της σε συστήματα υψηλού ρυθμού μετάδοσης.

Πομπός IFFT:

$$x[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X[k]\, e^{j2\pi kn/N}$$

Όπου X[k] είναι τα σύμβολα στους υποφορείς, N ο συνολικός αριθμός υποφορέων, x[n] το χρονικό σήμα που μεταδίδεται.

Στον δέκτη, εφαρμόζεται ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier (FFT) για την ανάκτηση των συμβόλων στο πεδίο της συχνότητας

Δέκτης FFT:

$$Y[k] = \sum_{n=0}^{N-1} y[n]\, e^{-j2\pi kn/N}$$

όπου y[n] είναι το λαμβανόμενο σήμα στο χρόνο και Y[k] τα σύμβολα στους υποφορείς μετά τη μετάδοση μέσω του καναλιού.

3.2.3.1 Ο Ρόλος του Μετασχηματισμού Fourier

Ο μετασχηματισμός Fourier χρησιμοποιείται στα συστήματα επικοινωνίας και στα συστήματα radar.

Στα OFDM συστήματα:

- Ο IFFT χρησιμοποιείται στον πομπό για τη δημιουργία του χρονικού σήματος από τα σύμβολα στο πεδίο της συχνότητας.
- Ο FFT στον δέκτη επιτρέπει την ανάκτηση των συμβόλων.

Στα radar συστήματα:

- Ο FFT κατά τον άξονα του «γρήγορου χρόνου» (fast-time) χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της απόστασης.
- Ο FFT κατά τον άξονα «αργού χρόνου» (slow-time) χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της συχνότητας Doppler και της ταχύτητας.

3.2.4 Κυκλικό Πρόθεμα (Cyclic Prefix)

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της OFDM είναι η χρήση του κυκλικού προθέματος (Cyclic Prefix, CP). Το CP αποτελεί ένα αντίγραφο του τελευταίου τμήματος του OFDM συμβόλου, το οποίο προστίθεται στην αρχή του.

Ο κύριος σκοπός του CP είναι η αντιμετώπιση της πολυδιαδρομικής διάδοσης και η αποφυγή της διασυμβολικής παρεμβολής (Inter-Symbol Interference, ISI). Εφόσον η διάρκεια του CP είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη καθυστέρηση του καναλιού, το σύστημα μπορεί να αντιμετωπίσει τα πολλαπλά μονοπάτια χωρίς παραμόρφωση.

Επιπλέον, το CP επιτρέπει τη μετατροπή της γραμμικής συνέλιξης του σήματος με το κανάλι σε κυκλική συνέλιξη. Αυτό απλοποιεί την εξισορρόπηση που πραγματοποιείται στο πεδίο της συχνότητας.

$$\mathrm{xcp}[\mathrm{n}] = \mathrm{x}[\mathrm{n} + \mathrm{N}] \ , \ \ \mathrm{n} = -\mathrm{Ncp}, \dots, -1$$

όπου Ncp είναι το μήκος του κυκλικού προθέματος σε δείγματα σήματος.

3.2.5 Δομή Πλαισίου OFDM

Η μετάδοση δεδομένων σε ένα σύστημα OFDM οργανώνεται σε πλαίσια (frames), τα οποία αποτελούνται από διαδοχικά OFDM σύμβολα. Κάθε σύμβολο περιλαμβάνει δεδομένα και, σε ορισμένες περιπτώσεις, ειδικά γνωστά σύμβολα (πιλότοι) που χρησιμοποιούνται για εκτίμηση καναλιού και συγχρονισμό.

3.2.6 Πιλοτικοί Υποφορείς και Υποφορείς Δεδομένων

Σε ένα OFDM σύστημα, οι υποφορείς χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τους υποφορείς δεδομένων (data subcarriers) και τους πιλοτικούς υποφορείς (pilot subcarriers).

Οι πιλοτικοί υποφορείς μεταφέρουν γνωστά σύμβολα και χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της απόκρισης του καναλιού. Από την άλλη πλευρά, οι υποφορείς δεδομένων μεταφέρουν την πραγματική πληροφορία.

Η ύπαρξη πιλοτικών υποφορέων επιτρέπει στον δέκτη να αντισταθμίσει τις επιδράσεις του καναλιού και να ανακτήσει σωστά τα δεδομένα.

3.2.7 Χρονικά Διαστήματα - Guard Intervals

Εκτός από το cyclic prefix, ένα σύστημα OFDM περιλαμβάνει και χρονικά διαστήματα προστασίας (guard intervals), τα οποία συμβάλλουν στη μείωση της αλληλοεπικάλυψης μεταξύ διαδοχικών συμβόλων. Τα διαστήματα αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά σε περιβάλλοντα με έντονη

πολυδιαδρομική διάδοση, όπου τα ανακλώμενα σήματα μπορεί να φτάνουν με καθυστέρηση και να επηρεάζουν επόμενα σύμβολα.

3.2.8 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί της OFDM

Η OFDM παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως υψηλή φασματική αποδοτικότητα, ανθεκτικότητα σε πολυδιαδρομική διάδοση και απλοποιημένη εξισορρόπηση. Για τους λόγους αυτούς χρησιμοποιείται ευρέως σε σύγχρονα πρότυπα επικοινωνίας.

Ωστόσο, παρουσιάζει και ορισμένους περιορισμούς, όπως η ευαισθησία σε φαινόμενα Doppler και μετατοπίσεις συχνότητας, καθώς και ο υψηλός λόγος κορυφής προς μέση ισχύ (Peak-to-Average Power Ratio – PAPR), ο οποίος επηρεάζει την αποδοτικότητα των ενισχυτών ισχύος.

3.3 Μοντελοποίηση Καναλιού (Channel Modeling)

Σε πραγματικά περιβάλλοντα, το μεταδιδόμενο σήμα δεν φτάνει στον δέκτη μέσω μιας μόνο διαδρομής, αλλά μέσω πολλαπλών μονοπατιών που προκύπτουν από ανακλάσεις, διαθλάσεις και σκέδαση.

Στο πλαίσιο των συστημάτων ISAC, η μοντελοποίηση του καναλιού αποκτά διπλό ρόλο: αρχικά περιγράφει την επίδραση του περιβάλλοντος στην επικοινωνία αλλά ταυτόχρονα αποτελεί πηγή πληροφορίας για την ανίχνευση και χαρακτηρισμό αντικειμένων.

3.3.1 Ελεύθερη Διάδοση και Εξασθένηση (Free-Space Propagation)

Σε ένα ιδανικό περιβάλλον χωρίς εμπόδια, το σήμα διαδίδεται ευθύγραμμα και η ισχύς του μειώνεται με την απόσταση. Η εξασθένηση αυτή περιγράφεται από τον νόμο της ελεύθερης διάδοσης:

$$\mathrm{Pr} \propto \frac{1}{\mathrm{R}^2}$$

όπου R είναι η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη.

Η σχέση αυτή δείχνει ότι η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος μειώνεται τετραγωνικά με την απόσταση, γεγονός που επηρεάζει την ποιότητα της επικοινωνίας και την ανιχνευσιμότητα στόχων σε εφαρμογές sensing.

3.3.2 Πολυδιαδρομική Διάδοση (Multipath Propagation)

Σε πραγματικά περιβάλλοντα, το σήμα φτάνει στον δέκτη μέσω πολλαπλών διαδρομών. Εκτός από την απευθείας διαδρομή (line-of-sight), υπάρχουν και ανακλώμενα σήματα από αντικείμενα του περιβάλλοντος.

Το συνολικό λαμβανόμενο σήμα μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα επιμέρους συνιστωσών:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{L} ai\ x(t - \tau i)$$

Όπου, L είναι ο αριθμός των διαδρομών, ai ο συντελεστής εξασθένησης κάθε διαδρομής, και τi η καθυστέρηση της διαδρομής.

Η πολυδιαδρομική διάδοση προκαλεί φαινόμενα όπως επιλεκτική εξασθένηση κατά συχνότητα (frequency-selective fading), τα οποία επηρεάζουν την απόδοση.

3.3.3 Καθυστέρηση Διάδοσης (Propagation Delay)

Η καθυστέρηση ενός σήματος οφείλεται στον χρόνο που απαιτείται για να διανύσει την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Για μία απόσταση R, η καθυστέρηση δίνεται από:

$$\tau = \frac{R}{c}$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός.

Στην περίπτωση radar (μονοστατική διάταξη – πομπός και δέκτης στο ίδιο σημείο), το σήμα διανύει τη διαδρομή πομπού–στόχου–δέκτη, οπότε η συνολική καθυστέρηση γίνεται:

$$\tau = \frac{2R}{c}$$

Η καθυστέρηση αυτή αποτελεί τη βασική παράμετρο για την εκτίμηση της απόστασης ενός στόχου.

3.3.4 Δειγματοληψία και Σχέση με την Απόσταση

Στα ψηφιακά συστήματα, το σήμα επεξεργάζεται σε διακριτό χρόνο, μέσω δειγματοληψίας με συχνότητα Fs. Η επιλογή της συχνότητας δειγματοληψίας επηρεάζει άμεσα την ικανότητα του συστήματος να εκτιμήσει χρονικές καθυστερήσεις και, κατά συνέπεια, αποστάσεις.

Η καθυστέρηση ενός ανακλώμενου σήματος εκφράζεται σε αριθμό δειγμάτων ως:

$$ndelay = \tau \cdot Fs$$

όπου τ είναι η χρονική καθυστέρηση

Άρα: $$ndelay = \frac{2R}{c} Fs$$

Ο αριθμός των δειγμάτων πρέπει να είναι ακέραιος αριθμός οπότε το αποτέλεσμα στρογγυλοποιείται προς τα κάτω (συνάρτηση floor)

$$ndelay = \left\lfloor \frac{2R}{c} Fs \right\rfloor$$

3.3.5 Φαινόμενο Doppler

Όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ πομπού, δέκτη ή στόχου, το σήμα υφίσταται μετατόπιση στη συχνότητα, γνωστή ως φαινόμενο Doppler. Το φαινόμενο αυτό προκύπτει λόγω της μεταβολής της απόστασης μεταξύ πηγής και παρατηρητή κατά τη διάδοση του κύματος.

Αν η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη μειώνεται, η συχνότητα που παρατηρείται αυξάνεται, ενώ αν αυξάνεται, η παρατηρούμενη συχνότητα μειώνεται. Η μετατόπιση αυτή εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα και το μήκος κύματος του σήματος.

Στην περίπτωση επικοινωνίας (μονής διαδρομής), η μετατόπιση δίνεται από:

$$fD = \frac{u}{\lambda}$$

ενώ στην περίπτωση radar (διπλής διαδρομής):

$$fD = \frac{2u}{\lambda}$$

u είναι η σχετική ταχύτητα, λ το μήκος κύματος.

Πέρα από τη μετατόπιση στη συχνότητα, το φαινόμενο Doppler εκδηλώνεται και ως συνεχής μεταβολή της φάσης του σήματος στον χρόνο. Συγκεκριμένα, ένα μετατοπισμένο λόγω Doppler (Doppler-shifted) σήμα μπορεί να εκφραστεί ως ένα αρχικό σήμα που πολλαπλασιάζεται με έναν εκθετικό όρο φάσης της μορφής:

$$e^{j2\pi f_D t}$$

Η φασική αυτή περιστροφή επηρεάζει την ανίχνευση των συμβόλων.

Σε περιβάλλοντα με πολλαπλές ανακλάσεις (multipath), κάθε διαδρομή μπορεί να έχει διαφορετική Doppler μετατόπιση, ανάλογα με την κίνηση του αντίστοιχου ανακλαστή. Αυτό οδηγεί σε φαινόμενα χρονικής μεταβλητότητας του καναλιού (time-varying channel) και διάχυσης στη συχνότητα Doppler (Doppler spread), τα οποία επιδεινώνουν την απόδοση του συστήματος.

Στα συστήματα OFDM, το Doppler έχει ιδιαίτερα αρνητική επίδραση, καθώς καταστρέφει την ορθογωνιότητα μεταξύ των υποφορέων, προκαλώντας παρεμβολή μεταξύ τους (Inter-Carrier Interference, ICI). Το πρόβλημα γίνεται πιο έντονο όσο αυξάνεται η ταχύτητα ή όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια του OFDM συμβόλου.

Στα συστήματα radar, αντίθετα, το φαινόμενο Doppler αξιοποιείται ως βασική πηγή πληροφορίας, καθώς επιτρέπει την εκτίμηση της ταχύτητας των στόχων. Έτσι, το ίδιο φυσικό φαινόμενο αποτελεί πρόβλημα για την επικοινωνία, αλλά είναι χρήσιμο για το sensing, κάτι που αναδεικνύει τη διπλή φύση των ISAC συστημάτων που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.

3.3.6 Μοντελοποίηση Ανακλάσεων και Στόχων

Στα συστήματα ISAC, οι ανακλάσεις δεν θεωρούνται απλώς ανεπιθύμητες παρεμβολές, αλλά πολύτιμη πηγή πληροφορίας. Κάθε στόχος στο περιβάλλον ανακλά μέρος της ενέργειας του σήματος, δημιουργώντας ένα "echo" που μπορεί να αναλυθεί.

Η ισχύς του ανακλώμενου σήματος εξαρτάται από το μέγεθος που λέγεται Radar Cross Section (RCS), το οποίο αποτελεί ένα μέτρο της ικανότητας ενός αντικειμένου να ανακλά ηλεκτρομαγνητική ενέργεια προς τον δέκτη. Πιο συγκεκριμένα, το RCS εκφράζει το πόσο «ορατός» είναι ένας στόχος σε ένα σύστημα radar και ορίζεται ως η ισοδύναμη επιφάνεια που θα σκεδάζει την ίδια ισχύ προς τον δέκτη όπως το πραγματικό αντικείμενο.

Μαθηματικά, το RCS ορίζεται ως:

σ = (ανακλώμενη ισχύς προς τον δέκτη) / (πυκνότητα ισχύος προσπίπτοντος κύματος)

και μετριέται σε τετραγωνικά μέτρα (m^2). Μεγαλύτερες τιμές RCS αντιστοιχούν σε στόχους που ανακλούν περισσότερη ενέργεια και είναι ευκολότερα ανιχνεύσιμοι.

Μια απλοποιημένη έκφραση για το πλάτος του ανακλώμενου σήματος είναι:

$$A \propto \sqrt{\sigma} \cdot \frac{1}{R^2}$$

σ είναι το RCS του στόχου, R η απόσταση.

Η εξάρτηση από το $1/R^2$ προκύπτει από τη διάδοση του κύματος στον ελεύθερο χώρο (free-space loss), ενώ η τετραγωνική ρίζα του RCS σχετίζεται με το πλάτος του λαμβανόμενου σήματος.

Η RCS δεν είναι σταθερή ποσότητα, αλλά εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως:

- το υλικό του αντικειμένου (π.χ. μέταλλο ανακλά περισσότερο από πλαστικό)
- το μέγεθος και το σχήμα του
- το μήκος κύματος του σήματος
- τη γωνία παρατήρησης

3.3.7 Γωνιακή Εξάρτηση και Aspect Angle

Η ένταση του ανακλώμενου σήματος εξαρτάται σημαντικά και από τη γωνία υπό την οποία το ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει στο αντικείμενο. Η γωνία αυτή, γνωστή ως aspect angle, επηρεάζει τη γεωμετρία της ανάκλασης και άρα και την τιμή του RCS.

Για παράδειγμα, ένα επίπεδο αντικείμενο μπορεί να εμφανίζει μεγάλο RCS όταν το κύμα προσπίπτει κάθετα στην επιφάνειά του, αλλά πολύ μικρότερο όταν η πρόσπτωση γίνεται υπό γωνία. Σε πρακτικά μοντέλα, η γωνιακή εξάρτηση συχνά προσεγγίζεται με απλές συναρτήσεις (π.χ. ημιτονοειδείς συναρτήσεις), οι οποίες αποτυπώνουν την επίδραση της γεωμετρίας του στόχου.

Το RCS είναι ιδιαίτερα σημαντικό στα ISAC συστήματα, καθώς επιτρέπει όχι μόνο την ανίχνευση αλλά και την κατηγοριοποίηση στόχων, με βάση τα χαρακτηριστικά της ανάκλασης.

3.4 Εκτίμηση Καναλιού (Channel Estimation)

Σε ένα ασύρματο σύστημα, το σήμα που λαμβάνεται επηρεάζεται από το κανάλι μετάδοσης, το οποίο εισάγει εξασθένηση, καθυστερήσεις και μεταβολές στη φάση. Για την αξιόπιστη ανάκτηση των δεδομένων, ο δέκτης πρέπει να εκτιμήσει την επίδραση του καναλιού και να την αντισταθμίσει.

Στα συστήματα OFDM, η εκτίμηση καναλιού πραγματοποιείται συνήθως στο πεδίο της συχνότητας, όπου κάθε υποφέρουσα μπορεί να θεωρηθεί ότι υφίσταται επίπεδη εξασθένηση. Αυτό επιτρέπει την απλοποίηση του προβλήματος και την ανεξάρτητη εκτίμηση του καναλιού για κάθε υποφέρουσα.

Η πιο διαδεδομένη προσέγγιση βασίζεται στη χρήση γνωστών συμβόλων, τα οποία ονομάζονται πιλότοι - pilots. Τα pilot symbols είναι προκαθορισμένα και γνωστά τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη και τοποθετούνται σε συγκεκριμένες θέσεις στο OFDM πλαίσιο, συνήθως ομοιόμορφα διαστήματα υποφερόντων. Ο ρόλος τους είναι να λειτουργούν ως «σημεία αναφοράς», επιτρέποντας στον δέκτη να συγκρίνει το λαμβανόμενο σήμα με το αναμενόμενο και να εκτιμήσει την επίδραση του καναλιού.

Η επιλογή της θέσης και της πυκνότητας των pilots παίζει ρόλο. Πυκνότερη τοποθέτηση οδηγεί σε πιο ακριβή εκτίμηση του καναλιού, αλλά μειώνει τη φασματική αποδοτικότητα, λογικό διότι λιγότερες υποφέρουσες είναι διαθέσιμες για μετάδοση δεδομένων. Αντίθετα, αραιότερη τοποθέτηση αυξάνει την αποδοτικότητα αλλά μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα εκτίμησης, ιδιαίτερα σε κανάλια με έντονες μεταβολές.

Εκτίμηση καναλιού:

$$\mathrm{Y(k)} = \mathrm{H(k)} \cdot \mathrm{X(k)} + \mathrm{W(k)}$$

όπου X(k) είναι το μεταδιδόμενο pilot, Y(k) το λαμβανόμενο σήμα, H(k) η απόκριση του καναλιού και W(k) ο θόρυβος. Με βάση τη σχέση αυτή, η εκτίμηση ελαχίστων τετραγώνων (LS) δίνεται από:

$$\mathrm{H'(k)} = \frac{\mathrm{Y(k)}}{X(\mathrm{k})}$$

Η εκτίμηση αυτή πραγματοποιείται αρχικά μόνο στις θέσεις των pilots. Στη συνέχεια, επειδή τα pilots δεν καλύπτουν όλες τις υποφέρουσες, εφαρμόζεται παρεμβολή (interpoloation) ώστε να υπολογιστεί η απόκριση του καναλιού σε ολόκληρο το φάσμα.

Σε περιβάλλοντα με κινητικότητα, το κανάλι μεταβάλλεται στον χρόνο λόγω του φαινομένου Doppler, γεγονός που απαιτεί συνεχή ενημέρωση της εκτίμησης για κάθε OFDM σύμβολο.

3.5 Εκτίμηση και Αντιστάθμιση Doppler

Η σχετική κίνηση μεταξύ πομπού, δέκτη ή στόχων προκαλεί μετατόπιση στη συχνότητα του σήματος, γνωστή ως φαινόμενο Doppler. Όπως αναφέρθηκε και πριν, το φαινόμενο αυτό εκδηλώνεται ως μια γραμμικά μεταβαλλόμενη φάση στον χρόνο. Η συνεχής αυτή περιστροφή της φάσης επηρεάζει τα λαμβανόμενα σύμβολα.

Σε ένα σύστημα OFDM, η παρουσία Doppler έχει ιδιαίτερα αρνητική επίδραση, καθώς καταστρέφει την ορθογωνιότητα μεταξύ των υποφορέων, δημιουργώντας παρεμβολή μεταξύ τους (Inter-Carrier Interference, ICI). Το αποτέλεσμα είναι η διασπορά της ενέργειας ενός υποφορέα στους γειτονικούς του και αυτό υποβαθμίζει την απόδοση.

Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η εκτίμηση και η αντιστάθμιση της μετατόπισης Doppler. Εδώ χρησιμοποιούνται τα pilot symbols, τα οποία είναι γνωστά στον δέκτη και επιτρέπουν την παρακολούθηση της εξέλιξης του καναλιού στον χρόνο.

Συγκεκριμένα, λόγω του Doppler, η φάση της εκτιμώμενης απόκρισης καναλιού μεταβάλλεται από σύμβολο σε σύμβολο.

Doppler συχνότητα:

$$fD \approx \frac{\Delta\varphi}{2\pi T_{OFDM}}$$

όπου T_{OFDM} η διάρκεια ενός OFDM συμβόλου.

Στην πράξη, για μεγαλύτερη ακρίβεια, η εκτίμηση πραγματοποιείται λαμβάνοντας τον μέσο όρο της μεταβολής φάσης σε πολλαπλά pilots και σε διαδοχικά σύμβολα, ώστε να μειωθεί η επίδραση του θορύβου.

Αφού εκτιμηθεί η μετατόπιση Doppler, η αντιστάθμισή της επιτυγχάνεται με την εφαρμογή μιας αντίθετης φασικής περιστροφής στο λαμβανόμενο σήμα.

Η διαδικασία εκτίμησης και αντιστάθμισης Doppler είναι σημαντική σε περιβάλλοντα υψηλής κινητικότητας, όπως τα συστήματα επικοινωνίας οχημάτων (vehicular communications), όπου οι ταχύτητες είναι μεγάλες και οι μεταβολές του καναλιού έντονες. Παράλληλα, στα συστήματα ISAC, η ίδια η Doppler πληροφορία μπορεί να αξιοποιηθεί και για σκοπούς sensing, όπως η εκτίμηση της ταχύτητας στόχων.

3.6 Εξισορρόπηση Καναλιού (Equalization)

Αφού εκτιμηθεί το κανάλι, το επόμενο βήμα είναι η αντιστάθμιση της επίδρασής του, διαδικασία γνωστή ως εξισορρόπηση (equalization). Στόχος είναι η ανάκτηση των αρχικών συμβόλων, εξαλείφοντας τις παραμορφώσεις που εισήγαγε το κανάλι.

Στα OFDM συστήματα, η εξισορρόπηση πραγματοποιείται στο πεδίο της συχνότητας και είναι ιδιαίτερα απλή, καθώς κάθε υποφέρουσα μπορεί να διορθωθεί ανεξάρτητα. Η πιο συνηθισμένη προσέγγιση είναι ο one-tap equalizer, όπου κάθε λαμβανόμενο σύμβολο διαιρείται με την εκτιμώμενη απόκριση του καναλιού.

Η αποτελεσματικότητα της εξισορρόπησης εξαρτάται από την ακρίβεια της εκτίμησης καναλιού. Εννοείτε πως λανθασμένες εκτιμήσεις οδηγούν σε σφάλματα στα σύμβολα και συνεπώς σε αυξημένο ποσοστό λαθών.

3.7 Κεραίες και Beamforming

Μέσω κατάλληλου ελέγχου της φάσης και του πλάτους των σημάτων στα πολλαπλά στοιχεία μιας στοιχειοκεραίας, είναι δυνατή η συγκέντρωση της εκπεμπόμενης ή λαμβανόμενης ενέργειας προς/από συγκεκριμένες κατευθύνσεις.

Μια διάταξη είναι η ομοιόμορφη γραμμική στοιχειοκεραία Uniform Linear Array (ULA), όπου τα στοιχεία της κεραίας τοποθετούνται γραμμικά με σταθερή απόσταση, συνήθως ίση με το μισό μήκος κύματος. Η διάταξη αυτή επιτρέπει τον έλεγχο της κατευθυντικότητας του σήματος μέσω του διανύσματος κατεύθυνσης/στρέψης (steering vector), το οποίο περιγράφει τη σχετική φασική μετατόπιση που εμφανίζεται μεταξύ των στοιχείων της κεραίας όταν ένα κύμα φτάνει από συγκεκριμένη γωνία.

Η βασική ιδέα του beamforming στηρίζεται στο φαινόμενο της συμβολής κυμάτων. Συγκεκριμένα, αν τα σήματα που εκπέμπονται από τα διαφορετικά στοιχεία της κεραίας ρυθμιστούν κατάλληλα ως προς τη φάση τους, μπορούν να προστεθούν εποικοδομητικά προς μία επιθυμητή κατεύθυνση και καταστροφικά προς άλλες. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένας «κύριος λοβός» (main lobe) προς την κατεύθυνση ενδιαφέροντος, ενώ οι υπόλοιπες κατευθύνσεις καταστέλλονται.

Αντίστοιχα, στη λήψη, το beamforming υλοποιείται συνδυάζοντας τα σήματα από τα επιμέρους στοιχεία της κεραίας με κατάλληλους συντελεστές βαρών (weights). Ο συνδυασμός αυτός επιτρέπει την ενίσχυση σημάτων που προέρχονται από συγκεκριμένη γωνία και την απόρριψη παρεμβολών ή θορύβου από άλλες κατευθύνσεις. Η διαδικασία αυτή είναι στην ουσία ένα χωρικό φιλτράρισμα (spatial filtering).

Μαθηματικά, το beamforming στη λήψη μπορεί να εκφραστεί ως ένα εσωτερικό γινόμενο μεταξύ του steering vector και του λαμβανόμενου διανύσματος σημάτων από την κεραία. Η επιλογή του κατάλληλου steering vector καθορίζει την κατεύθυνση προς την οποία «στρέφεται» το σύστημα.

Το beamforming διακρίνεται σε διαφορετικές κατηγορίες, όπως το συμβατικό (conventional) beamforming, όπου τα βάρη είναι σταθερά, και το προσαρμοστικό (adaptive) beamforming, όπου τα βάρη υπολογίζονται δυναμικά ώστε να μεγιστοποιείται η απόδοση.

Στα συστήματα ISAC, το beamforming βελτιώνει την ποιότητα της επικοινωνίας αυξάνοντας το λόγο σήματος προς θόρυβο και περιορίζοντας τις παρεμβολές αλλά χρησιμεύει και στο sensing, καθώς επιτρέπει την εκτίμηση της γωνίας άφιξης (Angle of Arrival – AoA) των ανακλώμενων σημάτων. Με τη σάρωση διαφορετικών γωνιών και την ανάλυση της λαμβανόμενης ισχύος, είναι δυνατός ο εντοπισμός της θέσης στόχων στον χώρο.

3.8 Επεξεργασία Σήματος Radar

3.8.1 Διάστημα επανάληψης παλμών και Συχνότητα επανάληψης παλμών (Pulse Repetition Interval και Pulse Repetition Frequency)

Στα συστήματα radar, η εκπομπή σημάτων πραγματοποιείται περιοδικά. Το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών εκπομπών ονομάζεται διάστημα επανάληψης παλμών Pulse Repetition Interval (PRI), ενώ το αντίστροφό του ονομάζεται συχνότητα επανάληψης παλμών Pulse Repetition Frequency (PRF):

$$PRF = \frac{1}{PRI}$$

Η επιλογή των παραμέτρων αυτών επηρεάζει την απόδοση του συστήματος. Συγκεκριμένα:

- Το PRI καθορίζει το μέγιστο εύρος αποστάσεων που μπορεί να μετρηθεί χωρίς ασάφεια.
- Το PRF επηρεάζει το μέγιστο ανιχνεύσιμο Doppler και αντίστοιχα την ανάλυση ταχύτητας.

Στα ISAC συστήματα που βασίζονται σε OFDM, κάθε OFDM σύμβολο μπορεί να θεωρηθεί ως ένας «παλμός», και συνεπώς η έννοια του PRI συνδέεται με το χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών συμβόλων ή παλμών που χρησιμοποιούνται για radar επεξεργασία.

3.8.2 Fast-Time και Slow-Time

Κεντρικής σημασίας στη επεξεργασία ραντάρ είναι η διάκριση μεταξύ δύο χρονικών αξόνων:

- **Fast-time**: αναφέρεται στον χρόνο ανάμεσα στα δείγματα (π.χ. μέσα σε ένα OFDM symbol). Ο άξονας αυτός σχετίζεται με την ανάλυση κατά απόσταση.
- **Slow-time**: αναφέρεται στην εξέλιξη μεταξύ διαδοχικών παλμών ή OFDM συμβόλων. Ο άξονας αυτός σχετίζεται με την ανάλυση κατά ταχύτητα (Doppler).

Πιο συγκεκριμένα, στο fast-time εξετάζουμε τη χρονική καθυστέρηση του σήματος μέσα σε έναν παλμό. Η καθυστέρηση αυτή συνδέεται με την απόσταση του στόχου μέσω της σχέσης:

$$R = \frac{c \cdot t}{2}$$

όπου τ είναι η καθυστέρηση και c η ταχύτητα του φωτός. Ο παράγοντας 2 οφείλεται στη διπλή διαδρομή (πομπός => στόχος => δέκτης).

Αντίθετα, στο slow-time παρακολουθούμε τη μεταβολή της φάσης του σήματος από παλμό σε παλμό. Αν ο στόχος κινείται, η φάση μεταβάλλεται γραμμικά στον χρόνο, κάτι που αντιστοιχεί σε μια Doppler συχνότητα. Η ανάλυση αυτής της μεταβολής επιτρέπει την εκτίμηση της ταχύτητας του στόχου.

Με λίγα λόγια:

- το fast-time για τη θέση (range)

- το slow-time για την κίνηση (velocity)

3.8.3 Διπλή Έννοια του Slow-Time

Στα ISAC συστήματα εμφανίζονται δύο διαφορετικές χρονικές κλίμακες slow-time, οι οποίες εξυπηρετούν διαφορετικούς σκοπούς:

- **Communication slow-time**: αναφέρεται στην εξέλιξη των OFDM συμβόλων και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση και αντιστάθμιση του καναλιού (π.χ. Doppler compensation).
- **Radar slow-time**: αναφέρεται στη διαδοχή παλμών που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ταχύτητας στόχων μέσω Doppler επεξεργασίας.

Παρόλο που και στις δύο περιπτώσεις πρόκειται για εξέλιξη στον χρόνο μεταξύ διαδοχικών μεταδόσεων, η ερμηνεία της πληροφορίας είναι διαφορετική. Στην επικοινωνία, η μεταβολή της φάσης είναι ανεπιθύμητη και πρέπει να αντισταθμιστεί, ενώ στο radar είναι πληροφορία.

3.8.4 Εκτίμηση Απόστασης (Range Estimation)

Η εκτίμηση της απόστασης βασίζεται στη σύγκριση του λαμβανόμενου σήματος με το μεταδιδόμενο. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως μέσω της συσχέτισης (correlation). Η θέση του μέγιστου της συσχέτισης υποδεικνύει τη χρονική καθυστέρηση και, κατά συνέπεια, την απόσταση του στόχου.

Η ανάλυση κατά απόσταση εξαρτάται από το εύρος ζώνης του σήματος: όσο μεγαλύτερο το bandwidth, τόσο καλύτερη η ικανότητα διάκρισης κοντινών στόχων.

3.8.5 Εκτίμηση Ταχύτητας (Doppler Processing)

Η εκτίμηση της ταχύτητας πραγματοποιείται στο πεδίο της συχνότητας κατά τον άξονα slow-time. Συγκεκριμένα, εφαρμόζεται μετασχηματισμός Fourier κατά μήκος των διαδοχικών παλμών.

Η διαδικασία αυτή μετατρέπει τη χρονική εξέλιξη της φάσης σε φασματική πληροφορία, αποκαλύπτοντας τις Doppler συχνότητες που αντιστοιχούν στις ταχύτητες των στόχων.

Η ακρίβεια της εκτίμησης εξαρτάται από τον αριθμό των παλμών και τη συχνότητα επανάληψής τους (PRF), ενώ υπάρχει και ένας περιορισμός στο μέγιστο ανιχνεύσιμο Doppler (Doppler ambiguity).

3.8.6 Εκτίμηση Γωνίας και Beamforming

Η χρήση πολλαπλών στοιχείων κεραίας επιτρέπει την εκτίμηση της γωνίας άφιξης των σημάτων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω τεχνικών beamforming, όπου το σύστημα «σαρώνει» διαφορετικές γωνίες και υπολογίζει την ισχύ του σήματος για κάθε κατεύθυνση.

Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται χωρικοί χάρτες, στους οποίους κάθε κατεύθυνση αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη γωνία άφιξης. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στη χρήση steering vectors, που περιγράφουν τη φασική σχέση μεταξύ των στοιχείων της κεραίας για κάθε γωνία.

3.8.7 Ανάλυση (Resolution)

Η ικανότητα ενός συστήματος να διακρίνει δύο κοντινούς στόχους καθορίζεται από την ανάλυση (resolution) σε κάθε διάσταση.

3.8.7.1 Ανάλυση Απόστασης (Range Resolution)

Η ανάλυση κατά απόσταση εξαρτάται από το εύρος ζώνης B του σήματος:

$$\Delta R = \frac{c}{2B}$$

Μεγαλύτερο εύρος ζώνης οδηγεί σε καλύτερη διάκριση στόχων που βρίσκονται κοντά μεταξύ τους.

3.8.7.2 Ανάλυση Ταχύτητας (Doppler Resolution)

Η ανάλυση κατά Doppler ΔfD εξαρτάται από τη συνολική διάρκεια παρατήρησης:

$$\Delta fD = \frac{1}{Tobs}$$

Όπου,

$$Tobs = N \cdot \text{PRI}$$

$Tobs$ ο χρόνος παρατήρησης και N είναι ο αριθμός των παλμών (ή επαναλήψεων σήματος).
Η αντίστοιχη ανάλυση ταχύτητας είναι: $\Delta u = \frac{\lambda}{2Tobs}$

3.8.7.3 Ανάλυση Γωνίας (Angle Resolution)

Η ανάλυση γωνίας εξαρτάται από το άνοιγμα της στοιχειοκεραίας και τον αριθμό στοιχείων

$$\Delta\theta \approx \frac{\lambda}{D}$$

όπου D είναι το συνολικό μήκος της διάταξης.

Μεγαλύτερες κεραίες ή περισσότερα στοιχεία οδηγούν σε καλύτερη χωρική ανάλυση.

3.8.8 Χάρτες Range-Angle και Range-Velocity

Συνδυάζοντας τις παραπάνω τεχνικές, είναι δυνατή η δημιουργία δισδιάστατων χαρτών που απεικονίζουν το περιβάλλον:

- **Range–Angle map**: απεικονίζει την ισχύ των ανακλάσεων ως συνάρτηση της απόστασης και της γωνίας.
- **Range–Velocity map**: απεικονίζει την ισχύ ως συνάρτηση της απόστασης και της ταχύτητας.

Οι χάρτες αυτοί παρέχουν μια ολοκληρωμένη εικόνα του περιβάλλοντος, επιτρέποντας τον εντοπισμό και την παρακολούθηση στόχων.

3.8.9 Καταστολή Clutter

Σε πραγματικά περιβάλλοντα, μέρος των ανακλάσεων προέρχεται από ανεπιθύμητες ανακλάσεις από στατικά αντικείμενα (clutter – π.χ. από το έδαφος, τη βλάστηση κλπ), τα οποία δεν παρουσιάζουν Doppler μετατόπιση. Η απομάκρυνση αυτών των συνιστωσών είναι σημαντική για την καλύτερη ανίχνευση κινούμενων στόχων.

Ένας τρόπος να γίνει αυτό είναι η αφαίρεση της μέσης τιμής κατά τον άξονα slow-time, η οποία μειώνει τη συνεισφορά του clutter.

3.9 Ενοποίηση Επικοινωνίας και Sensing (ISAC)

Η βασική ιδέα των συστημάτων ISAC είναι η χρήση ενός ενιαίου σήματος για την ταυτόχρονη υποστήριξη επικοινωνίας και sensing. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά συστήματα, όπου οι δύο λειτουργίες υλοποιούνται με ξεχωριστές υποδομές και φασματικούς πόρους, εδώ επιτυγχάνεται σύγκλιση σε ένα κοινό πλαίσιο, με στόχο τη βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων.

Στο πλαίσιο αυτό, το ίδιο OFDM σήμα χρησιμοποιείται αφενός για τη μετάδοση δεδομένων και αφετέρου για την ανίχνευση στόχων μέσω των ανακλάσεων. Τα σύμβολα πληροφορίας μεταφέρονται κανονικά προς τον δέκτη, ενώ ταυτόχρονα οι ανακλώμενες συνιστώσες του σήματος περιέχουν πληροφορία για το περιβάλλον, όπως αποστάσεις, ταχύτητες και γωνίες στόχων.

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό των ISAC συστημάτων είναι ότι το κανάλι μετάδοσης παύει να αντιμετωπίζεται αποκλειστικά ως πηγή παραμόρφωσης. Αντίθετα, οι πολλαπλές διαδρομές (multipath), οι καθυστερήσεις και οι Doppler μετατοπίσεις αξιοποιούνται ως φορείς πληροφορίας για sensing. Με τον τρόπο αυτό, έννοιες που στη θεωρία επικοινωνιών θεωρούνται ανεπιθύμητες (όπως οι ανακλάσεις) αποκτούν λειτουργικό ρόλο.

Η ενοποίηση αυτή προσφέρει πλεονεκτήματα. Αρχικά, επιτυγχάνεται πιο αποδοτική χρήση του φάσματος, καθώς δεν απαιτείται διαχωρισμός πόρων μεταξύ επικοινωνίας και radar. Επιπλέον,

μειώνεται η ανάγκη για ξεχωριστό υλικό εξοπλισμό, οδηγώντας σε πιο απλές και ενεργειακά αποδοτικές αρχιτεκτονικές. Παράλληλα, καθίσταται δυνατή η υλοποίηση προηγμένων εφαρμογών, όπως αυτόνομα οχήματα, έξυπνα περιβάλλοντα, βιομηχανική αυτοματοποίηση και συστήματα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο.

Ωστόσο, η σύγκλιση επικοινωνίας και sensing συνοδεύεται από σημαντικές τεχνικές προκλήσεις. Οι απαιτήσεις των δύο λειτουργιών συχνά είναι αντικρουόμενες: τα συστήματα επικοινωνίας επιδιώκουν υψηλό ρυθμό μετάδοσης και ανθεκτικότητα σε θόρυβο, ενώ τα συστήματα radar απαιτούν υψηλή χρονική και φασματική ανάλυση για ακριβή εκτίμηση παραμέτρων. Συνεπώς, η σχεδίαση κατάλληλων κυματομορφών και αλγορίθμων που να επιτυγχάνουν ισορροπία μεταξύ των δύο αποτελεί βασικό ερευνητικό ζήτημα.

Επιπλέον, η ενοποίηση απαιτεί στενή συνεργασία μεταξύ διαφορετικών επιπέδων του συστήματος. Για παράδειγμα, η εκτίμηση καναλιού που χρησιμοποιείται για εξισορρόπηση - equalization μπορεί να αξιοποιηθεί και για sensing, ενώ οι τεχνικές beamforming εξυπηρετούν ταυτόχρονα την κατευθυντικότητα της επικοινωνίας και την εκτίμηση γωνίας στόχων. Αντίστοιχα, η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας επιτρέπει την εξαγωγή πληροφορίας τόσο για τα δεδομένα όσο και για τη δυναμική του περιβάλλοντος.

Συνολικά, τα ISAC συστήματα αποτελούν μια νέα παραδειγματική προσέγγιση στα ασύρματα δίκτυα, όπου η επικοινωνία και η αντίληψη του περιβάλλοντος συνυπάρχουν και αλληλοενισχύονται. Η κατανόηση των βασικών εννοιών που παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο αποτελεί απαραίτητη βάση για την ανάλυση και υλοποίηση τέτοιων συστημάτων, η οποία θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο.

4 *Υλοποίηση και Προσομοίωση Συστήματος ISAC*

4.1 Παράμετροι Συστήματος και Αρχικοποίηση

4.1.1 Ορισμός βασικών παραμέτρων OFDM συστήματος

Στο αρχικό στάδιο της προσομοίωσης πραγματοποιείται η αρχικοποίηση των βασικών παραμέτρων του συστήματος ISAC, οι οποίες καθορίζουν τη λειτουργία τόσο του υποσυστήματος επικοινωνίας όσο και του radar υποσυστήματος. Οι παράμετροι αυτές αφορούν τη δομή του OFDM σήματος, τη διαμόρφωση, τη συχνότητα λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά του καναλιού.

Το OFDM σύστημα υλοποιήθηκε με μέγεθος FFT ίσο με NFFT=64 και cyclic prefix μήκους 16 δειγμάτων, με στόχο τη μείωση της διασυμβολικής παρεμβολής (ISI). Για τη διαμόρφωση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε QPSK.

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για λόγο σήματος προς θόρυβο SNR=15 dB, ενώ η φέρουσα συχνότητα επιλέχθηκε στα 5.8 GHz. Με βάση τη φέρουσα συχνότητα υπολογίζεται το μήκος κύματος του συστήματος, το οποίο χρησιμοποιείται τόσο στον υπολογισμό Doppler όσο και στη λειτουργία beamforming του radar συστήματος.

Επιπλέον, ορίστηκε συχνότητα δειγματοληψίας 20 MHz και γωνία επικοινωνίας 30^{o}, η οποία αντιστοιχεί στη βασική κατεύθυνση μετάδοσης του σήματος.

```
%% PARAMETERS

Nfft = 64;
cpLen = 16;
M = 4;                          % QPSK

SNRdB = 15;

fc = 5.8e9;
c = physconst('LightSpeed');
lambda = c/fc;
Fs = 20e6;

signalAngle = 30;               % communication angle
phi = 0;
```

Εικόνα 5: παράμετροι OFDM

4.1.2 Καθορισμός Pilot και Data Subcarriers

Μετά τον ορισμό των βασικών παραμέτρων του συστήματος, πραγματοποιείται η κατανομή των OFDM υποφερόντων σε pilot και data subcarriers. Η διαδικασία αυτή γίνεται ώστε το σύστημα να μπορεί να εκτελεί εκτίμηση καναλιού και αντιστάθμιση των επιδράσεων του καναλιού κατά τη λήψη.

Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιείται περιοδική εισαγωγή pilot υποφερόντων ανά οκτώ subcarriers. Πιο συγκεκριμένα, ως pilot subcarriers επιλέγονται οι θέσεις 1,9,17,…,57, ενώ τα υπόλοιπα υποφέροντα χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων.

Ο συνολικός αριθμός pilot υποφερόντων και data υποφερόντων υπολογίζεται δυναμικά μέσω του κώδικα, ώστε η δομή του OFDM frame να προσαρμόζεται αυτόματα στις επιλεγμένες παραμέτρους του συστήματος.

Για τα pilot symbols χρησιμοποιείται γνωστό QPSK σύμβολο μοναδιαίας ισχύος, το οποίο είναι διαθέσιμο τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη. Με βάση τα λαμβανόμενα pilot symbols πραγματοποιείται αργότερα η εκτίμηση του καναλιού και η αντιστάθμιση Doppler.

```
%% PILOT / DATA SUBCARRIERS

pilotIdx = 1:8:Nfft;            % pilots 1,9,17,.. bla bla..,57
dataIdx  = setdiff(1:Nfft, pilotIdx);
numPilots = length(pilotIdx);
numDataCarriers = length(dataIdx);

pilotSymbol = (1+1j)/sqrt(2);   % known QPSK pilot
```

Εικόνα 6: Pilots και data subcarriers

4.1.3 Δημιουργία Δεδομένων και QPSK Διαμόρφωση

Στο επόμενο στάδιο της προσομοίωσης δημιουργούνται τα δεδομένα προς μετάδοση και εφαρμόζεται η διαδικασία ψηφιακής διαμόρφωσης. Αρχικά παράγεται ένα τυχαίο μήνυμα από 1000 ASCII χαρακτήρες κεφαλαίων γραμμάτων της αγγλικής αλφαβήτου. Η χρήση τυχαίων δεδομένων επιτρέπει την αξιολόγηση της λειτουργίας του συστήματος υπό γενικές συνθήκες μετάδοσης.

Στη συνέχεια, οι ASCII χαρακτήρες μετατρέπονται σε δυαδική μορφή μέσω αναπαράστασης 8 bits ανά χαρακτήρα. Τα παραγόμενα bits αναδιαμορφώνονται σε σειριακή μορφή ώστε να μπορούν να εισαχθούν στη διαδικασία διαμόρφωσης.

Για τη διαμόρφωση των δεδομένων χρησιμοποιείται QPSK, όπου κάθε σύμβολο μεταφέρει δύο bits πληροφορίας. Επιπλέον, εφαρμόζεται μετατόπιση φάσης π/4, η οποία συμβάλλει στη βελτίωση της συμπεριφοράς του αστερισμού κατά τη μετάδοση.

Το αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι μια ακολουθία μιγαδικών QPSK συμβόλων, η οποία χρησιμοποιείται αργότερα για τη δημιουργία των OFDM frames.

```
%% MESSAGE => BITS

msgLength = 1000;
msgASCII = randi([65 90], msgLength, 1);   % A-Z

bits = reshape(de2bi(msgASCII,8,'left-msb').',[],1);
```

```
%% QPSK MODULATION

txSymbols = pskmod(bits,M,pi/4,'InputType','bit');
```

Εικόνα 7: Μήνυμα και QPSK

4.1.4 Οργάνωση OFDM Συμβόλων και Χρονικές Παράμετροι

Μετά τη διαδικασία διαμόρφωσης, τα QPSK σύμβολα οργανώνονται κατάλληλα ώστε να δημιουργηθούν τα OFDM σύμβολα που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη μετάδοση. Αρχικά υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός OFDM συμβόλων που απαιτούνται για τη μετάδοση όλων των δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψη τον διαθέσιμο αριθμό data subcarriers ανά OFDM frame.

Επειδή ο συνολικός αριθμός QPSK συμβόλων δεν είναι απαραίτητα ακέραιο πολλαπλάσιο των διαθέσιμων υποφερόντων δεδομένων, πραγματοποιείται padding με μηδενικά σύμβολα ώστε να συμπληρωθεί πλήρως το τελευταίο OFDM σύμβολο. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αναδιαμορφώνονται σε μορφή πίνακα, όπου κάθε στήλη αντιστοιχεί σε ένα OFDM σύμβολο.

Ακολούθως υπολογίζεται το συνολικό μήκος κάθε OFDM συμβόλου, συμπεριλαμβανομένου του cyclic prefix, καθώς και η χρονική διάρκειά του. Η διάρκεια αυτή χρησιμοποιείται αργότερα τόσο στον υπολογισμό Doppler για το επικοινωνιακό κανάλι όσο και στην επεξεργασία radar.

Επιπλέον, ορίζονται δύο διαφορετικοί χρονικοί άξονες slow-time:

- Ο πρώτος χρησιμοποιείται για την επικοινωνιακή λειτουργία του συστήματος.

- Ο δεύτερος χρησιμοποιείται για τη radar επεξεργασία μέσω της έννοιας του Pulse Repetition Interval (PRI).

Από το PRI προκύπτει επίσης η συχνότητα επανάληψης παλμών (PRF), η οποία χρησιμοποιείται αργότερα για τον υπολογισμό του άξονα ταχύτητας στο radar σύστημα.

```
%% OFDM PARAMETERS

numOFDMsymbols = ceil(length(txSymbols)/numDataCarriers);

symbolsPadded = [txSymbols; zeros(numOFDMsymbols*numDataCarriers - length(txSymbols),1)];

dataMatrix = reshape(symbolsPadded,numDataCarriers,numOFDMsymbols);

symbolLen = Nfft + cpLen;
T_OFDM = symbolLen/Fs;

% communication slow-time
timeSlow = (0:numOFDMsymbols-1)*T_OFDM;

% radar slow-time
PRI = 1e-3;
PRF = 1/PRI;
timeSlowRadar = (0:numOFDMsymbols-1)*PRI;
```

Εικόνα 8: OFDM και χρονικές παράμετροι

4.2 Δημιουργία OFDM frame και μοντελοποίηση κεραίων

4.2.1 Μοντελοποίηση Κεραιών και Διάταξης Λήψης

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται η μοντελοποίηση των κεραιών εκπομπής και λήψης που χρησιμοποιούνται στο ISAC σύστημα, καθώς και της γραμμικής διάταξης λήψης που αξιοποιείται για τη radar λειτουργία και την εκτίμηση γωνίας άφιξης των στόχων.

Για την κεραία εκπομπής χρησιμοποιείται το μοντέλο CosineAntennaElement του MATLAB, με εύρος λειτουργίας από 1 GHz έως 10 GHz, το οποίο καλύπτει τη συχνότητα λειτουργίας του συστήματος στα 5.8 GHz. Αντίστοιχα, για την κεραία λήψης χρησιμοποιείται επίσης μοντέλο cosine antenna element, με κατάλληλη ρύθμιση της παραμέτρου CosinePower, ώστε να επιτευχθεί πιο ομοιόμορφη λήψη σημάτων από διαφορετικές γωνίες.

Στη συνέχεια υπολογίζεται και απεικονίζεται το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας εκπομπής σε πολικές συντεταγμένες. Η απεικόνιση αυτή επιτρέπει την παρατήρηση της κατευθυντικότητας της κεραίας και της ενίσχυσης που παρέχει προς διαφορετικές γωνίες εκπομπής.

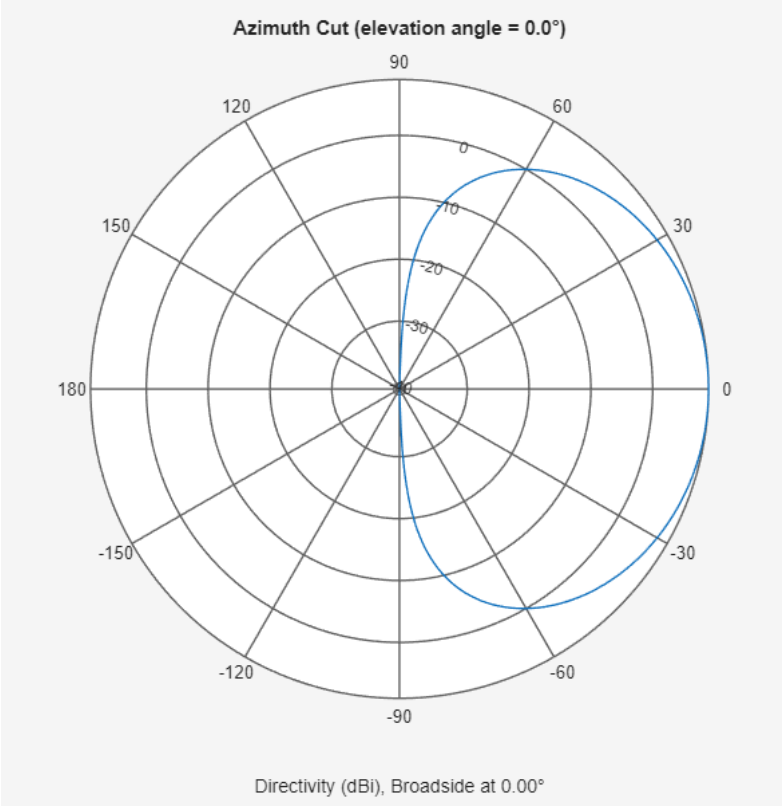
Για τη radar λειτουργία του συστήματος χρησιμοποιείται γραμμική διάταξη λήψης τύπου ULA (Uniform Linear Array) αποτελούμενη από οκτώ στοιχεία. Η απόσταση μεταξύ διαδοχικών στοιχείων

επιλέγεται ίση με λ/2, ώστε να αποφεύγεται η εμφάνιση spatial aliasing και να επιτυγχάνεται σωστή χωρική δειγματοληψία κατά την beamforming διαδικασία.

Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται αργότερα για την εκτίμηση γωνίας στόχων και τη δημιουργία των radar range-angle και range-velocity χαρτών.

```
%% TX / RX ANTENNAS

txAntenna = phased.CosineAntennaElement('FrequencyRange',[1e9 10e9]);
rxAntenna = phased.CosineAntennaElement('FrequencyRange',[1e9 10e9],'CosinePower',0);

theta = -90:0.5:90;
figure
pattern(txAntenna,fc,theta,phi,'CoordinateSystem','polar')
title('SDR1 TX Antenna Pattern')


%% RX ARRAY FOR RADAR / ISAC

numRx = 8;
d = lambda/2;
rxArray = phased.ULA('NumElements',numRx,'ElementSpacing',d);
```

Εικόνα 9: Διάταξη κεραιών



Εικόνα 10: Πολικό διάγραμμα αντινοβολίας της κεραίας εκπομπής

4.2.2 Κατασκευή OFDM Frame και Δημιουργία Κυματομορφής Μετάδοσης

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται η δημιουργία της OFDM κυματομορφής που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία επικοινωνίας του ISAC συστήματος. Αρχικά δημιουργείται το πλέγμα OFDM στο πεδίο της συχνότητας, στο οποίο εισάγονται τόσο τα pilot symbols όσο και τα δεδομένα πληροφορίας.

Για κάθε OFDM σύμβολο δημιουργείται ένα διάνυσμα μήκους Nfft, όπου συγκεκριμένες θέσεις αντιστοιχούν σε pilot subcarriers ενώ οι υπόλοιπες χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση των QPSK δεδομένων. Το πλέγμα αυτό αποθηκεύεται στον πίνακα txGrid, ο οποίος αναπαριστά την OFDM δομή στο πεδίο της συχνότητας.

Στη συνέχεια εφαρμόζεται αντίστροφος διακριτός μετασχηματισμός Fourier (IFFT), ώστε το σήμα να μεταφερθεί από το πεδίο της συχνότητας στο πεδίο του χρόνου. Μετά τον υπολογισμό του IFFT προστίθεται cyclic prefix, χρησιμοποιώντας τα τελευταία δείγματα του OFDM συμβόλου, με σκοπό τη μείωση της διασυμβολικής παρεμβολής (ISI) σε περιβάλλοντα πολλαπλών διαδρομών.

Έπειτα, κάθε OFDM σύμβολο ενισχύεται σύμφωνα με το antenna gain της κεραίας εκπομπής προς τη γωνία επικοινωνίας. Η ενίσχυση αυτή προκύπτει από το radiation pattern της κεραίας και εισάγει ρεαλιστικότερη μοντελοποίηση της ασύρματης μετάδοσης.

Τέλος, όλα τα OFDM σύμβολα μετατρέπονται σε μία ενιαία σειριακή κυματομορφή μετάδοσης, η οποία χρησιμοποιείται τόσο για τη λειτουργία επικοινωνίας όσο και για τη radar λειτουργία του συστήματος.

```
%% BUILD OFDM FRAME FOR COMMUNICATION

txFrame = zeros(symbolLen,numOFDMsymbols);
txGrid  = zeros(Nfft,numOFDMsymbols);   % frequency-domain OFDM grid

txGainComm = pattern(txAntenna,fc,signalAngle,phi);
txGainLinComm = 10^(txGainComm/20);

for k = 1:numOFDMsymbols
    ofdmFreq = zeros(Nfft,1);

    % insert pilots
    ofdmFreq(pilotIdx) = pilotSymbol;

    % insert data
    ofdmFreq(dataIdx) = dataMatrix(:,k);

    txGrid(:,k) = ofdmFreq;

    ifftData = ifft(ofdmFreq);
    cpData = ifftData(end-cpLen+1:end);
    txSymbol = [cpData; ifftData];

    % communication waveform
    txFrame(:,k) = txSymbol * txGainLinComm;
end

% serialized communication waveform
txOFDM = txFrame(:);
```

Εικόνα 11: OFDM Frame

4.3 Μοντελοποίηση Καναλιού Επικοινωνίας και Στόχων

4.3.1 Ορισμός Καναλιού Επικοινωνίας και Παραμέτρων Στόχων

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται η μοντελοποίηση του καναλιού επικοινωνίας και των στόχων που χρησιμοποιούνται για τη radar λειτουργία του ISAC συστήματος.

Αρχικά ορίζεται η σχετική ταχύτητα του δέκτη, η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της Doppler μετατόπισης της απευθείας διαδρομής επικοινωνίας. Η Doppler συχνότητα υπολογίζεται με βάση τη συχνότητα λειτουργίας και το μήκος κύματος του συστήματος.

Στη συνέχεια δημιουργείται ένα σύνολο τεχνητών στόχων για τους οποίους καθορίζονται:

- η απόσταση από το σύστημα
- η γωνία άφιξης
- η ακτινική ταχύτητα

Οι παράμετροι αυτές χρησιμοποιούνται αργότερα για την παραγωγή radar ανακλάσεων και τη δημιουργία των range - angle και range - velocity χαρτών.

Επιπλέον, σε κάθε στόχο αντιστοιχίζεται διαφορετικό υλικό επιφάνειας, όπως σίδηρος, αλουμίνιο, σκυρόδεμα, ξύλο ή πλαστικό. Για κάθε υλικό ορίζεται διαφορετική βασική τιμή Radar Cross Section (RCS), ώστε η προσομοίωση να προσεγγίζει πιο ρεαλιστικά τη συμπεριφορά διαφορετικών αντικειμένων ως προς την ανακλαστικότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

```
%% COMMUNICATION CHANNEL

% direct path Doppler
v_rx = 100;                     % receiver speed (m/s)
fd_comm = v_rx/lambda;          % one-way Doppler

% fake targets
targetRange = [30 55 70];       % meters
targetAngle = [20 -30 10];      % degrees
targetVel   = [-4 8 5];         % m/s

numTargets = length(targetRange);
targetRadialVel = targetVel;
```

```
%% TARGET MATERIALS / REFLECTIVITY

materialList = ["iron","aluminum","concrete","wood","plastic"];

targetMaterialIdx = randi(length(materialList), [1 numTargets]);
targetMaterial = materialList(targetMaterialIdx);

disp("materials:")
disp(targetMaterial)

materialBaseRCS = containers.Map;
materialBaseRCS("iron")     = 3.0;
materialBaseRCS("aluminum") = 2.0;
materialBaseRCS("concrete") = 0.5;
materialBaseRCS("wood")     = 0.1;
materialBaseRCS("plastic")  = 0.05;
```

Εικόνα 12: Κανάλι και στόχοι

4.3.2 Προσομοίωση Καναλιού Επικοινωνίας με Doppler και Ανακλάσεις Στόχων

Στο στάδιο αυτό υλοποιείται το κανάλι επικοινωνίας του συστήματος, στο οποίο περιλαμβάνεται τόσο η απευθείας μετάδοση μεταξύ πομπού και δέκτη όσο και οι ανακλάσεις από κινούμενους στόχους. Για κάθε OFDM σύμβολο υπολογίζεται αρχικά η συνιστώσα άμεσης διάδοσης, λαμβάνοντας υπόψη τη Doppler μετατόπιση που προκαλείται από την ταχύτητα του δέκτη.

Στη συνέχεια προσομοιώνονται πολλαπλές ανακλάσεις από στόχους διαφορετικής απόστασης, γωνίας και ταχύτητας. Για κάθε στόχο υπολογίζεται η χρονική καθυστέρηση διάδοσης με βάση τη συνολική διαδρομή του σήματος, ενώ εφαρμόζεται και επιπλέον Doppler μετατόπιση λόγω της σχετικής κίνησης του στόχου.

Η ισχύς της ανακλώμενης συνιστώσας εξαρτάται από:

- το υλικό του στόχου μέσω ενός συντελεστή ανακλαστικότητας (RCS factor)
- τη γωνία πρόσπτωσης
- τις απώλειες ελεύθερου χώρου
- τα κέρδη των κεραιών εκπομπής και λήψης προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση

Οι ανακλώμενες συνιστώσες προστίθενται στο απευθείας λαμβανόμενο σήμα, σχηματίζοντας το συνολικό λαμβανόμενο OFDM σήμα. Τέλος, προστίθεται λευκός προσθετικός Γκαουσιανός θόρυβος με καθορισμένη τιμή SNR ώστε να προσομοιωθούν πιο ρεαλιστικές συνθήκες καναλιού.

```
%% RECEIVED COMMUNICATION SIGNAL (DIRECT + REFLECTIONS)

rxComm = zeros(symbolLen,numOFDMsymbols);

for p = 1:numOFDMsymbols
    txPulse = txFrame(:,p);


    % DIRECT PATH

    dopplerPhaseComm = exp(1j*2*pi*fd_comm*timeSlow(p));

    % direct path gain
    rxGainComm_dB = pattern(rxAntenna,fc,signalAngle,phi);
    rxGainComm = 10^(rxGainComm_dB/20);

    directPath = txPulse * dopplerPhaseComm * rxGainComm;

    rxPulse = directPath;


    % REFLECTED PATHS FROM TARGETS

    for t = 1:numTargets
        rangeNow = targetRange(t) + targetRadialVel(t)*timeSlow(p);
        angleNow = targetAngle(t);
        velNow   = targetRadialVel(t);
```

```
        % total delay:

        totalPath = 2*rangeNow;   % monostatic
        delay = round(totalPath/c * Fs);

        reflected = zeros(symbolLen,1);
        if delay < symbolLen
            reflected(delay+1:end) = txPulse(1:end-delay);
        end

        % target material reflectivity
        baseRCS = materialBaseRCS(targetMaterial(t));

        % angle-dependent RCS
        aspectFactor = abs(cosd(angleNow))^2 + 0.2;

        % free-space loss
        rangeLoss = 1 / (rangeNow^2 + eps);

        % antenna gains toward target angle
        txGainTarget_dB = pattern(txAntenna,fc,angleNow,phi);
        txGainTarget = 10^(txGainTarget_dB/20);

        rxGainTarget_dB = pattern(rxAntenna,fc,angleNow,phi);
        rxGainTarget = 10^(rxGainTarget_dB/20);

        % reflected path amplitude
        echoAmp = sqrt(baseRCS * aspectFactor) * rangeLoss * txGainTarget * rxGainTarget;

        % reflected Doppler
        fd_reflect = 2*velNow/lambda;
        dopplerPhaseReflect = exp(1j*2*pi*fd_reflect*timeSlow(p));

        reflected = echoAmp * reflected * dopplerPhaseReflect;

        rxPulse = rxPulse + reflected;
    end

    rxComm(:,p) = rxPulse;

end

% add noise
rxComm = awgn(rxComm,SNRdB,'measured');
```

Εικόνα 13: Υλοποίηση καναλιού με direct path, ανακλάσεις στόχων και Doppler μετατόπιση

4.4 Αποδιαμόρφωση και Επεξεργασία OFDM Σήματος

4.4.1 OFDM Αποδιαμόρφωση Λαμβανόμενου Σήματος

Μετά την προσομοίωση του καναλιού επικοινωνίας, ακολουθεί η διαδικασία αποδιαμόρφωσης του λαμβανόμενου OFDM σήματος. Για κάθε OFDM σύμβολο αφαιρείται αρχικά το cyclic prefix, ώστε να διατηρηθεί μόνο το χρήσιμο χρονικό τμήμα του συμβόλου.

Στη συνέχεια εφαρμόζεται μετασχηματισμός FFT, με σκοπό τη μετατροπή του σήματος από το χρονικό πεδίο στο πεδίο συχνοτήτων. Με τον τρόπο αυτό ανακτώνται τα δεδομένα όλων των υποφερόντων του OFDM πλαισίου.

Τέλος, επιλέγονται μόνο τα υποφέροντα δεδομένων (data subcarriers), εξαιρώντας τις θέσεις των pilot symbols, ώστε να εξαχθούν τα λαμβανόμενα QPSK σύμβολα πριν από τη διαδικασία εκτίμησης καναλιού και ισοστάθμισης.

```
%% OFDM DEMODULATION (NO EQUALIZATION YET)

rxGrid = zeros(Nfft,numOFDMsymbols);

for k = 1:numOFDMsymbols
    rxSymbol = rxComm(:,k);
    rxSymbol = rxSymbol(cpLen+1:end);
    fftData = fft(rxSymbol);
    rxGrid(:,k) = fftData;
end

% raw received data (before equalization)
rxDataRaw = rxGrid(dataIdx,:);
rxDataRaw = rxDataRaw(:);
rxDataRaw = rxDataRaw(1:length(txSymbols));
```

Εικόνα 14: OFDM αποδιαμόρφωση και FFT στο λαμβανόμενο σήμα

4.4.2 Εκτίμηση Καναλιού με Pilot Symbols

Για την αντιστάθμιση των επιδράσεων του καναλιού εφαρμόζεται διαδικασία εκτίμησης καναλιού (channel estimation) με χρήση pilot symbols. Για κάθε OFDM σύμβολο εξάγονται αρχικά τα λαμβανόμενα pilot symbols και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα μεταδιδόμενα pilot σύμβολα. Η εκτίμηση του καναλιού πραγματοποιείται με τη μέθοδο Least Squares (LS), μέσω διαίρεσης του λαμβανόμενου σήματος με το γνωστό pilot σύμβολο.

Επειδή η εκτίμηση είναι διαθέσιμη μόνο στις θέσεις των pilot υποφερόντων, εφαρμόζεται παρεμβολή (interpolation) τύπου Piecewise Cubic Hermite (PCHIP), ώστε να εξαχθεί εκτίμηση του καναλιού για όλα τα υποφέροντα του OFDM πλαισίου.

```
%% CHANNEL ESTIMATION FROM PILOTS

Hpilots = zeros(numPilots,numOFDMsymbols);
HestAll = zeros(Nfft,numOFDMsymbols);

for k = 1:numOFDMsymbols
    Ypilots = rxGrid(pilotIdx,k);
    Xpilots = txGrid(pilotIdx,k);        % known pilots

    % LS channel estimate on pilots
    Hpilots(:,k) = Ypilots ./ Xpilots;

    % interpolate channel over all subcarriers
    HestAll(:,k) = interp1(pilotIdx, Hpilots(:,k), 1:Nfft, 'pchip', 'extrap').';
end
```

Εικόνα 15: Εκτίμηση καναλιού με pilot symbols

4.4.3 Εκτίμηση Doppler Μετατόπισης

Για την εκτίμηση της Doppler μετατόπισης χρησιμοποιήθηκαν τα pilot symbols του OFDM πλαισίου. Η βασική ιδέα είναι ότι η παρουσία Doppler προκαλεί σταδιακή μεταβολή της φάσης του καναλιού μεταξύ διαδοχικών OFDM συμβόλων.

Αρχικά υπολογίζεται η διαφορά φάσης μεταξύ διαδοχικών εκτιμήσεων καναλιού για κάθε pilot υποφέρουσα. Η διαδικασία πραγματοποιείται μέσω του γινομένου της επόμενης εκτίμησης με το συζυγές του προηγούμενου (συμβολίζεται με το *), ώστε να εξαχθεί η σχετική μεταβολή φάσης:

$$\Delta\phi = \angle\{(\mathrm{Hk}, \mathrm{n}+1) \cdot (\mathrm{Hk}, \mathrm{n}*)\}$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο μέσος όρος όλων των διαφορών φάσης μεταξύ pilots και OFDM συμβόλων, ώστε να προκύψει μία συνολική εκτίμησ η της Doppler μετατόπισης. Η τελική εκτίμηση της Doppler συχνότητας δίνεται από:

$$\mathrm{fd} = \frac{\Delta\phi}{2\pi\, \mathrm{T_{OFDM}}}$$

όπου T_{OFDM} είναι η διάρκεια ενός OFDM συμβόλου.

Η συγκεκριμένη μέθοδος επιτρέπει την εκτίμηση της σχετικής κίνησης μεταξύ πομπού και δέκτη.

```
%% DOPPLER ESTIMATION FROM PILOT PHASE EVOLUTION

pilotPhaseDiff = zeros(numPilots,numOFDMsymbols-1);

for kp = 1:numPilots
    for n = 1:numOFDMsymbols-1
        pilotPhaseDiff(kp,n) = angle(Hpilots(kp,n+1) * conj(Hpilots(kp,n)));
    end
end

% average phase change across pilots and symbols
meanPhaseStep = mean(pilotPhaseDiff(:));

% estimated Doppler
fd_est = meanPhaseStep / (2*pi*T_OFDM);
```

Εικόνα 16: Εκτίμηση ολίσθησης Doppler

4.4.4 Αντιστάθμιση Doppler και Επαναληπτική OFDM Επεξεργασία

Μετά την εκτίμηση της Doppler μετατόπισης εφαρμόζεται διαδικασία αντιστάθμισης της ολίσθησης Doppler στο λαμβανόμενο OFDM σήμα. Η αντιστάθμιση πραγματοποιείται μέσω μιγαδικού εκθετικού όρου αντίθετης φάσης, με σκοπό την αφαίρεση της χρονικά μεταβαλλόμενης περιστροφής φάσης που προκαλείται από το φαινόμενο Doppler.

Για κάθε OFDM σύμβολο το λαμβανόμενο σήμα πολλαπλασιάζεται με τον παράγοντα:

$$e^{-j2\pi fdt}$$

όπου fd είναι η εκτιμώμενη Doppler συχνότητα και t ο αντίστοιχος χρόνος slow-time.

Μετά την αντιστάθμιση, πραγματοποιείται εκ νέου OFDM αποδιαμόρφωση. Αρχικά αφαιρείται το cyclic prefix και στη συνέχεια εφαρμόζεται μετασχηματισμός FFT, ώστε να εξαχθούν τα διορθωμένα υποφέροντα στο πεδίο συχνοτήτων.

Η διαδικασία αυτή μειώνει σημαντικά την περιστροφή του αστερισμού QPSK και βελτιώνει την ποιότητα της επόμενης φάσης ισοστάθμισης καναλιού.

```
%% DOPPLER COMPENSATION USING ESTIMATED DOPPLER

rxCommComp = zeros(size(rxComm));

for p = 1:numOFDMsymbols
    rxCommComp(:,p) = rxComm(:,p) * exp(-1j*2*pi*fd_est*timeSlow(p));
end

% ksana FFT after Doppler compensation
rxGridComp = zeros(Nfft,numOFDMsymbols);

for k = 1:numOFDMsymbols
    rxSymbol = rxCommComp(:,k);
    rxSymbol = rxSymbol(cpLen+1:end);
    fftData = fft(rxSymbol);
    rxGridComp(:,k) = fftData;
end
```

Εικόνα 17: Αντιστάθμιση μετατόπισης Doppler και επαναληπτική OFDM αποδιαμόρφωση

4.4.5 Εκτίμηση Καναλιού μετά την Αντιστάθμιση Doppler και Ισοστάθμιση

Μετά την αντιστάθμιση της Doppler μετατόπισης πραγματοποιείται εκ νέου εκτίμηση του καναλιού, χρησιμοποιώντας τα διορθωμένα pilot symbols. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει ακριβέστερη εκτίμηση της συχνοτικής απόκρισης του καναλιού, καθώς έχει προηγηθεί η αφαίρεση της χρονικά μεταβαλλόμενης περιστροφής φάσης.

Η εκτίμηση καναλιού εφαρμόζεται αρχικά στις θέσεις των pilot υποφερουσών μέσω LS (Least Squares) εκτίμησης:

$$\hat{\mathrm{H}}(\mathrm{k}) = \frac{Y(k)}{\mathrm{X}(\mathrm{k})}$$

Y(k) είναι το λαμβανόμενο pilot σύμβολο, X(k) το γνωστό μεταδιδόμενο pilot, σύμβολο και $\hat{\mathrm{H}}(\mathrm{k})$ η εκτιμώμενη απόκριση καναλιού. Στη συνέχεια εφαρμόζεται παρεμβολή PCHIP (Piecewise Cubic Hermite Interpolation), ώστε να εξαχθεί η εκτίμηση καναλιού για όλα τα OFDM υποφέροντα. Με βάση την εκτιμημένη απόκριση καναλιού πραγματοποιείται ισοστάθμιση (equalization) του OFDM πλέγματος. Η ισοστάθμιση επιτυγχάνεται μέσω διαίρεσης του λαμβανόμενου σήματος με την εκτιμημένη απόκριση καναλιού ανά υποφέρον:

$$\mathrm{Yeq}(\mathrm{k}) = \frac{Y(k)}{\hat{\mathrm{H}}(\mathrm{k})}$$

```
%% KSANA ESTIMATE CHANNEL AFTER DOPPLER COMPENSATION

HpilotsComp = zeros(numPilots,numOFDMsymbols);
HestAllComp = zeros(Nfft,numOFDMsymbols);

for k = 1:numOFDMsymbols
    Ypilots = rxGridComp(pilotIdx,k);
    Xpilots = txGrid(pilotIdx,k);

    HpilotsComp(:,k) = Ypilots ./ Xpilots;

    %interpolation
    HestAllComp(:,k) = interp1(pilotIdx, HpilotsComp(:,k), 1:Nfft, 'pchip', 'extrap').';
end

%% EQUALIZATION

eqGrid = zeros(Nfft,numOFDMsymbols);

for k = 1:numOFDMsymbols
    eqGrid(:,k) = rxGridComp(:,k) ./ (HestAllComp(:,k) + eps);
end

rxDataEq = eqGrid(dataIdx,:);
rxDataEq = rxDataEq(:);
rxDataEq = rxDataEq(1:length(txSymbols));
```

Εικόνα 18: Επανεκτίμηση καναλιού μετά την αντιστάθμιση Doppler και διαδικασία ισοστάθμισης OFDM υποφερουσών

Στην ουσία υπάρχουν δύο στάδια OFDM αποδιαμόρφωσης. Το πρώτο στάδιο χρησιμοποιείται για εκτίμηση καναλιού και Doppler μετατόπισης, ενώ το δεύτερο στάδιο εφαρμόζεται μετά την αντιστάθμιση Doppler για την τελική αποδιαμόρφωση και ισοστάθμιση του σήματος.

4.4.6 Τελική Αποδιαμόρφωση και Ανάκτηση Μηνύματος

Μετά τη διαδικασία ισοστάθμισης πραγματοποιείται η τελική αποδιαμόρφωση των QPSK συμβόλων. Η αποδιαμόρφωση εφαρμόζεται στα διορθωμένα OFDM δεδομένα και οδηγεί στην ανάκτηση της αρχικής δυαδικής ακολουθίας bit.

Στη συνέχεια τα bits ομαδοποιούνται σε πακέτα των 8 bit, ώστε να πραγματοποιηθεί η ανακατασκευή των αρχικών ASCII χαρακτήρων του μεταδιδόμενου μηνύματος. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την επαναφορά του αρχικού μηνύματος πληροφορίας μετά από όλα τα στάδια μετάδοσης, επίδρασης καναλιού, εκτίμησης Doppler και ισοστάθμισης.

```
%% DEMODULATION AFTER EQUALIZATION

rxBits = pskdemod(rxDataEq,M,pi/4,'OutputType','bit');


%% MESSAGE RECONSTRUCTION

rxBytes = reshape(rxBits,8,[]).';
rxMessage = char(bi2de(rxBytes,'left-msb'));
```

Εικόνα 19: Τελική αποδιαμόρφωση QPSK και ανακατασκευή του λαμβανόμενου μηνύματος

4.5 Επεξεργασία Radar και Εξαγωγή Πληροφορίας Στόχων

4.5.1 Λήψη και Δημιουργία Radar Cube για Radar Επεξεργασία

Στο στάδιο αυτό υλοποιείται η προσομοίωση της λήψης radar σημάτων από την διάταξη κεραίας πολλών στοιχείων του ISAC συστήματος. Δημιουργείται ένας τρισδιάστατος πίνακας δεδομένων (radar cube), ο οποίος περιέχει πληροφορία ως προς τον χρόνο γρήγορης μεταβολής (fast-time), τον χρόνο αργής μεταβολής (slow-time) και τα στοιχεία της κεραίας λήψης.

Αρχικά δεσμεύεται ο πίνακας radarCube, διαστάσεων:

- fast-time : δείγματα κάθε OFDM συμβόλου
- slow-time : διαδοχικοί παλμοί / OFDM σύμβολα
- array dimension : στοιχεία κεραίας λήψης

Για κάθε OFDM παλμό υπολογίζεται η χρονικά μεταβαλλόμενη απόσταση κάθε στόχου, λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική ταχύτητα κίνησής του. Στη συνέχεια υπολογίζεται η καθυστέρηση διάδοσης δύο διαδρομών (two-way propagation delay) σύμφωνα με τη μονοστατική radar γεωμετρία.

Το ανακλώμενο σήμα δημιουργείται εφαρμόζοντας χρονική καθυστέρηση στο εκπεμπόμενο OFDM παλμό. Έπειτα υπολογίζεται το πλάτος της ανάκλασης με βάση:

- το υλικό του στόχου μέσω του συντελεστή ανακλαστικότητας (RCS)
- τη γωνία παρατήρησης (aspect angle)
- τις απώλειες ελεύθερου χώρου
- τα κέρδη εκπομπής και λήψης των κεραιών

Στη συνέχεια εφαρμόζεται η διπλής διαδρομής Doppler μετατόπιση του radar καναλιού, η οποία εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα του στόχου. Για τη χωρική μοντελοποίηση της λήψης χρησιμοποιείται διάνυσμα κατεύθυνσης (steering vector) της γραμμικής κεραίας ULA, ώστε κάθε στοιχείο του πίνακα να λαμβάνει διαφορετική φασική συνιστώσα ανάλογα με τη γωνία άφιξης του σήματος.

Τέλος, προστίθεται AWGN θόρυβος ώστε να προσομοιωθεί ρεαλιστικό περιβάλλον λήψης με συγκεκριμένο λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR).

Παρατηρείται ομοιότητα με το μοντέλο του υποκεφαλαίου 4.3.2, καθώς τόσο το επικοινωνιακό όσο και το radar υποσύστημα επηρεάζονται από κοινά φυσικά φαινόμενα καναλιού και ανάκλασης.

```
%% RECEIVED ARRAY DATA FOR RADAR

% radarCube: fast-time * slow-time * array

radarCube = zeros(symbolLen,numOFDMsymbols,numRx);

for p = 1:numOFDMsymbols
    tPulse = timeSlowRadar(p);
    txradarPulse = txFrame(:,p);

    for t = 1:numTargets
        % moving target range
        rangeNow = targetRange(t) + targetRadialVel(t)*tPulse;
        angleNow = targetAngle(t);
        velNow   = targetRadialVel(t);

        % two-way delay
        delay = round(2*rangeNow/c * Fs);

        % delayed echo
        reflected = zeros(symbolLen,1);
        if delay < symbolLen
            reflected(delay+1:end) = txradarPulse(1:end-delay);
        end

        % target material reflectivity
        baseRCS = materialBaseRCS(targetMaterial(t));

        % angle-dependent RCS
        aspectFactor = abs(cosd(angleNow))^2 + 0.2;

        % free-space loss
        rangeLoss = 1 / (rangeNow^2 + eps);
```

```
            % antenna gains toward target angle
            txGainTarget_dB = pattern(txAntenna,fc,angleNow,phi);
            txGainTarget = 10^(txGainTarget_dB/20);

            rxGainTarget_dB = pattern(rxAntenna,fc,angleNow,phi);
            rxGainTarget = 10^(rxGainTarget_dB/20);

            % effective echo amplitude
            echoAmp = sqrt(baseRCS * aspectFactor) * rangeLoss * txGainTarget * rxGainTarget;

            % two-way Doppler across slow-time
            fd_radar = 2*velNow/lambda;
            dopplerPhase = exp(1j*2*pi*fd_radar*tPulse);

            reflected = echoAmp * reflected * dopplerPhase;

            % steering vector
            steering = steervec(getElementPosition(rxArray)/lambda, angleNow);

            for k = 1:numRx
                radarCube(:,p,k) = radarCube(:,p,k) + reflected * steering(k);
            end
        end
    end

    radarCube = awgn(radarCube,SNRdB,'measured');
```

Εικόνα 20: Δημιουργία radar cube και προσομοίωση λήψης radar ανακλάσεων μέσω πολυκεραίακής διάταξης

4.5.2 Δημιουργία Χάρτη Απόστασης–Γωνίας (Range–Angle Map)

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται η εξαγωγή πληροφορίας απόστασης και γωνίας στόχων μέσω της δημιουργίας χάρτη Range–Angle. Ο χάρτης αυτός επιτρέπει την ταυτόχρονη εκτίμηση της θέσης των στόχων ως προς την απόσταση και τη γωνία άφιξης του ανακλώμενου σήματος.

Αρχικά επιλέγεται ένας radar παλμός (slow-time snapshot) και για κάθε στοιχείο της κεραίας λήψης υπολογίζεται η συσχέτιση (cross-correlation) μεταξύ του λαμβανόμενου σήματος και του εκπεμπόμενου OFDM παλμού αναφοράς. Η διαδικασία αυτή λειτουργεί ως προσαρμοσμένο φίλτρο (matched filtering) και οδηγεί στην εξαγωγή του προφίλ απόστασης (range profile).

Στη συνέχεια δημιουργείται ο άξονας απόστασης βάσει της συχνότητας δειγματοληψίας και της ταχύτητας διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος:

$$\mathrm{R} = \frac{c \cdot \mathrm{n}}{2\mathrm{Fs}}$$

Όπου, c είναι η ταχύτητα φωτός, Fs η συχνότητα δειγματοληψίας, ο παράγοντας 2 προκύπτει από τη διαδρομή μετάβασης και επιστροφής του radar σήματος και n τα delay bins.

Για κάθε πιθανή γωνία άφιξης εφαρμόζεται beamforming μέσω steering vectors της γραμμικής κεραίας ULA. Η διαδικασία beamforming υπολογίζει τη χωρική ισχύ λήψης για κάθε συνδυασμό απόστασης και γωνίας, δημιουργώντας τελικά τον δισδιάστατο χάρτη Range–Angle.

Τέλος πραγματοποιείται κανονικοποίηση του χάρτη και μετατροπή της ισχύος σε λογαριθμική κλίμακα dB για καλύτερη οπτικοποίηση των στόχων και περιορισμό του δυναμικού εύρους της απεικόνισης.

```
%% RANGE-ANGLE MAP

pRA = 1;
rangeProfileRA = zeros(symbolLen,numRx);

for k = 1:numRx
    corrSig = xcorr(radarCube(:,pRA,k), txFrame(:,1));
    rangeProfileRA(:,k) = corrSig(symbolLen:end);
end

rangeAxis = (0:symbolLen-1) * c/(2*Fs);
angles = -90:90;
rangeAngle = zeros(length(rangeAxis), length(angles));

for r = 1:length(rangeAxis)
    x = rangeProfileRA(r,:).';

    for a = 1:length(angles)
        steering = steervec(getElementPosition(rxArray)/lambda, angles(a));
        rangeAngle(r,a) = abs(steering' * x);
    end
end

rangeAngle = rangeAngle ./ (max(rangeAngle(:)) + eps);
rangeAngle_dB = 20*log10(rangeAngle + eps);
rangeAngle_dB(rangeAngle_dB < -20) = -20;
```

Εικόνα 21: Δημιουργία χάρτη Range - Angle

4.5.3 Δημιουργία Χάρτη Απόστασης–Ταχύτητας (Range–Velocity)

Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται η τελική επεξεργασία radar για την εξαγωγή του χάρτη απόστασης–ταχύτητας (Range–Velocity Map). Αρχικά, για κάθε κεραία λήψης και για κάθε OFDM παλμό εφαρμόζεται συσχέτιση (cross correlation) μεταξύ του λαμβανόμενου radar σήματος και του αντίστοιχου μεταδιδόμενουν OFDM συμβόλου. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται το rangeCube, το οποίο περιέχει την πληροφορία εμβέλειας για όλους τους παλμούς και όλα τα στοιχεία της διάταξης λήψης.

Στη συνέχεια εφαρμόζεται beamforming προς τη γωνία κάθε στόχου. Για κάθε στόχο υπολογίζεται το steering vector της διάταξης και συνδυάζονται τα σήματα όλων των κεραιών λήψης ώστε να ενισχυθούν τα σήματα που προέρχονται από τη συγκεκριμένη κατεύθυνση. Το αποτέλεσμα αποθηκεύεται στο targetRangeCube.

Έπειτα αφαιρείται η μέση τιμή κατά μήκος του slow-time άξονα, διαδικασία που λειτουργεί ως clutter suppression και μειώνει τα στατικά αντικείμενα ή τις σταθερές ανακλάσεις του περιβάλλοντος.

Για την εκτίμηση της ταχύτητας εφαρμόζεται μετασχηματισμός FFT κατά μήκος του slow-time άξονα. Η διαδικασία αυτή μετατρέπει τις μεταβολές φάσης σε συχνότητες Doppler, επιτρέποντας την εξαγωγή της σχετικής ταχύτητας των στόχων. Με χρήση της συνάρτησης fftshift το φάσμα Doppler κεντράρεται ώστε να εμφανίζονται τόσο θετικές όσο και αρνητικές ταχύτητες.

Στη συνέχεια δημιουργείται ο άξονας Doppler (fdAxis) και μετατρέπεται σε άξονα ταχύτητας (velAxis) με βάση τη σχέση:

$$u = \frac{\lambda \cdot fd}{2}$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος και fd η Doppler συχνότητα. Τέλος, ο χάρτης κανονικοποιείται και μετατρέπεται σε dB ώστε να είναι κατάλληλος για απεικόνιση και ανάλυση των στόχων.

```
%% RANGE PROCESSING FOR ALL PULSES

rangeCube = zeros(symbolLen,numOFDMsymbols,numRx);

for k = 1:numRx
    for p = 1:numOFDMsymbols
        corrSig = xcorr(radarCube(:,p,k), txFrame(:,p));
        rangeCube(:,p,k) = corrSig(symbolLen:end);
    end
end
```

```
%% BEAMFORM TOWARD EACH TARGET ANGLE

rvMap = zeros(symbolLen,numOFDMsymbols);

for t = 1:numTargets
    steeringTarget = steervec(getElementPosition(rxArray)/lambda, targetAngle(t));

    targetRangeCube = zeros(symbolLen,numOFDMsymbols);

    for p = 1:numOFDMsymbols
        for r = 1:symbolLen
            x = squeeze(rangeCube(r,p,:));
            targetRangeCube(r,p) = steeringTarget' * x;
        end
    end

    % remove static/clutter
    targetRangeCube = targetRangeCube - mean(targetRangeCube,2);
```

```
    % Doppler FFT across slow-time
    targetDoppler = fftshift(fft(targetRangeCube,[],2),2);
    rvMap = rvMap + abs(targetDoppler);
end


%% DOPPLER AXIS

fdAxis = (-numOFDMsymbols/2 : numOFDMsymbols/2-1) * (PRF/numOFDMsymbols);
velAxis = lambda*fdAxis/2;


%% NORMALIZATION

rvMap = rvMap ./ (max(rvMap(:)) + eps);
rvMap_dB = 20*log10(rvMap + eps);
rvMap_dB(rvMap_dB < -40) = -40;
```

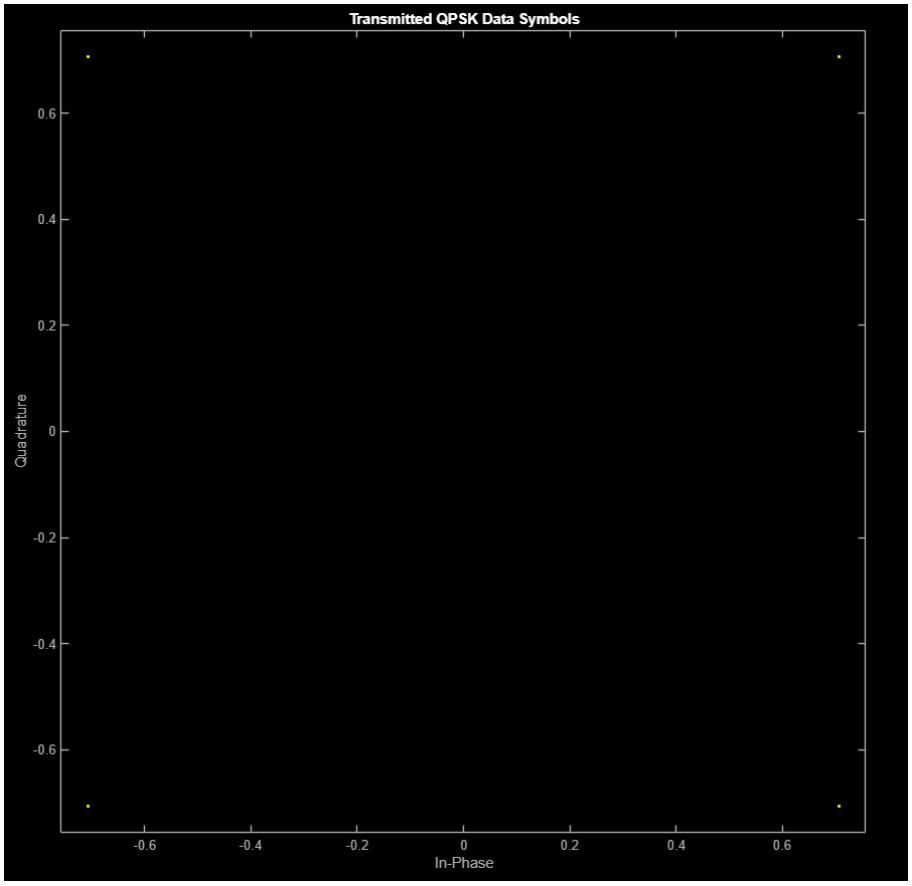
Εικόνα 22: Δημιουργία χάρτη Range-Velocity

5 Αποτελέσματα και Αξιολόγηση Συστήματος

5.1 Αποτελέσματα Συστήματος Επικοινωνίας

5.1.1 Αστερισμός Μεταδιδόμενου QPSK Σήματος

Σε αυτό το στάδιο παρουσιάζεται ο αστερισμός του μεταδιδόμενου QPSK σήματος πριν από την επίδραση του καναλιού επικοινωνίας, του θορύβου και του φαινομένου Doppler. Ο αστερισμός του ιδανικού QPSK αποτελείται από τέσσερα διακριτά σημεία με ίση απόσταση μεταξύ τους, τα οποία αντιστοιχούν στους τέσσερις δυνατούς συνδυασμούς δύο bits ανά σύμβολο. Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιείται περιστροφή φάσης π/4. Άρα τα σύμβολα βρίσκονται στις γωνίες π/4, 3π/4, 5π/4, 7π/4.



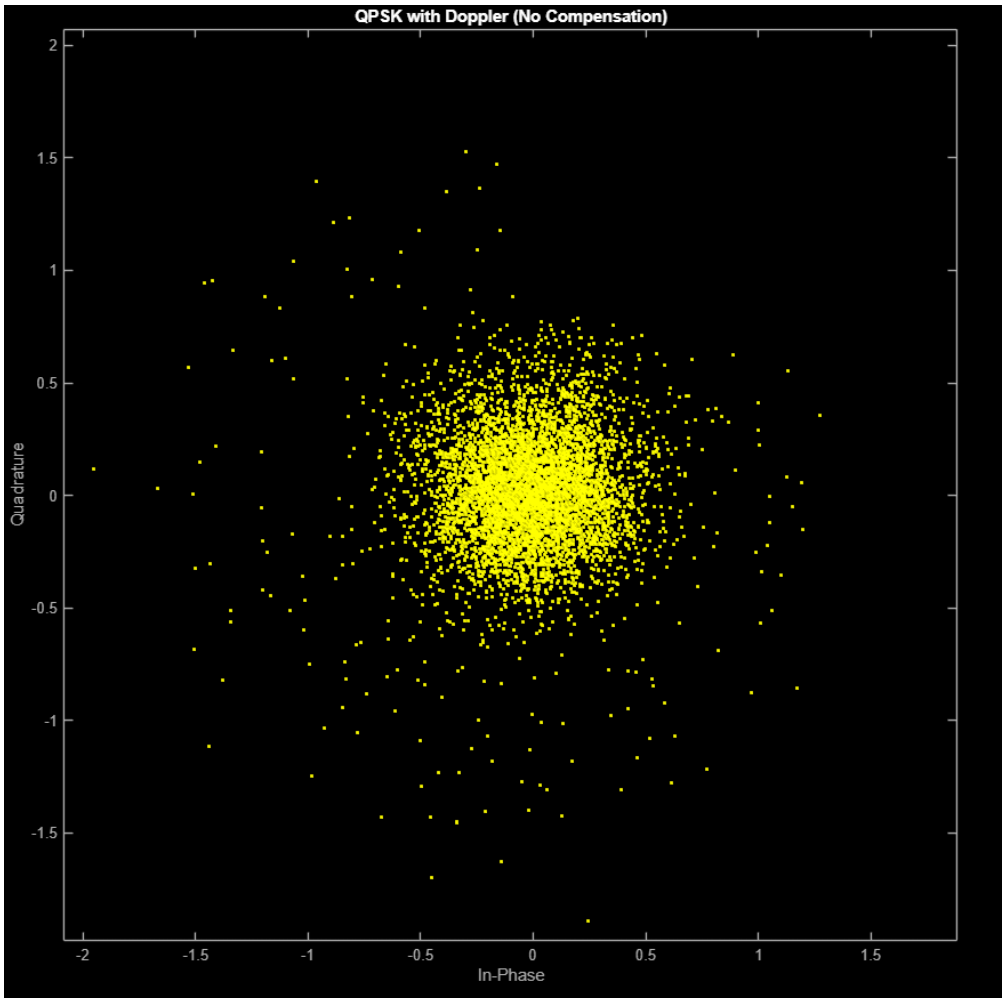
Εικόνα 23: Αστερισμός μεταδιδόμενου QPSK σήματος πριν από την επίδραση του καναλιού επικοινωνίας

Στην Εικόνα 23 παρατηρούνται τέσσερις καθαρά διαχωρισμένες συστάδες σημείων, γεγονός που επιβεβαιώνει την ορθή λειτουργία της διαμόρφωσης QPSK. Επειδή το σήμα δεν έχει ακόμη διέλθει από το κανάλι επικοινωνίας, δεν εμφανίζονται παραμορφώσεις πλάτους ή φάσης, ούτε επίδραση θορύβου ή Doppler μετατόπισης.

5.1.2 Αστερισμός Λαμβανόμενου Σήματος πριν από την Αντιστάθμιση Doppler

Μετά τη διέλευση του OFDM σήματος από το κανάλι επικοινωνίας, το λαμβανόμενο σήμα επηρεάζεται από θόρυβο, ανακλάσεις στόχων και μετατόπιση Doppler λόγω σχετικής κίνησης πομπού και δέκτη. Η μετατόπιση Doppler προκαλεί χρονικά μεταβαλλόμενη περιστροφή φάσης στα λαμβανόμενα σύμβολα, με αποτέλεσμα την παραμόρφωση του αστερισμού.

Στο παρόν στάδιο δεν έχει εφαρμοστεί ακόμη καμία τεχνική αντιστάθμισης Doppler ή ισοστάθμισης καναλιού. Για τον λόγο αυτό, ο αστερισμός εμφανίζει σημαντική διασπορά και απώλεια της ιδανικής μορφής QPSK.



Εικόνα 24: Αστερισμός λαμβανόμενου QPSK σήματος πριν από την αντιστάθμιση Doppler

Στην Εικόνα 24 παρατηρείται ότι τα σημεία του αστερισμού δεν παραμένουν συγκεντρωμένα στις ιδανικές θέσεις της QPSK διαμόρφωσης. Η περιστροφή και η διασπορά των συμβόλων οφείλονται κυρίως στη μετατόπιση Doppler και στις επιδράσεις του καναλιού πολλαπλών διαδρομών.

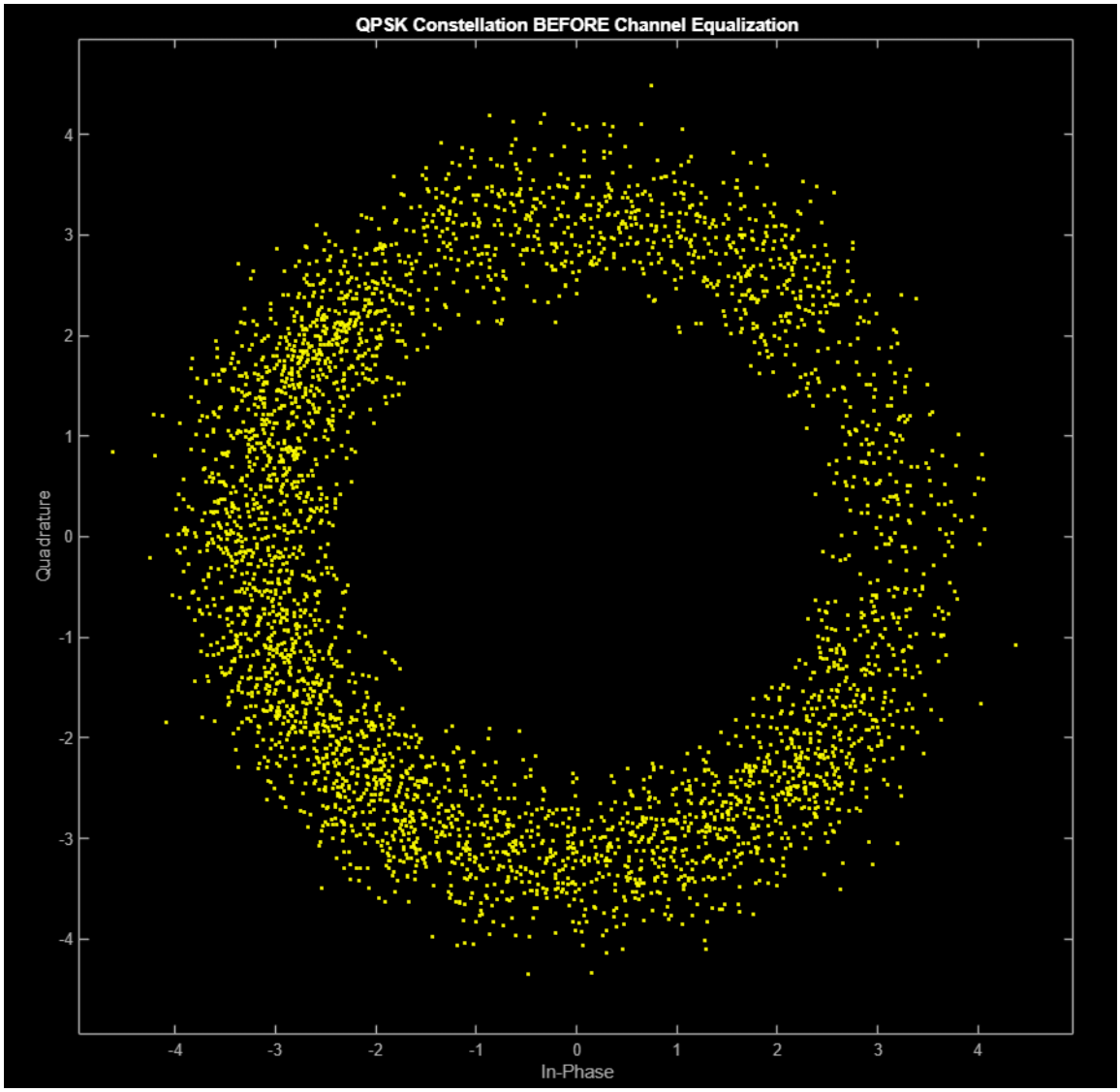
Η εικόνα αυτή επιβεβαιώνει ότι χωρίς αντιστάθμιση Doppler η ποιότητα της επικοινωνίας υποβαθμίζεται σημαντικά, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο ρυθμό σφαλμάτων κατά την αποδιαμόρφωση των δεδομένων.

Επιπλέον, παρατηρείται ότι τα σημεία του αστερισμού παρουσιάζουν τάση συγκέντρωσης προς το κέντρο του επιπέδου I/Q. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην εξασθένηση του σήματος λόγω απωλειών διάδοσης, θορύβου και πολλαπλών ανακλάσεων, οι οποίες μειώνουν το πλάτος των λαμβανόμενων συμβόλων και προκαλούν αλλοίωση της ιδανικής μορφής της διαμόρφωσης.

5.1.3 Αστερισμός πριν από την Ισοστάθμιση Καναλιού

Μετά την αποδιαμόρφωση OFDM μέσω της εφαρμογής του FFT και την αφαίρεση του cyclic prefix, εξάγονται τα λαμβανόμενα δεδομένα στο πεδίο της συχνότητας. Στο στάδιο αυτό το σήμα εξακολουθεί να επηρεάζεται από τις επιδράσεις του καναλιού επικοινωνίας, καθώς δεν έχει ακόμη εφαρμοστεί ισοστάθμιση καναλιού (channel equalization).

Ο αστερισμός που προκύπτει αποτυπώνει τις παραμορφώσεις που προκαλούνται από το φαινόμενο πολλαπλών διαδρομών, τη μεταβολή φάσης και τις διαφοροποιήσεις πλάτους μεταξύ των υποφερουσών OFDM.



Εικόνα 25: Αστερισμός QPSK μετά την OFDM αποδιαμόρφωση και πριν από την ισοστάθμιση καναλιού

Στην Εικόνα 25 παρατηρείται ότι τα σημεία του αστερισμού εξακολουθούν να εμφανίζουν σημαντική διασπορά και παραμόρφωση σε σχέση με τον ιδανικό QPSK αστερισμό. Παρότι έχει πραγματοποιηθεί OFDM αποδιαμόρφωση, δεν έχει ακόμη εφαρμοστεί πλήρης ισοστάθμιση καναλιού.

Η παραμόρφωση αυτή οφείλεται κυρίως στις μεταβολές πλάτους και φάσης του καναλιού, στις ανακλάσεις πολλαπλών διαδρομών, στις υπολειπόμενες Doppler παραμορφώσεις, καθώς και στην παρουσία θορύβου.

Το αποτέλεσμα αυτό αναδεικνύει την ανάγκη εφαρμογής τεχνικών εκτίμησης καναλιού και ισοστάθμισης, ώστε να αποκατασταθεί η αρχική μορφή των συμβόλων QPSK πριν από την τελική αποδιαμόρφωση.

Επιπλέον, παρατηρείται κυκλική κατανομή των σημείων του αστερισμού ("donut-shaped constellation"), όπου τα σύμβολα εμφανίζονται γύρω από το κέντρο του επιπέδου I/Q αντί να συγκεντρώνονται στις ιδανικές θέσεις QPSK.

5.1.4 Εκτίμηση Doppler από Pilot Symbols

Για την εκτίμηση της μετατόπισης Doppler αξιοποιήθηκαν τα pilot symbols που έχουν εισαχθεί σε προκαθορισμένες υποφέρουσες του OFDM πλαισίου. Η χρήση pilots επιτρέπει την παρακολούθηση των μεταβολών φάσης του καναλιού μεταξύ διαδοχικών OFDM συμβόλων και συνεπώς την εκτίμηση της μετατόπισης Doppler.

Αρχικά πραγματοποιείται εκτίμηση καναλιού στις θέσεις των pilot υποφερουσών μέσω της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων Least Squares (LS). Στη συνέχεια υπολογίζεται η διαφορά φάσης μεταξύ διαδοχικών OFDM συμβόλων για κάθε pilot, με σκοπό την εξαγωγή της μέσης χρονικής μεταβολής φάσης που προκαλείται από το φαινόμενο Doppler.

```
Estimated communication Doppler from pilots: 1941.02 Hz
True direct-path Doppler: 1934.67 Hz
```

Εικόνα 26: Εκτίμηση Doppler συχνότητας μέσω της εξέλιξης φάσης των pilot

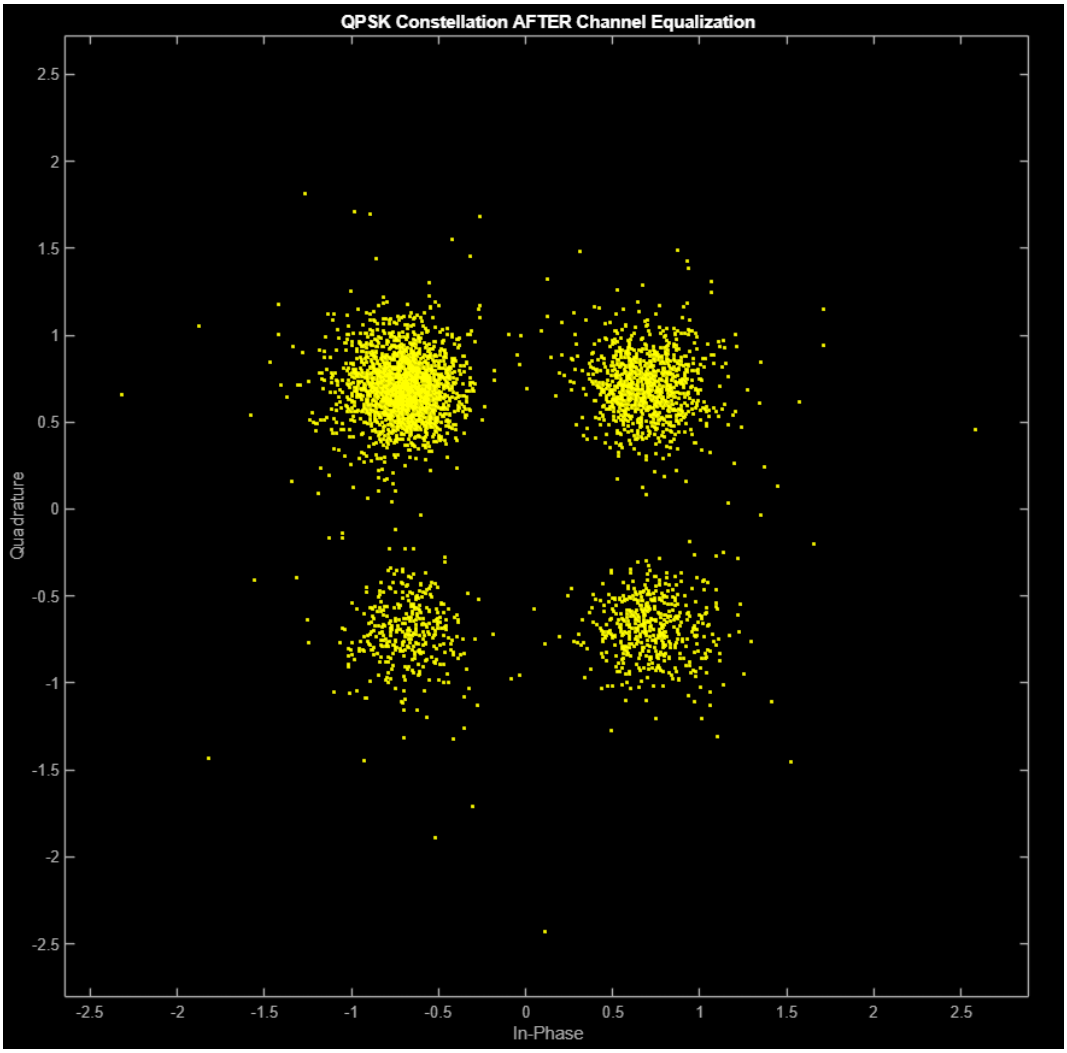
Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αποτελεσματική εκτίμηση της σχετικής κίνησης μεταξύ πομπού και δέκτη χωρίς την ανάγκη επιπλέον σημάτων συγχρονισμού. Η ακρίβεια της εκτίμησης εξαρτάται από παράγοντες όπως ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR), η πυκνότητα των pilot symbols, η ταχύτητα μεταβολής του καναλιού, και η ένταση των πολλαπλών ανακλάσεων.

5.1.5 Αντιστάθμιση Doppler και Ισοστάθμιση Καναλιού

Μετά την εκτίμηση της Doppler συχνότητας εφαρμόστηκε διαδικασία αντιστάθμισης Doppler (Doppler compensation), με στόχο τη μείωση των χρονικά μεταβαλλόμενων παραμορφώσεων φάσης που εισάγει η σχετική κίνηση μεταξύ πομπού, δέκτη και στόχων.

Η αντιστάθμιση πραγματοποιήθηκε με περιστροφή φάσης του λαμβανόμενου σήματος χρησιμοποιώντας την εκτιμώμενη Doppler συχνότητα. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εκ νέου OFDM αποδιαμόρφωση και νέα εκτίμηση καναλιού, ώστε να υπολογιστούν ακριβέστεροι συντελεστές καναλιού μετά τη διόρθωση Doppler.

Ακολούθησε ισοστάθμιση καναλιού (channel equalization), όπου κάθε υποφέρουσα διαιρέθηκε με την αντίστοιχη εκτίμηση του καναλιού. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την αντιστάθμιση των παραμορφώσεων πλάτους και φάσης που εισάγει το ασύρματο κανάλι.



Εικόνα 27: QPSK constellation μετά από Doppler compensation και channel equalization

Μετά την εφαρμογή αντιστάθμισης Doppler και εξισορρόπησης καναλιού παρατηρείται σημαντική βελτίωση της ποιότητας του αστερισμού QPSK. Τα σύμβολα συγκεντρώνονται πλέον κοντά στις ιδανικές θέσεις του QPSK αστερισμού, γεγονός που υποδεικνύει επιτυχημένη αντιστάθμιση των παραμορφώσεων του καναλιού. Παρά την ύπαρξη θορύβου και πολυδιαδρομικής διάδοσης, το τελικό αποτέλεσμα εμφανίζει σαφώς καλύτερη ποιότητα λήψης και μεγαλύτερη αξιοπιστία στην αποδιαμόρφωση των συμβόλων.

5.1.6 Ανακατασκευή και Ανάκτηση Μηνύματος

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας ισοστάθμισης πραγματοποιήθηκε η τελική αποδιαμόρφωση των συμβόλων QPSK με σκοπό την ανάκτηση της αρχικής δυαδικής πληροφορίας. Η αποδιαμόρφωση πραγματοποιήθηκε με χρήση της συνάρτησης pskdemod, η οποία μετατρέπει τα λαμβανόμενα QPSK σύμβολα σε ακολουθία bits. Στη συνέχεια, τα bits ομαδοποιήθηκαν ανά 8 ώστε να ανακατασκευαστούν τα αντίστοιχα bytes ASCII και να εξαχθεί το τελικό μήνυμα κειμένου.

```
Received message after pilot-based channel estimation and equalization:
I
F
Y
Y
A
Y
S
V
J
Y
D
V
F
S
N
Q
```

Εικόνα 28: ενδεικτικό απόσπασμα του ανακατασκευασμένου μηνύματος μετά την αποδιαμόρφωση και ισοστάθμιση

Η επιτυχής ανακατασκευή του μηνύματος επιβεβαιώνει ότι η ακολουθία: Εκτίμησης καναλιού, ισοστάθμισης Doppler και εξισορρόπησης καναλιού λειτούργησε αποτελεσματικά, επιτρέποντας την ανάκτηση της πληροφορίας. Παρά τις παραμορφώσεις που εισήχθησαν κατά τη διάδοση του σήματος, το σύστημα κατάφερε να αποκαταστήσει με επιτυχία τα QPSK σύμβολα και να επαναφέρει το αρχικό ψηφιακό μήνυμα.

```
Received message after pilot-based channel estimation and equalization:
h
e
l
l
o
h
e
l
l
o
```

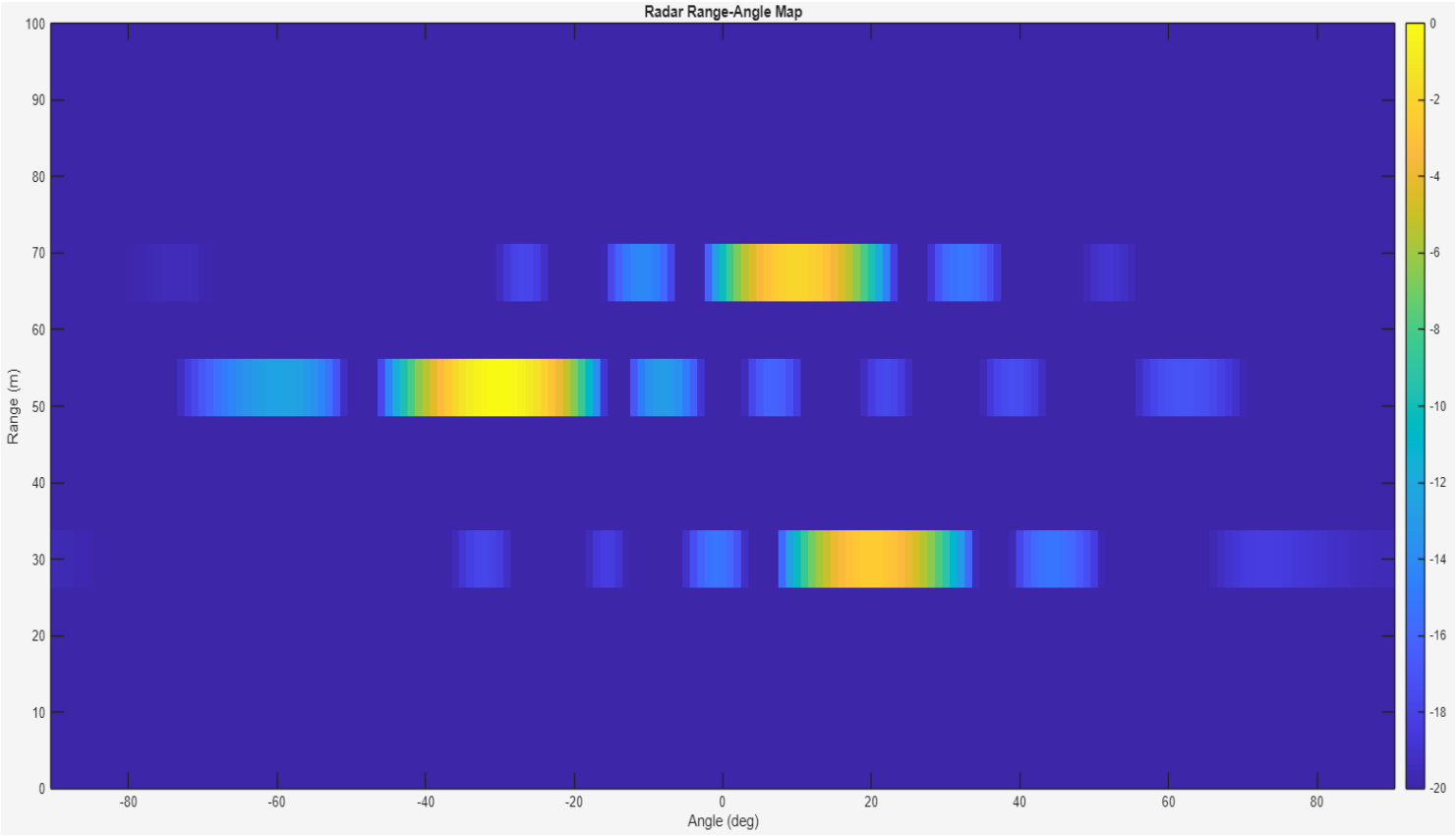
Εικόνα 29: ενδεικτικό απόσπασμα του ανακατασκευασμένου μηνύματος με γνωστό μήνυμα "hello"

5.2 Αποτελέσματα Radar Λειτουργίας

5.2.1 Χάρτης Range–Angle (Range–Angle Map)

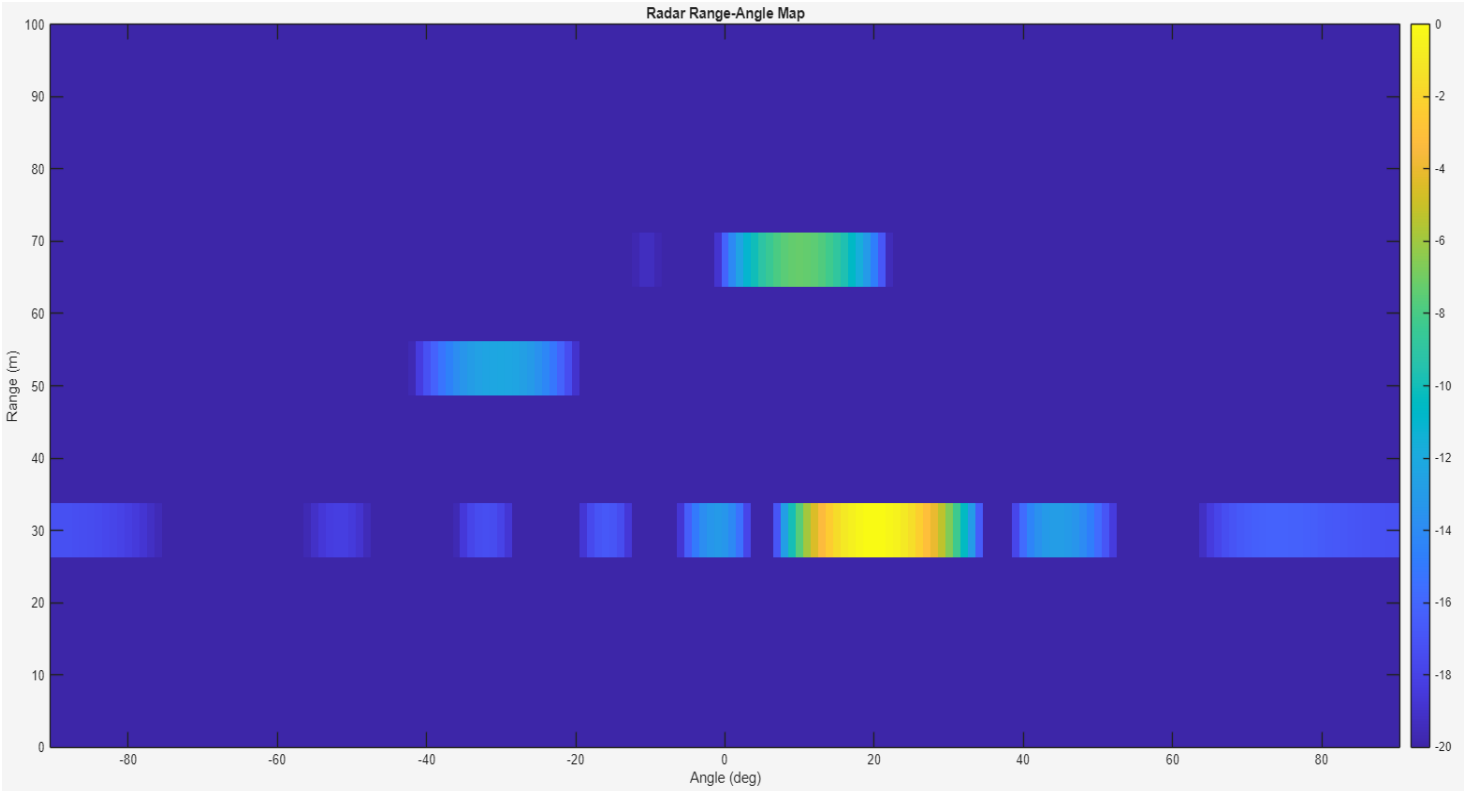
Για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων radar του ISAC συστήματος δημιουργήθηκε χάρτης Range–Angle (Range–Angle Map), ο οποίος απεικονίζει την εκτιμώμενη ισχύ ανακλάσεων συναρτήσει της απόστασης και της γωνίας άφιξης των στόχων.

Η επεξεργασία βασίστηκε στη συσχέτιση του λαμβανόμενου radar σήματος με το γνωστό OFDM σήμα εκπομπής, επιτρέποντας την εκτίμηση της χρονικής καθυστέρησης των ανακλάσεων και συνεπώς της απόστασης των στόχων. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε beamforming για διαφορετικές γωνίες χρησιμοποιώντας τη διάταξη κεραιών λήψης (ULA), ώστε να υπολογιστεί η κατεύθυνση άφιξης των ανακλώμενων σημάτων.



Εικόνα 30: Ενδεικτικό Range-Angle map για materials: "wood", "iron". "iron"

.



Εικόνα 31: Ενδεικτικό Range-Angle map για materials: "wood", "wood", "concrete"

Στις Εικόνα 30 και Εικόνα 31 παρατηρούνται διακριτές περιοχές αυξημένης ισχύος στις αποστάσεις και γωνίες όπου έχουν τοποθετηθεί οι στόχοι της προσομοίωσης. Οι κορυφές αυτές αντιστοιχούν στις ανακλάσεις των radar στόχων και επιβεβαιώνουν την ικανότητα του συστήματος να πραγματοποιεί ταυτόχρονη εκτίμηση απόστασης και γωνίας.

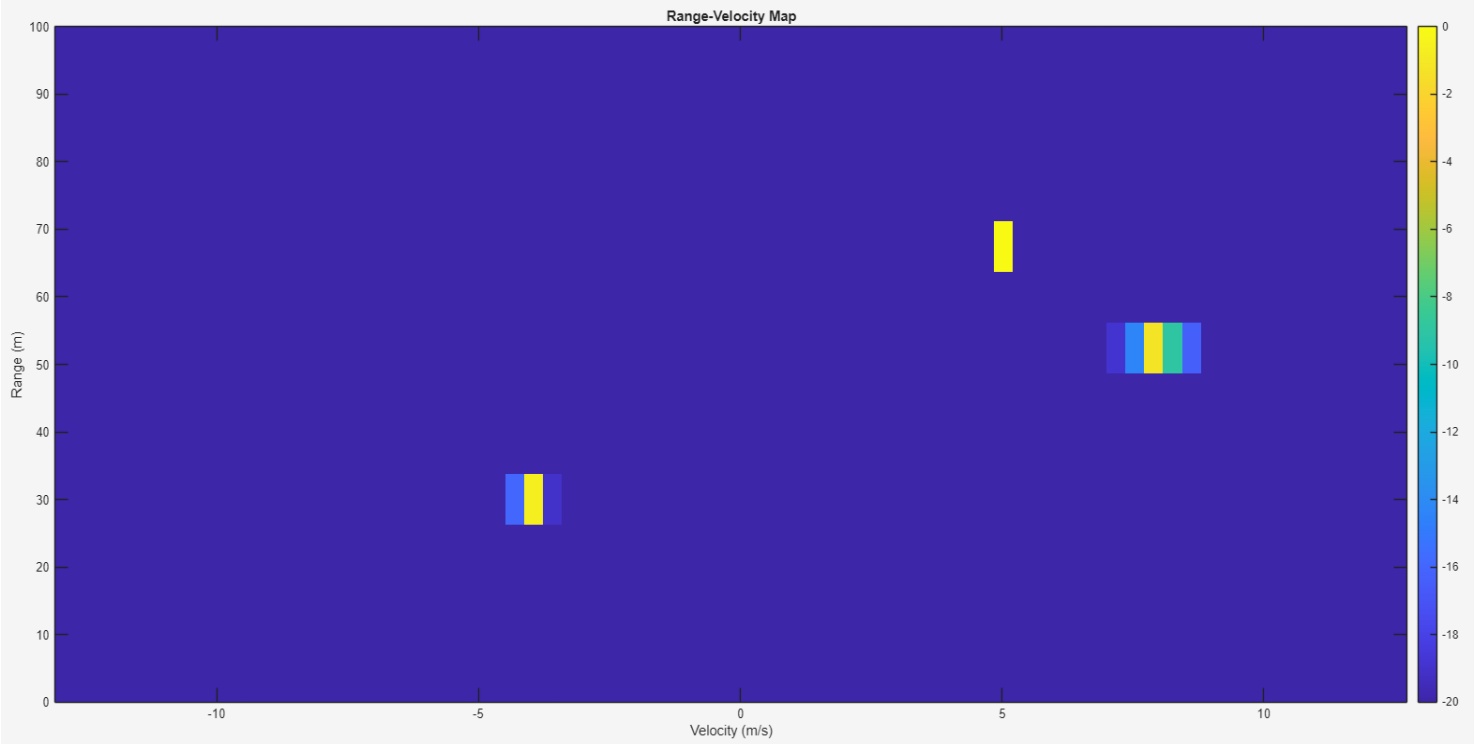
Επιπλέον, παρατηρείται ότι οι στόχοι με μεγαλύτερη ανακλαστικότητα (RCS) εμφανίζονται με ισχυρότερη ένταση, οι στόχοι σε μεγαλύτερες αποστάσεις παρουσιάζουν ασθενέστερες ανακλάσεις λόγω απωλειών διάδοσης, ενώ η χωρική επεξεργασία μέσω beamforming επιτρέπει τον διαχωρισμό στόχων που βρίσκονται σε διαφορετικές γωνίες.

5.2.2 Χάρτης Range–Velocity (Range–Velocity Map)

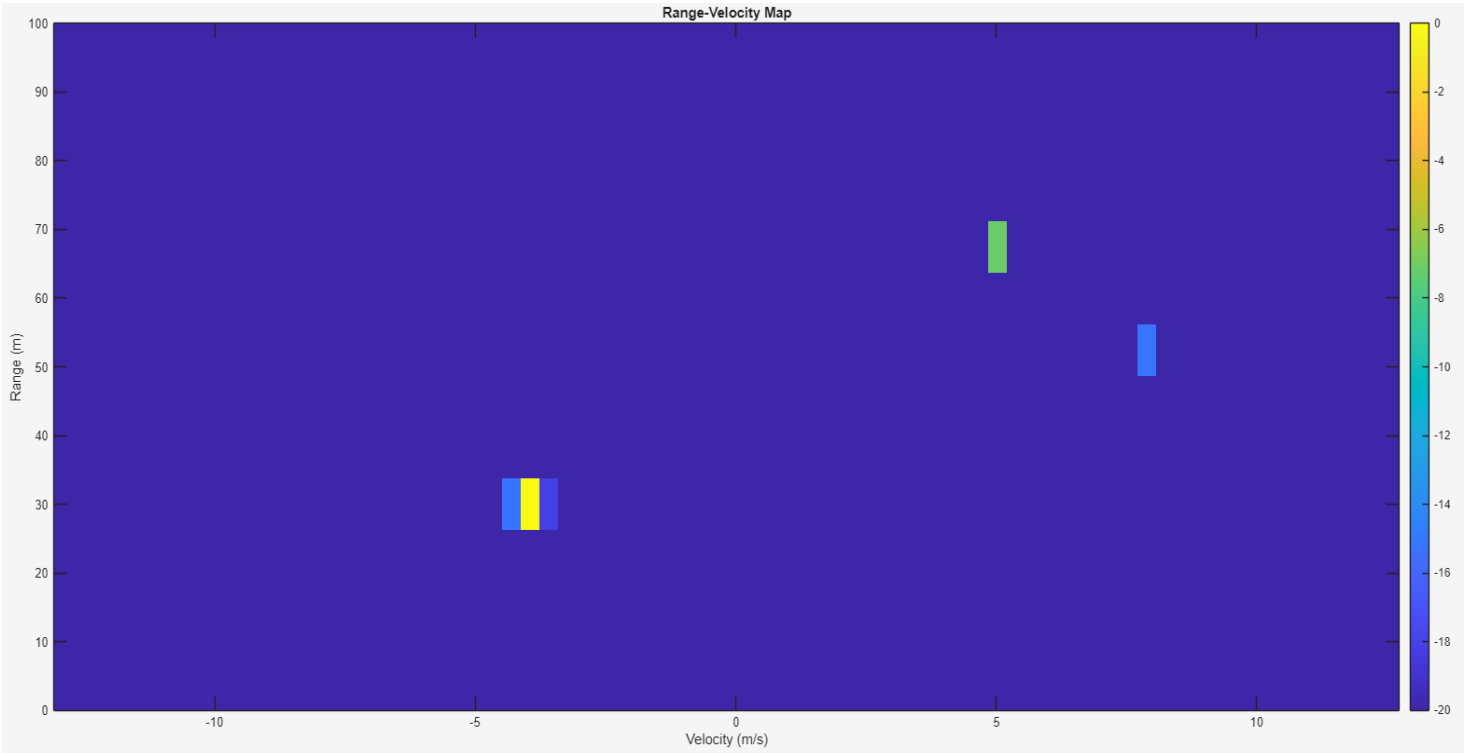
Για την εκτίμηση της ταχύτητας των στόχων δημιουργήθηκε χάρτης Range–Velocity (RV Map), ο οποίος απεικονίζει την κατανομή ισχύος συναρτήσει της απόστασης και της ακτινικής ταχύτητας των στόχων.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε range processing για όλους τους OFDM παλμούς μέσω συσχέτισης του λαμβανόμενου radar σήματος με το αντίστοιχο σήμα εκπομπής. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε beamforming προς τις γνωστές γωνίες των στόχων, ώστε να ενισχυθούν οι αντίστοιχες ανακλάσεις και να μειωθούν ανεπιθύμητες συνιστώσες.

Έπειτα αφαιρέθηκε η στατική συνιστώσα (static clutter removal) μέσω αφαίρεσης του μέσου όρου κατά τον άξονα slow-time. Τέλος εφαρμόστηκε FFT στον άξονα slow-time για την εξαγωγή της Doppler πληροφορίας και την εκτίμηση της ταχύτητας των στόχων.



Εικόνα 32: Ενδεικτικό Range-Velocity map για materials: "wood" , "wood", "concrete"



Εικόνα 33: Ενδεικτικό Range-Velocity map για materials: "wood", "iron", "iron"

Στις Εικόνα 32, Εικόνα 33 εμφανίζονται διακριτές κορυφές σε συγκεκριμένες αποστάσεις και ταχύτητες, οι οποίες αντιστοιχούν στους κινούμενους στόχους της προσομοίωσης. Οι κορυφές αυτές αποδεικνύουν ότι το σύστημα μπορεί να εκτιμήσει ταυτόχρονα τόσο τη θέση όσο και την ακτινική ταχύτητα των στόχων.

Παρατηρείται επίσης ότι: οι θετικές και οι αρνητικές Doppler μετατοπίσεις αντιστοιχούν σε στόχους που απομακρύνονται ή πλησιάζουν αντίστοιχα, οι στόχοι με μεγαλύτερη ανακλαστικότητα εμφανίζονται με υψηλότερη ένταση, ενώ η εφαρμογή beamforming και clutter removal βελτιώνει σημαντικά τη διακριτική ικανότητα του χάρτη. Η χρήση του άξονα ταχύτητας αντί απευθείας Doppler συχνότητας καθιστά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων πιο φυσική και άμεσα συνδεδεμένη με τη φυσική κίνηση των στόχων.

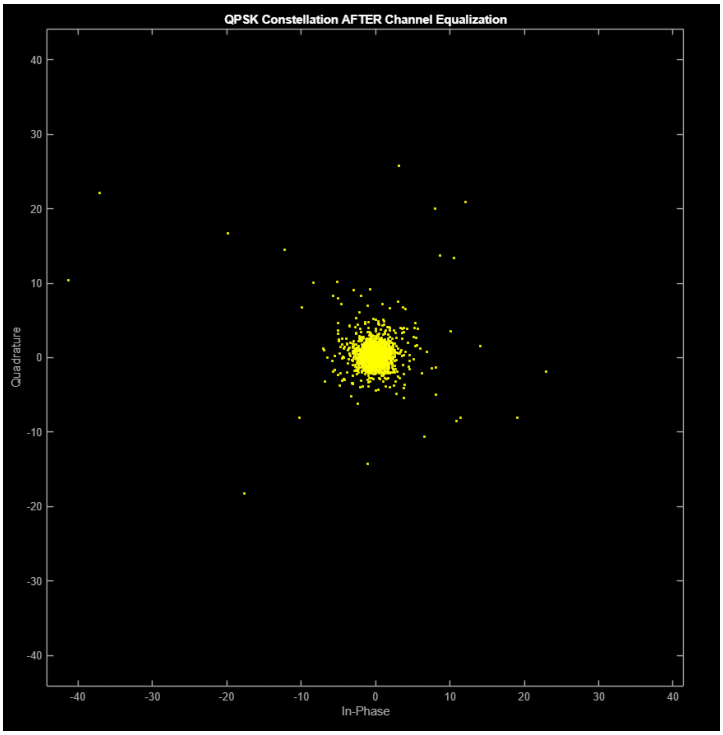
5.3 Πειραματική Αξιολόγηση και Παραμετρική Ανάλυση

5.3.1 Επίδραση του SNR στην Ποιότητα Επικοινωνίας

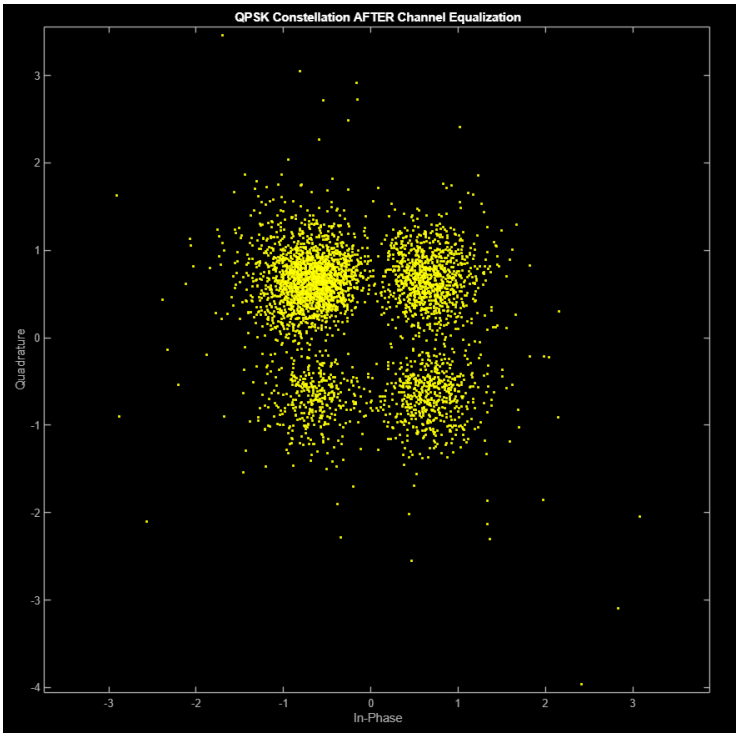
Στην παρούσα ενότητα μελετάται η επίδραση του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) στην απόδοση του προτεινόμενου OFDM ISAC συστήματος. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές εκτελέσεις της προσομοίωσης για διαφορετικές τιμές SNR, διατηρώντας σταθερές όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους του συστήματος.

Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε με βάση την ποιότητα του αστερισμού QPSK μετά την ισοστάθμιση καναλιού, τον ρυθμό σφαλμάτων bit (Bit Error Rate, BER), καθώς και το σφάλμα εκτίμησης Doppler.

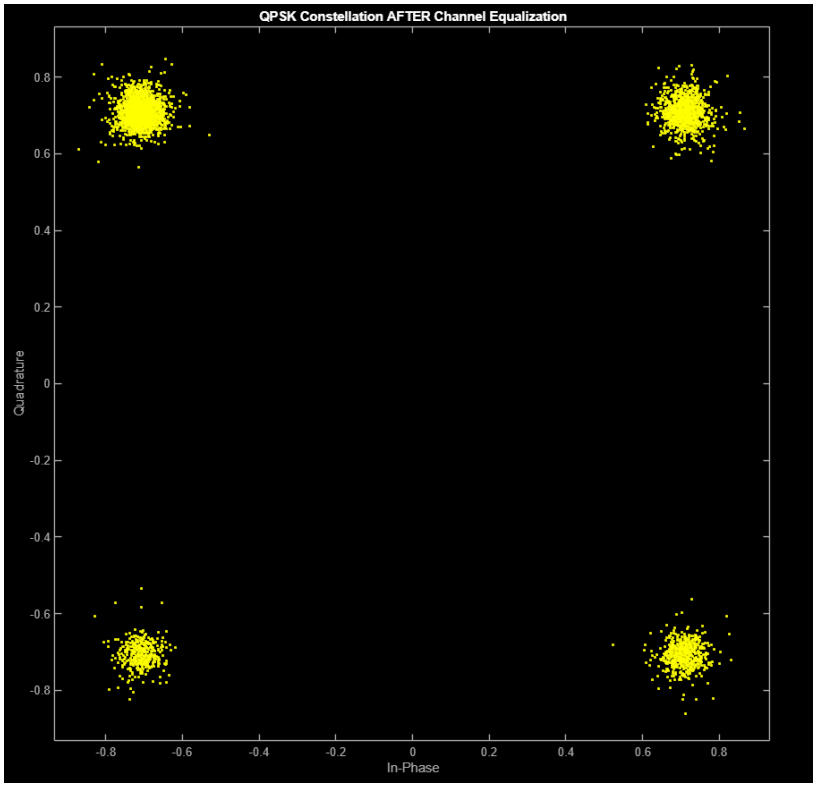
Αρχικά, στις Εικόνες 34, 35, και 36 παρουσιάζεται ο τελικός αστερισμός QPSK μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας αντιστάθμισης Doppler και εξισορρόπησης καναλιού για διαφορετικές τιμές SNR.



Εικόνα 35: Constellation για SNR = 0dB



Εικόνα 34: Constellation για SNR = 10dB

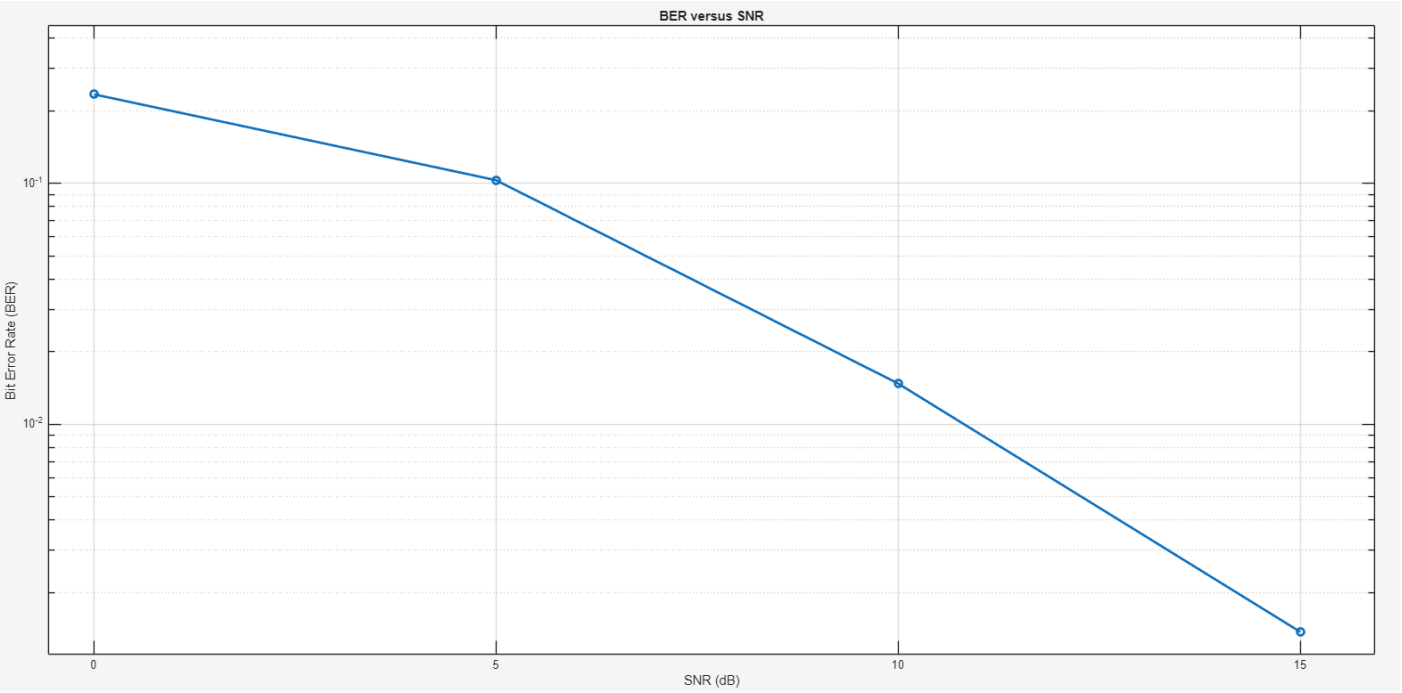


Εικόνα 36: Constellation για SNR = 30dB

Για SNR ίσο με 0 dB παρατηρείται πολύ μεγάλη διασπορά των συμβόλων στο επίπεδο I/Q, γεγονός που υποδηλώνει έντονη επίδραση θορύβου και σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας επικοινωνίας. Τα σύμβολα εμφανίζονται ιδιαίτερα απομακρυσμένα από τις ιδανικές θέσεις QPSK, αυξάνοντας σημαντικά την πιθανότητα λανθασμένης αποδιαμόρφωσης.

Για SNR ίσο με 10 dB παρατηρείται αισθητή βελτίωση της ποιότητας του αστερισμού. Τα σύμβολα αρχίζουν να συγκεντρώνονται γύρω από τις ιδανικές θέσεις QPSK, αν και εξακολουθεί να υπάρχει διασπορά λόγω θορύβου και υπολειπόμενων παραμορφώσεων καναλιού.

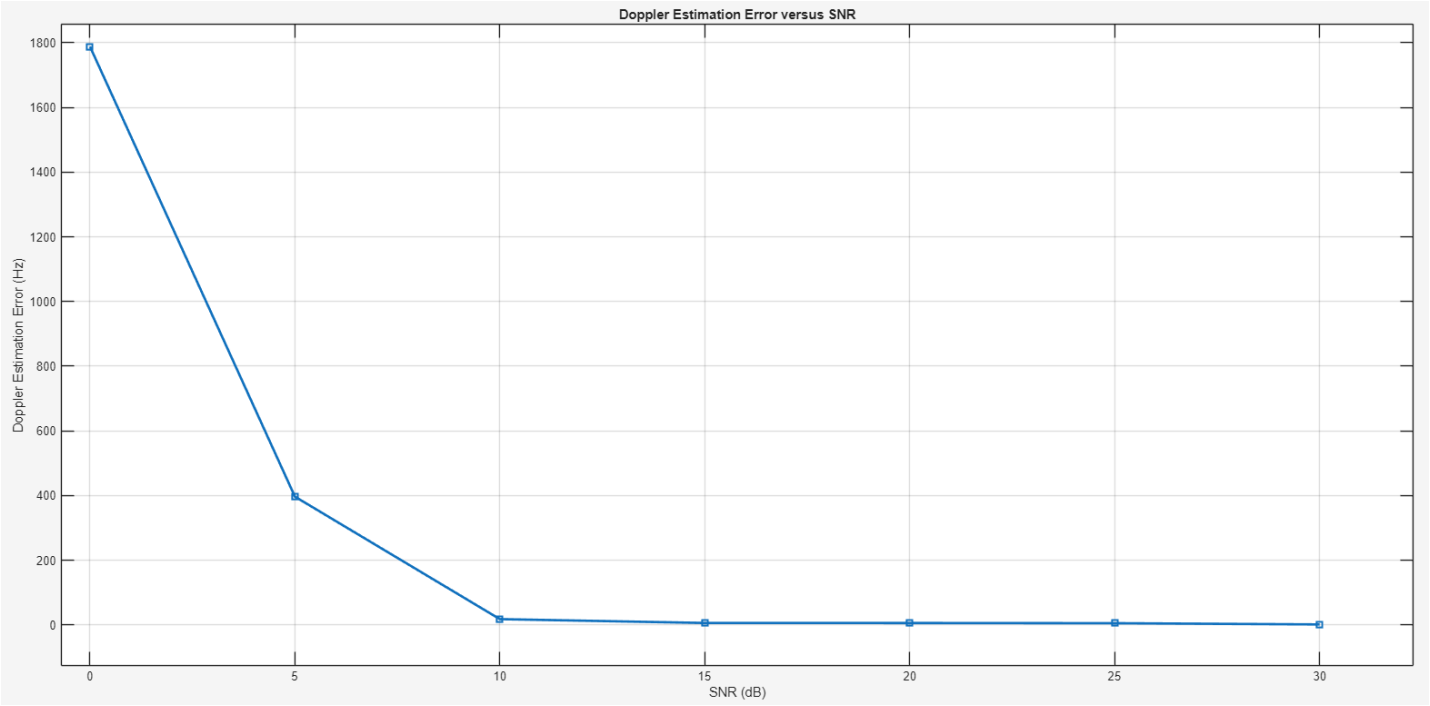
Τέλος, για SNR ίσο με 30 dB ο αστερισμός προσεγγίζει σχεδόν ιδανική μορφή, με τα σύμβολα να εμφανίζονται σαφώς συγκεντρωμένα στις τέσσερις θεωρητικές θέσεις της διαμόρφωσης QPSK. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι σε υψηλές τιμές SNR το σύστημα επιτυγχάνει ιδιαίτερα αξιόπιστη επικοινωνία.



Εικόνα 37: BER vs SNR

Στην Εικόνα 37 παρουσιάζεται η μεταβολή του BER ως συνάρτηση του SNR. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το SNR, το BER μειώνεται δραματικά. Για χαμηλές τιμές SNR, όπως 0 dB και 5 dB, εμφανίζονται σημαντικά σφάλματα αποδιαμόρφωσης λόγω της έντονης παρουσίας θορύβου. Αντίθετα, για τιμές SNR μεγαλύτερες από 20 dB, το BER πρακτικά μηδενίζεται, γεγονός που υποδηλώνει σχεδόν πλήρη ανάκτηση της αρχικής πληροφορίας.

Ο ρυθμός σφαλμάτων bit (Bit Error Rate, BER) υπολογίστηκε μέσω σύγκρισης των αρχικών μεταδιδόμενων bit με τα ληφθέντα bit μετά την αποδιαμόρφωση και ισοστάθμιση του OFDM σήματος. Συγκεκριμένα, το BER προέκυψε από το πηλίκο του αριθμού των λανθασμένων bit προς το συνολικό πλήθος των μεταδιδόμενων bit.



Εικόνα 38: Doppler estimation error vs SNR

Παράλληλα, στην Εικόνα 38 παρουσιάζεται το σφάλμα εκτίμησης Doppler ως συνάρτηση του SNR. Παρατηρείται ότι η ακρίβεια εκτίμησης Doppler βελτιώνεται σημαντικά με την αύξηση του SNR. Σε χαμηλές τιμές SNR ο θόρυβος επηρεάζει έντονα την εκτίμηση της φασικής μεταβολής των pilot subcarriers, οδηγώντας σε μεγάλο σφάλμα εκτίμησης. Αντίθετα, σε υψηλότερες τιμές SNR η εκτίμηση Doppler γίνεται ιδιαίτερα ακριβής, με το σφάλμα να μειώνεται σε πολύ μικρές τιμές.

5.3.2 Πιθανότητα Ανίχνευσης Radar ως προς Απόσταση και Υλικό Στόχου

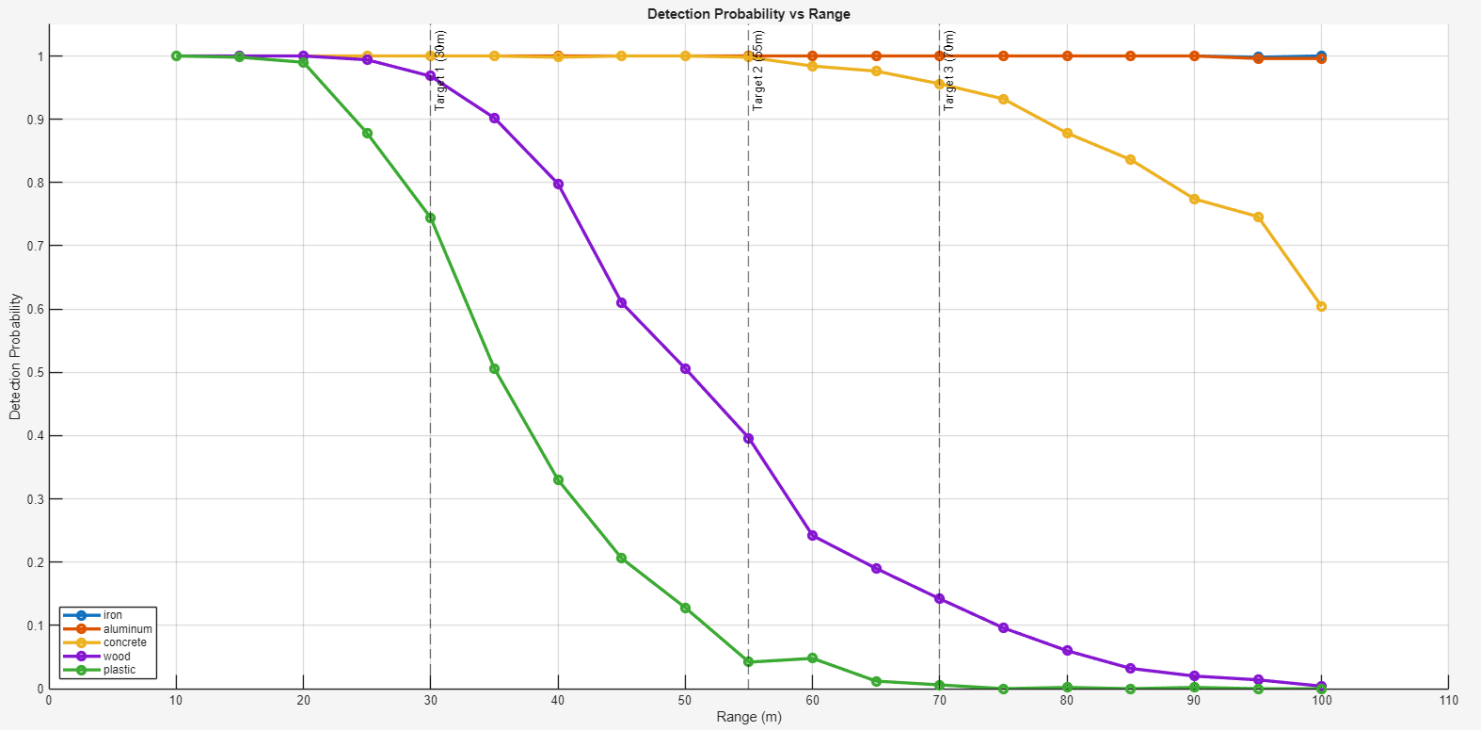
Για την αξιολόγηση της απόδοσης του radar μέρους του προτεινόμενου ISAC συστήματος πραγματοποιήθηκε επιπλέον ανάλυση πιθανότητας ανίχνευσης (Probability of Detection) ως προς την απόσταση και το υλικό του στόχου. Η συγκεκριμένη διαδικασία στοχεύει στη μελέτη της ικανότητας του συστήματος να ανιχνεύει στόχους διαφορετικής ανακλαστικότητας υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες διάδοσης και εξασθένησης.

Στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν πέντε διαφορετικοί τύποι υλικών στόχου: Σίδηρος (Iron), αλουμλίνιο (aluminum), σκυρόδεμα (concrete), ξύλο (wood), πλαστικό (plastic), στα οποία αποδόθηκαν διαφορετικές τιμές RCS, ώστε να αναπαρασταθούν διαφορετικά επίπεδα ανακλαστικότητας. Τα μεταλλικά υλικά παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερη ανακλώμενη ισχύ σε σχέση με υλικά χαμηλής ανακλαστικότητας, όπως το ξύλο και ιδιαίτερα το πλαστικό.

Η πιθανότητα ανίχνευσης υπολογίστηκε μέσω Monte Carlo προσομοιώσεων για διαφορετικές αποστάσεις στόχου. Για κάθε περίπτωση εκτελέστηκαν πολλαπλές δοκιμές με τυχαίες διακυμάνσεις fading και θορύβου, προκειμένου να προσεγγιστεί πιο ρεαλιστικά η στατιστική συμπεριφορά ενός

πραγματικού radar καναλιού. Η απόφαση ανίχνευσης βασίστηκε σε κατώφλι SNR (threshold-based detection).

Στην Εικόνα 39 παρουσιάζεται η πιθανότητα ανίχνευσης συναρτήσει της απόστασης για τα διαφορετικά υλικά στόχου. Τα αποτελέσματα της πιθανότητας ανίχνευσης έχουν ενδεικτικό χαρακτήρα και αποσκοπούν κυρίως στη συγκριτική μελέτη της επίδρασης του υλικού και της απόστασης στην απόδοση του radar υποσυστήματος.



Εικόνα 39: Detection probability vs Range

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι στόχοι από σίδηρο και αλουμίνιο διατηρούν πολύ υψηλή πιθανότητα ανίχνευσης (Pd≈1) σε όλο το εύρος αποστάσεων (100 m). Η υψηλή αυτή απόδοση οφείλεται στη μεγάλη ανακλαστικότητα των μεταλλικών υλικών, η οποία οδηγεί σε ισχυρότερα επιστρεφόμενα radar echoes.

Αντίστοιχα, το μπετό (concreter) εμφανίζει μικρότερη αλλά ακόμη σχετικά υψηλή πιθανότητα ανίχνευσης, με αισθητή πτώση περίπου στα 70 m. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς διαθέτει χαμηλότερη τιμή RCS συγκριτικά με τα μεταλλικά υλικά.

Για τα ξύλα και πλαστικά παρατηρείται σημαντικά ταχύτερη μείωση της πιθανότητας ανίχνευσης. Ειδικότερα, το ξύλο παρουσιάζει αισθητή πτώση περίπου στα 40 m, ενώ το πλαστικό εμφανίζει τη χαμηλότερη απόδοση, με την πιθανότητα ανίχνευσης να μειώνεται έντονα ήδη από τα 35 m. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στη μικρή ανακλαστικότητα των συγκεκριμένων υλικών, η οποία οδηγεί σε ασθενέστερα επιστρεφόμενα σήματα και συνεπώς χαμηλότερο λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR).

Παρατηρήθηκε επίσης ότι η παρουσία ισχυρά ανακλαστικών στόχων, όπως σίδηρος ή αλουμίνιο, μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ορατότητα στόχων χαμηλής ανακλαστικότητας, όπως το πλαστικό. Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με το αυξημένο δυναμικό εύρος (διαφορά μεταξύ πολύ ισχυρών και πολύ ασθενών echoes) των radar maps, καθώς τα ισχυρά επιστρεφόμενα echoes κυριαρχούν στη διαδικασία κανονικοποίησης και απεικόνισης του σήματος. Ως αποτέλεσμα, οι ασθενέστερες ανακλάσεις εμφανίζονται σημαντικά αποδυναμωμένες σε σχέση με το επίπεδο των ισχυρών στόχων.

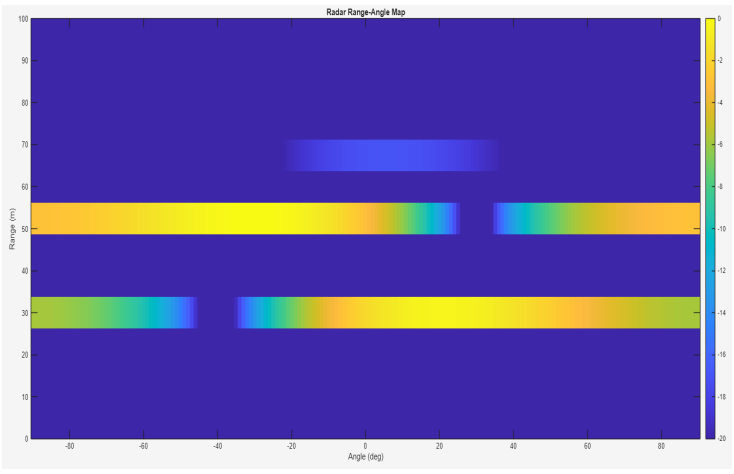
Επιπλέον, οι ισχυροί στόχοι μπορούν να προκαλέσουν επιδράσεις λόγω πλευρικών λοβών (sidelobe masking effects) μετά τη διαδικασία beamforming και range processing, γεγονός που δυσκολεύει περαιτέρω την ανίχνευση ασθενέστερων αντικειμένων που βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις ή γωνίες. Αντίθετα, όταν οι προηγούμενοι στόχοι διαθέτουν μικρότερη ανακλαστικότητα, όπως στην περίπτωση του ξύλου ή του πλαστικού, οι ισχυρές κορυφές στα radar maps είναι σημαντικά μειωμένες. Ως αποτέλεσμα, περιορίζεται το masking effect από τα κυρίαρχα echoes, επιτρέποντας στους στόχους πολύ μικρού RCS να γίνονται περισσότερο ορατοί.

Η συγκεκριμένη συμπεριφορά είναι σύμφωνη με πραγματικά radar συστήματα, όπου ισχυρές ανακλάσεις μπορούν να περιορίσουν την ικανότητα ανίχνευσης μικρών ή ασθενώς ανακλαστικών στόχων, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με πολλά αντικείμενα.

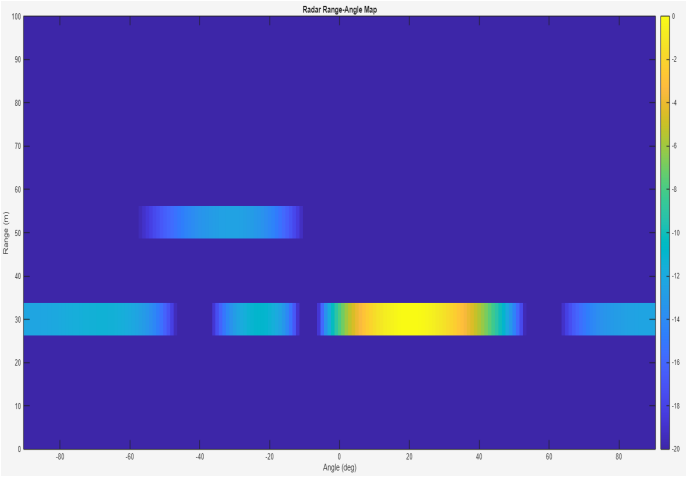
5.3.3 Επίδραση Αριθμού Κεραιών στη Radar Απόδοση

Στην ενότητα αυτή μελετάται η επίδραση του αριθμού στοιχείων της κεραίας λήψης (receive antenna array) στην απόδοση radar του ISAC συστήματος. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν διαφορετικές διαμορφώσεις Uniform Linear Array (ULA) με αριθμό κεραιών: 2, 4, 8, 16 στοιχεία.

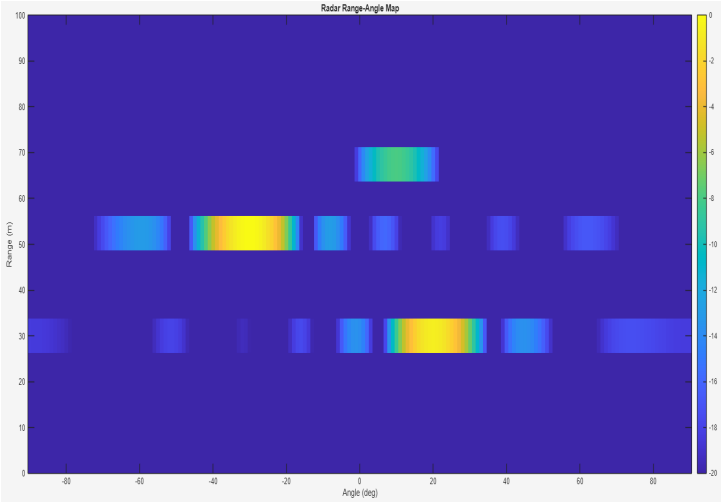
Για κάθε περίπτωση πραγματοποιήθηκε η ίδια διαδικασία radar επεξεργασίας, η οποία περιλαμβάνει range processing, beamforming και δημιουργία Range-Angle Map. Τα αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζονται παρακάτω.



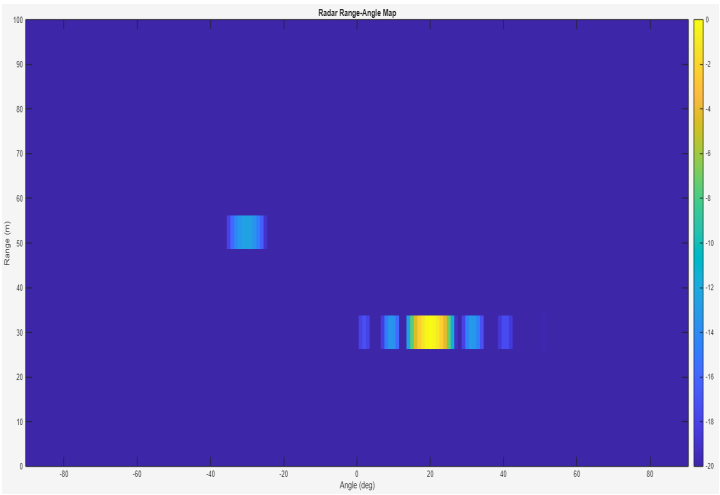
Εικόνα 40: Range-Angle με numRx = 2



Εικόνα 41: Range-Angle με numRx = 4



Εικόνα 43: Range-Angle με numRx = 8



Εικόνα 42: Range-Angle με numRx = 16

Η αύξηση του αριθμού κεραιών οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της γωνιακής ανάλυσης (angular resolution) του συστήματος. Με μικρό αριθμό στοιχείων, όπως στην περίπτωση των 2 κεραιών, το beamforming παράγει ευρύ κύριο λοβό (main lobe), με αποτέλεσμα οι στόχοι να εμφανίζονται περισσότερο «απλωμένοι» στον άξονα γωνίας. Παράλληλα, η ικανότητα διαχωρισμού κοντινών στόχων είναι σχεδόν ανύπαρκτη.

Με την αύξηση των στοιχείων στις 4 και 8 κεραίες, παρατηρείται σταδιακή στένωση του κύριου λοβού και βελτίωση της χωρικής επιλεκτικότητας του beamforming. Οι στόχοι εμφανίζονται πιο ευκρινείς και η εκτίμηση γωνίας γίνεται ακριβέστερη. Επιπλέον, μειώνεται η επίδραση των πλευρικών λοβών (sidelobes), γεγονός που περιορίζει ψευδοεντοπισμούς και ανεπιθύμητες ανακλάσεις.

Στην περίπτωση των 16 κεραιών, το radar map εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλή γωνιακή ευκρίνεια, με πολύ sharp beamforming και σαφέστερο διαχωρισμό στόχων που βρίσκονται σε κοντινές γωνίες. Η μεγαλύτερη χωρική ανάλυση επιτρέπει στο σύστημα να εντοπίζει με μεγαλύτερη αξιοπιστία πολλαπλά αντικείμενα στο ίδιο περιβάλλον.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα διαφορετικά radar maps αποτελούν ενδεικτικές απεικονίσεις της συμπεριφοράς του συστήματος και παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις μεταξύ εκτελέσεων, λόγω των τυχαίων παραμέτρων της προσομοίωσης, όπως ο θόρυβος AWGN και η τυχαία επιλογή υλικών στόχων. Ωστόσο, η συνολική τάση παραμένει σταθερή: η αύξηση του αριθμού κεραιών βελτιώνει σημαντικά τη χωρική ανάλυση και την ποιότητα beamforming του radar συστήματος.

Συνολικά, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η χρήση μεγαλύτερου antenna array αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επίτευξη υψηλής radar απόδοσης σε ISAC αρχιτεκτονικές, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα πολλαπλών στόχων όπου απαιτείται ακριβής γωνιακός διαχωρισμός.

6 *Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα*

6.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Εδώ παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα και οι σημαντικότερες παρατηρήσεις που προέκυψαν από την ανάπτυξη του προτεινόμενου OFDM-based ISAC συστήματος. Μέσω της υλοποίησης σε περιβάλλον MATLAB πραγματοποιήθηκε η ταυτόχρονη υποστήριξη λειτουργιών επικοινωνίας και radar sensing, επιβεβαιώνοντας τη δυνατότητα συνύπαρξης των δύο λειτουργιών στο ίδιο φασματικό και υπολογιστικό πλαίσιο.

Αρχικά, από τα αποτελέσματα του επικοινωνιακού μέρους διαπιστώθηκε ότι η χρήση OFDM με εκτίμηση καναλιού μέσω πιλότων επιτρέπει αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων ακόμη και με παρουσία Doppler μετατοπίσεων και ανακλάσεων πολλαπλών στόχων. Η εκτίμηση καναλιού μέσω πιλότων και η διαδικασία αντιστάθμισης Doppler βελτίωσαν σημαντικά την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος, γεγονός που επιβεβαιώθηκε από τα διαγράμματα αστερισμού πριν και μετά την διαδικασία εξισορρόπησης. Μετά την εφαρμογή της εκτίμησης καναλιού και εξισορρόπησης, τα QPSK σύμβολα συγκεντρώθηκαν σημαντικά κοντά στις ιδανικές θέσεις αστερισμού, παρουσιάζοντας αισθητά μικρότερη διασπορά.

Παράλληλα, το υποσύστημα radar παρουσίασε επιτυχημένη δυνατότητα ανίχνευσης και εκτίμησης στόχων μέσω Range-Angle και Range-Velocity επεξεργασίας. Τα radar maps έδειξαν ότι το σύστημα μπορεί να εντοπίζει στόχους σε διαφορετικές αποστάσεις, γωνίες και ταχύτητες, αξιοποιώντας beamforming τεχνικές και επεξεργασίας Doppler πάνω στην ίδια OFDM κυματομορφή που χρησιμοποιήθηκε για επικοινωνία. Η χρήση Uniform Linear Array επέτρεψε την αποτελεσματική εκτίμηση γωνίας, ενώ η FFT επεξεργασία στο πεδίο Doppler επέτρεψε την εκτίμηση της σχετικής ταχύτητας των στόχων.

Επιπλέον, η ανάλυση πιθανότητας ανίχνευσης ανέδειξε τη σημαντική επίδραση της ανακλαστικότητας των υλικών στην radar απόδοση. Υλικά με υψηλότερο Radar Cross Section, όπως ο σίδηρος και το αλουμίνιο, διατήρησαν υψηλή πιθανότητα ανίχνευσης ακόμη και σε μεγαλύτερες αποστάσεις, ενώ υλικά χαμηλής ανακλαστικότητας, όπως το ξύλο και ιδιαίτερα το πλαστικό,

παρουσίασαν αισθητά ταχύτερη μείωση της πιθανότητας ανίχνευσης καθώς αυξανόταν η απόσταση. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τη φυσική συμπεριφορά των radar ανακλάσεων και επιβεβαιώνουν τη ρεαλιστικότητα της προσομοίωσης.

Ιδιαίτερα σημαντική αποδείχθηκε και η επίδραση του αριθμού κεραιών λήψης στην radar απόδοση. Η αύξηση των στοιχείων της στοιχειοκεραίας οδήγησε σε σαφή βελτίωση της γωνιακής ανάλυσης και της χωρικής επιλεκτικότητας του beamforming. Τα radar maps έγιναν σημαντικά πιο ευκρινή, με στενότερους κύριους λοβούς και καλύτερο διαχωρισμό στόχων που βρίσκονται σε κοντινές γωνίες. Παράλληλα, μειώθηκε η επίδραση των πλευρικών λοβών (sidelobes) και ανεπιθύμητων ανακλάσεων, βελτιώνοντας συνολικά την ποιότητα της radar απεικόνισης.

Επιπλέον, μελετήθηκε η επίδραση του Σηματοθορυβικού λόγου στην ποιότητα επικοινωνίας του συστήματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση του SNR οδηγεί σε αισθητή βελτίωση της ποιότητας των διαγραμμάτων αστερισμού και της συνολικής αξιοπιστίας μετάδοσης. Σε χαμηλές τιμές SNR παρατηρήθηκε σημαντική διασπορά των QPSK συμβόλων λόγω του θορύβου AWGN, γεγονός που αυξάνει την πιθανότητα λανθασμένης αποδιαμόρφωσης και συνεπώς το Bit Error Rate . Αντίθετα, για μεγαλύτερες τιμές SNR, τα constellation points συγκεντρώθηκαν πιο κοντά στις ιδανικές θεωρητικές θέσεις, επιτρέποντας ακριβέστερη εκτίμηση καναλιού και αποτελεσματικότερη εξισορρόπηση. Παράλληλα, η βελτίωση της ποιότητας σήματος συνέβαλε και στη μείωση του σφάλματος εκτίμησης Doppler (Doppler estimation error), καθώς η εκτίμηση της μεταβολής φάσης των pilot subcarriers πραγματοποιήθηκε με μεγαλύτερη ακρίβεια. Η συμπεριφορά αυτή επιβεβαιώνει τη σημαντική επίδραση της ποιότητας καναλιού στην απόδοση επικοινωνίας των OFDM συστημάτων και αναδεικνύει τον κρίσιμο ρόλο του SNR τόσο στην αξιοπιστία επικοινωνίας όσο και στην ορθότητα της Doppler εκτίμησης.

Παρότι η προσομοίωση παρείχε ιδιαίτερα χρήσιμα συμπεράσματα, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Το σύστημα αξιολογήθηκε σε ελεγχόμενο περιβάλλον προσομοίωσης με σχετικά απλουστευμένες υποθέσεις διάδοσης, χωρίς πλήρη μοντελοποίηση πολύπλοκου περιβάλλοντος πολύδιαδρομικής διάδοσης, clutter ή πραγματικών ατελειών hardware. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε σχετικά απλοποιημένο μοντέλο radar ανακλάσεων και beamforming, με στόχο τη μελέτη της βασικής συμπεριφοράς ενός ISAC συστήματος και όχι την πλήρη αναπαράσταση πραγματικού radar hardware.

Συνολικά, τα αποτελέσματα της εργασίας επιβεβαιώνουν ότι η τεχνολογία ISAC μπορεί να αποτελέσει ιδιαίτερα αποδοτική προσέγγιση για μελλοντικά ασύρματα δίκτυα, επιτρέποντας την ταυτόχρονη υποστήριξη επικοινωνίας και sensing μέσα από κοινή αρχιτεκτονική και κοινές κυματομορφές μετάδοσης.

6.2 Συμπεράσματα

1. Η τεχνολογία ISAC επιτρέπει την ταυτόχρονη λειτουργία επικοινωνίας και radar sensing χρησιμοποιώντας κοινή κυματομορφή OFDM και κοινούς φασματικούς πόρους, μειώνοντας το απαιτούμενο εύρος ζώνης και την πολυπλοκότητα του συστήματος.

2. Η χρήση OFDM σημάτων με pilot subcarriers αποδείχθηκε αποτελεσματική για εκτίμηση και εξισορρόπηση καναλιού και αντιστάθμιση Doppler, ακόμη και με παρουσία θορύβου και κινούμενων στόχων.
3. Η pilot-based εκτίμηση Doppler επέτρεψε την εκτίμηση της συχνότητας Doppler του καναλιού επικοινωνίας, αυτό μείωσε τις παραμορφώσεις στα διαγράμματα αστερισμού βελτιώνοντας την ποιότητα αποδιαμόρφωσης.
4. Η αύξηση του Signal to Noise Ratio (SNR) βελτίωσε την ποιότητα επικοινωνίας, οδηγώντας σε μικρότερο Bit Error Rate (BER) και καθαρότερα διαγράμματα αστερισμού.
5. Τα radar Range-Angle και Range-Velocity maps απέδειξαν ότι το σύστημα μπορεί να πραγματοποιήσει επιτυχημένο εντοπισμό στόχων ως προς απόσταση, γωνία και ταχύτητα, χρησιμοποιώντας beamforming και επεξεργασία Doppler.
6. Η ανακλαστικότητα του υλικού του στόχου επηρεάζει την πιθανότητα ανίχνευσης. Υλικά υψηλού Radar Cross Section (RCS), όπως σίδηρος και αλουμίνιο, διατηρούν υψηλή πιθανότητα ανίχνευσης σε μεγαλύτερες αποστάσεις, ενώ υλικά χαμηλού RCS, όπως ξύλο και πλαστικό, παρουσιάζουν ταχύτερη μείωση της radar ορατότητας.
7. Παρατηρήθηκε ότι ισχυρά ανακλαστικοί στόχοι μπορούν να επηρεάσουν την ορατότητα ασθενέστερων αντικειμένων λόγω του δυναμικού εύρους και sidelobe masking effects, γεγονός που αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό πραγματικών radar συστημάτων.
8. Η αύξηση του αριθμού στοιχείων της κεραίας λήψης βελτίωσε σημαντικά τη γωνιακή ανάλυση και την ποιότητα beamforming. Μεγαλύτερες στοιχειοκεραίες παρήγαγαν στενότερους κύριους λοβούς και καλύτερο διαχωρισμό κοντινών στόχων.
9. Παρά τα θετικά αποτελέσματα, η παρούσα εργασία βασίστηκε σε προσομοιωμένο περιβάλλον με απλοποιημένες υποθέσεις καναλιού όσον αφορά τη διάδοση. Επομένως, η πραγματική απόδοση ενός ISAC συστήματος ενδέχεται να επηρεάζεται επιπλέον από λάθη συγχρονισμού, έντονη πολυδιαδρομική διάδοσης, αδυναμίες υλικού και πιο σύνθετα περιβάλλοντα διάδοσης.
10. Η δυνατότητα ταυτόχρονης επικοινωνίας και sensing καθιστά τα ISAC συστήματα ιδιαίτερα κατάλληλα για εφαρμογές έξυπνων μεταφορών, autonomous vehicles, UAVs, smart cities και βιομηχανικά δίκτυα επόμενης γενιάς, όπου απαιτείται συνεχής αντίληψη του περιβάλλοντος παράλληλα με αξιόπιστη ασύρματη επικοινωνία.
11. Η ενοποίηση επικοινωνιακών και radar λειτουργιών σε κοινή υποδομή μπορεί να μειώσει το ενεργειακό κόστος, το απαιτούμενο φάσμα συχνοτήτων και την πολυπλοκότητα του hardware, αποτελώντας σημαντικό πλεονέκτημα για τα μελλοντικά 6G ασύρματα δίκτυα.
12. Παρότι τα ISAC συστήματα προσφέρουν σημαντικά τεχνολογικά πλεονεκτήματα, η ευρεία χρήση sensing λειτουργιών σε ασύρματα δίκτυα δημιουργεί και ζητήματα ιδιωτικότητας (privacy) και ασφάλειας δεδομένων. Η δυνατότητα συνεχούς ανίχνευσης αντικειμένων, θέσης και κίνησης χρηστών ενδέχεται να οδηγήσει σε αυξημένες απαιτήσεις προστασίας προσωπικών δεδομένων και ασφαλούς διαχείρισης των συλλεγόμενων πληροφοριών.
13. Επιπλέον, η συνύπαρξη επικοινωνιακών και radar λειτουργιών στο ίδιο φάσμα δημιουργεί νέες προκλήσεις σε θέματα παρεμβολών, resource allocation και κυβερνοασφάλειας, οι οποίες αναμένεται να αποτελέσουν σημαντικά πεδία έρευνας στα μελλοντικά 6G ISAC συστήματα.
14. Η χρήση Doppler processing και slow-time FFT επέτρεψε την εκτίμηση της σχετικής ταχύτητας στόχων, αναδεικνύοντας τη δυνατότητα των ISAC συστημάτων να παρέχουν πληροφορία όχι μόνο θέσης αλλά και δυναμικής κίνησης του περιβάλλοντος.

6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα εργασία βασίστηκε σε προσομοιωμένο ISAC περιβάλλον με OFDM κυματομορφές, pilot-based εκτίμηση καναλιού και radar sensing μέσω beamforming και Doppler. Παρότι τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά, υπάρχουν αρκετές δυνατότητες επέκτασης και περαιτέρω έρευνας.

Αρχικά, μία σημαντική κατεύθυνση αποτελεί η χρήση πιο ρεαλιστικών ασύρματων καναλιών και μοντέλων διάδοσης radar. Στην παρούσα προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν σχετικά απλοποιημένες υποθέσεις διάδοσης, χωρίς έντονα multipath φαινόμενα, σκίαση ή αστοχίες hardware. Η ενσωμάτωση μοντέλων Rayleigh/Rician fading, σφαλμάτων συγχρονισμού, phase noise και μη-γραμμικών RF παραμορφώσεων θα μπορούσε να οδηγήσει σε πιο ρεαλιστική αξιολόγηση της απόδοσης ενός ISAC συστήματος.

Επιπλέον, θα μπορούσε να μελετηθεί η χρήση πιο προηγμένων τεχνικών beamforming και εκτίμησης γωνίας άφιξης, όπως adaptive beamforming, Capon beamforming ή MUSIC/ESPRIT algorithms, με στόχο τη βελτίωση της γωνιακής ανάλυσης και της ικανότητας διαχωρισμού πολλαπλών στόχων.

Μία ακόμη ενδιαφέρουσα προέκταση αφορά τη χρήση MIMO και massive MIMO αρχιτεκτονικών σε ISAC συστήματα. Η αξιοποίηση μεγάλων antenna arrays μπορεί να προσφέρει υψηλότερη χωρική ανάλυση, καλύτερη ενεργειακή απόδοση και αυξημένη αξιοπιστία τόσο στις communication όσο και στις sensing λειτουργίες.

Παράλληλα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη τεχνικών ανάθεσης πόρων (resource allocation) και από κοινού βελτιστοποίησης μεταξύ επικοινωνιακών και radar λειτουργιών. Σε πραγματικά ISAC δίκτυα, το σύστημα καλείται να κατανείμει δυναμικά ισχύ, εύρος ζώνης και πόρους beamforming μεταξύ sensing και απαιτήσεων στις επικοινωνίες, γεγονός που δημιουργεί σύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης.

Επιπροσθέτως, θα μπορούσε να διερευνηθεί η χρήση μηχανικής μάθησης και τεχνητής νοημοσύνης για adaptive beamforming, target classification, clutter suppression και δυναμική διαχείριση πόρων. Η ενσωμάτωση AI-based αλγορίθμων θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για τα μελλοντικά 6G ISAC συστήματα.

Μία ακόμη σημαντική κατεύθυνση είναι η υλοποίηση του συστήματος σε πραγματικό hardware, όπως Software Defined Radios (SDRs), προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση του ISAC μοντέλου σε πραγματικές συνθήκες ασύρματης μετάδοσης και radar sensing.

Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ζητήματα ασφάλειας και ιδιωτικότητας που προκύπτουν από τη συνεχή sensing λειτουργία των ISAC συστημάτων. Η ανάπτυξη μηχανισμών ασφαλούς διαχείρισης sensing δεδομένων, προστασίας προσωπικών πληροφοριών και ανθεκτικότητας απέναντι σε κυβερνοεπιθέσεις αναμένεται να αποτελέσει σημαντικό πεδίο έρευνας στα μελλοντικά 6G δίκτυα.

Βιβλιογραφία

1. Tataria, H., Shafi, M., Molisch, A. F., Dohler, M., Sjöland, H., & Tufvesson, F. (2021). 6G wireless systems: Vision, requirements, challenges, insights, and opportunities. *Proceedings of the IEEE, 109*(7), 1166–1199. https://doi.org/10.1109/JPROC.2021.3061701
2. Jiang, W., Han, B., Habibi, M. A., & Schotten, H. D. (2021). The road towards 6G: A comprehensive survey. *IEEE Open Journal of the Communications Society, 2*, 334–366. https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2021.3057679
3. Giordani, M., Polese, M., Mezzavilla, M., Rangan, S., & Zorzi, M. (2020). Toward 6G networks: Use cases and technologies. *IEEE Communications Magazine, 58*(3), 55–61. https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900411
4. Liu, F., Cui, Y., Masouros, C., Xu, J., Han, T. X., Eldar, Y. C., & Buzzi, S. (2022). Integrated sensing and communications: Toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 40*(6), 1728–1767. https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3156632
5. Luo, H., et al. (2025). Integrated sensing and communications framework for 6G networks. *IEEE Wireless Communications, 32*(6), 102–109. https://doi.org/10.1109/MWC.2025.3599658
6. Liu, T., et al. (2024). 6G integrated sensing and communications channel modeling: Challenges and opportunities. *IEEE Vehicular Technology Magazine, 19*(2), 31–40. https://doi.org/10.1109/MVT.2024.3373930
7. Zhou, W., Zhang, R., Chen, G., & Wu, W. (2022). Integrated sensing and communication waveform design: A survey. *IEEE Open Journal of the Communications Society, 3*, 1930–1949. https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2022.3215683
8. Li, C., Dong, M., Fu, Y., Yu, F. R., & Cheng, N. (2026). Integrated sensing, communication, and computation for IoV: Challenges and opportunities. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. https://doi.org/10.1109/COMST.2025.3612388
9. Ma, T., et al. (2025). Sensing-resistance-oriented design for privacy-concerned secure transmission in ISAC scenarios. *IEEE Transactions on Wireless Communications, 24*(11), 9391–9406. https://doi.org/10.1109/TWC.2025.3573160
10. Jaradat, A. M., Hamamreh, J. M., και Arslan, H. 'Modulation Options for OFDM-Based Waveforms: Classification, Comparison, and Future Directions'. IEEE Access, τ. 7, 2019, σελ. 17263–17278. IEEE Xplore, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2895958 .
11. Liu, X., Huang, T., Shlezinger, N., Liu, Y., Zhou, J., και Eldar, Y. C. 'Joint Transmit Beamforming for Multiuser MIMO Communications and MIMO Radar'. IEEE Transactions

on Signal Processing, τ. 68, 2020, σελ. 3929–3944. IEEE Xplore, https://doi.org/10.1109/TSP.2020.3004739 .

12. Zhang, J. A., κ.ά. 'An Overview of Signal Processing Techniques for Joint Communication and Radar Sensing'. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, τ. 15, τχ. 6, Νοέμβριος 2021, σελ. 1295–1315. IEEE Xplore, https://doi.org/10.1109/JSTSP.2021.3113120.
13. Tse, D., και Viswanath, P. 'Fundamentals of Wireless Communication'. Cambridge University Press, 2005.
14. Proakis, J. G., και Salehi, M. *Digital Communications*, 5th Edition, McGraw-Hill, 2007.
15. Braun, M. *OFDM Radar Algorithms in Mobile Communication Networks*, PhD Thesis, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 2014.
16. Skolnik, M. I. *Introduction to Radar Systems*, 3rd Edition, McGraw-Hill, 2001.
17. Oppenheim, A. V., και Schafer, R. W. *Discrete-Time Signal Processing*, 3rd Edition, Pearson, 2010