



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Σχολή Τεχνολογίας

Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων

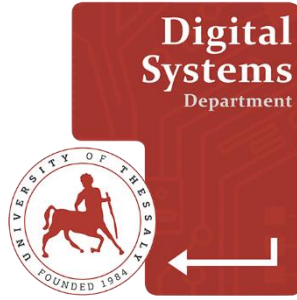
**Μελέτη και Μοντελοποίηση
Πρωτοκόλλων και
Κυματομορφών σε Περιβάλλοντα
Ολοκληρωμένης Επικοινωνίας
και Ανίχνευσης με Χρήση
MATLAB**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ροντζιώκου Ελένη (ΑΜ: 3121277)

Επιβλέπων: Καρέτσος Γεώργιος, Καθηγητής

ΛΑΡΙΣΑ, Ιούνιος 2025



UNIVERSITY OF THESSALY

School of Technology

Digital Systems Department

**Study and Modeling of Protocols
and Waveforms in Integrated
Sensing and Communication Envi-
ronments using MATLAB**

BACHELOR THESIS

Rontziokou Eleni (RN: 3121277)

Supervisor: Karetsos George, Professor

LARISSA, June 2025

Υπεύθυνη Δήλωση περί Ακαδημαϊκής Δεοντολογίας και Πνευματικών Δικαιωμάτων

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα πτυχιακή εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον, και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή.

Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο/Η Δηλών/ούσα

(Υπογραφή)

Ονοματεπώνυμο Φοιτητή/-ήτριας

Ροντζιώκου Ελένη

Ημερομηνία

27/06/2025

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων/πουσα	Καρέτσος Γεώργιος Βαθμίδα/ιδιότητα επιβλέποντα, Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Μέλος	Χαϊκάλης Κωνσταντίνος Βαθμίδα/ιδιότητα μέλους 1, Τμήμα/Ιδρυμα μέλους 1
Μέλος	Κοσμανός Δημήτριος Βαθμίδα/ιδιότητα μέλους 2, Τμήμα/Ιδρυμα μέλους 2

Ημερομηνία έγκρισης: 27-06-2025

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εστίασε στην μελέτη και μοντελοποίηση συστημάτων Ολοκληρωμένης Επικοινωνίας και Ανίχνευσης (Integrated Sensing and Communication – ISAC) μιας καινοτόμου τεχνολογίας που ενοποιεί σε κοινή υποδομή τις λειτουργίες ραντάρ και ασύρματης επικοινωνίας. Ο βασικός σκοπός της εργασίας ήταν η ανάλυση των τεχνικών προκλήσεων και δυνατοτήτων της ISAC, με έμφαση στον σχεδιασμό και την αξιολόγηση των κυματομορφών και πρωτοκόλλων σε περιβάλλον MATLAB.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε συμπεριέλαβε: (α) βιβλιογραφική ανασκόπηση βασικών αρχών και κυματομορφών, (β) ανάλυση σύγχρονων εφαρμογών ISAC σε τομείς όπως οι έξυπνες πόλεις, (γ) υλοποίηση σεναρίων προσομοίωσης για την εκτίμηση απόστασης και ταχύτητας στόχων μέσω MATLAB.

Τα αποτελέσματα της εργασίας έδειξαν ότι συγκεκριμένες κυματομορφές, όπως η OTFS προσφέρει αυξημένη ευρωστία σε δυναμικά και πολυδιάστατα περιβάλλοντα, ενώ οι παραδοσιακές λύσεις όπως η OFDM υποφέρουν από φαινόμενα αμφισιμίας Doppler. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η χρήση κοινών πόρων για επικοινωνία και ανίχνευση μπορεί να ενισχύσει την αποδοτικότητα του φάσματος και να μειώσει την υπολογιστική και ενεργειακή επιβάρυνση των συστημάτων.

Συνολικά, η εργασία ανέδειξε τη λειτουργική αποτελεσματικότητα της ISAC και κατέδειξε τη σπουδαιότητα της στον σχεδιασμό των έξυπνων υποδομών του μέλλοντος, θέτοντας τη βάση για περαιτέρω έρευνα και βελτιστοποίηση.

Λέξεις-κλειδιά: Ολοκληρωμένη Επικοινωνία και Ανίχνευση (ISAC), σχεδίαση κυματομορφών, πρωτοκόλλα επικοινωνίας, MATLAB

Abstract

This thesis focused on the study and modeling of Integrated Sensing and Communication (ISAC) systems, an innovative technology that unifies radar and wireless communication functionalities within a shared infrastructure. The main objective was to analyze the technical challenges and capabilities of ISAC, with an emphasis on waveform and protocol design and evaluation in a MATLAB simulation environment.

The methodology followed included: (a) a literature of fundamental principles and waveform families, (b) analysis of modern ISAC applications in domains such as smart cities and (c) implementation of simulation scenarios for target range and velocity estimation using MATLAB. Various operating environments were investigated, including cases with multiple targets, noise presence and interference.

The results demonstrated that advanced waveforms such as OTFS provide increased robustness in dynamic and multidimensional environments, while more traditional schemes like OFDM suffer from Doppler ambiguity effects. Moreover, it was found that sharing resources between sensing and communication improves spectral efficiency and reduces the computational and energy burden on the system.

Overall, the study highlighted the functional effectiveness of ISAC and emphasized its importance in the design of next-generation intelligent infrastructure, laying the groundwork for further research and optimization.

Keywords: Integrated Sensing and Communication, waveform design, communication protocols, MATLAB

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, για την καθοδήγηση και την στήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια της πτυχιακής μου εργασίας. Ευχαριστώ επίσης την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την στήριξη τους και την παρουσία τους σε όλη αυτή την πορεία των σπουδών μου.

Ροντζιώκου Ελένη

27/06/2024

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	VII
ABSTRACT	IX
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	XI
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	XIII
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	3
2.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ	3
2.2. ΤΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ	4
2.3. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ DOPPLER ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ	5
2.4. ΓΡΗΓΟΡΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ FOURIER (FFT) ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ISAC.....	6
2.5. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΣΤΕΡΙΣΜΟΥ (CONSTELLATION DIAGRAM)	6
3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ & ΣΕΝΑΡΙΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ISAC	7
4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΩΝ ΚΑΙ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ISAC	11
4.1. ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΑ ΣΤΑΔΙΑ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ISAC	11
4.2. ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΩΝ	13
4.3. ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΩΝ ISAC	13
4.3.1 Σχεδιασμός κυματομορφής με έμφαση στην επικοινωνία (CCWD)	14
4.3.2. Σχεδιασμός κυματομορφής με έμφαση την ανίχνευση (SWCD).....	27
4.3.3. Κοινή Σχεδίαση Κυματομορφών για Ολοκληρωμένη Επικοινωνία και Ανίχνευση (JWOD)	38
4.4. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ (ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΤΟ CRLB, MI)	47
4.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΩΝ.....	48

4.6. ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ	49
4.6.1. Extended automated request (e-ARQ)	50
4.6.2. Πρωτόκολλα Βασισμένα σε Μηχανική Μάθηση.....	50
4.6.3. Μέθοδοι Κατανομής Πόρων σε ISAC Συστήματα: TDM, FDM και CDM	51
5. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ MATLAB	52
5.3. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΜΕ ΕΠΙΚΕΝΤΡΟ ΤΟ ΡΑΝΤΑΡ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ PMCW	52
5.4. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΜΕ ΕΠΙΚΕΝΤΡΟ ΤΗΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΜΙΜΟ- OFDM	53
5.5. ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ PMCW ΚΑΙ OFDM.....	53
5.4. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΩΝ ISAC ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB.....	54
6. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ	56
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	59
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	61

1. Εισαγωγή

Στον σύγχρονο κόσμο, παρατηρείται αυξανόμενη προσπάθεια διαμόρφωσης ενός νέου πρότυπου ζωής που ενσωματώνει λειτουργίες επικοινωνίας και ανίχνευσης στο ίδιο σύστημα, επιτρέποντας την αποδοτικότερη χρήση των ασύρματων πόρων. Η εξέλιξη της κοινωνίας καθορίζεται μέσω της χρήσης της τεχνολογίας, η οποία σκοπεύει να προωθήσει την κοινωνική ανάπτυξη, να πετύχει «πράσινους» στόχους, να εξοικονομήσει ενέργεια και να βελτιστοποιήσει την κατανομή των πόρων. Σημαντικό παράδειγμα αποτελεί η εφαρμογή τεχνολογιών κινητής τηλεφωνίας, η μετάβαση στην έκτη γενιά (6G) κινητής επικοινωνίας, η οποία φαίνεται να επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην επικοινωνία με απώτερο σκοπό την ενοποίηση του φυσικού με τον ψηφιακό κόσμο και μεταβαίνοντας από την συνδεσιμότητα της κινητής τηλεφωνίας στο Διαδίκτυο των Πάντων, και στην συνέχεια στο Διαδίκτυο της Ευφυΐας.

Η Ολοκληρωμένη Ανίχνευση και Επικοινωνία (ISAC) είναι μια καινοτόμος τεχνολογική προσέγγιση που εστιάζει στην κοινή χρήση πόρων μέσω υλοποίησης δυο λειτουργιών: ασύρματη επικοινωνία και δυνατότητα ανίχνευσης με την χρήση ραντάρ παρέχοντας μια ολοκληρωμένη τεχνική λύση. Αυτό επιτυγχάνεται, αναπτύσσοντας εξειδικευμένες κυματομορφές και πρωτόκολλα που παρέχουν βελτίωση της φασματικής απόδοσης, της απόδοσης υλικού και την διαχείριση πληροφοριών. Το δίκτυο ISAC μετασχηματίζεται σε ένα πολυλειτουργικό σύστημα που συλλέγει δεδομένα από τον φυσικό κόσμο και τα αναλύει παρέχοντας ακριβείς υπηρεσίες επικοινωνίας.

Η σχεδίαση των κυματομορφών στα συστήματα ISAC είναι κρίσιμη για την ανίχνευση και επικοινωνία, καθώς ο σχεδιασμός κυματομορφών είναι μια από τις κυριότερες τεχνολογίες και ορίζουν τα όρια απόδοσης στην επιτυχία του συστήματος. Υπάρχουν δύο μέθοδοι σχεδίασης κυματομορφής: η χαλαρή σύζευξη και η σφιχτή σύζευξη, οι οποίες χωρίζονται περαιτέρω. Απαραίτητο κομμάτι αποτελούν και τα σχέδια κυματομορφής ISAC τα οποία κατηγοριοποιούνται σε τρεις τύπους: με επίκεντρο την ανίχνευση, την επικοινωνιοκεντρική και την κοινή σχεδίαση. Στην σχεδίαση με επίκεντρο το ραντάρ πραγματοποιείται ενσωμάτωση των συμβόλων επικοινωνίας με τις κυματομορφές ανίχνευσης χρησιμοποιώντας κλασσικές τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης. Στα επικοινωνιοκεντρικά σχήματα η σχεδίαση των κυματομορφών γίνεται με βάση των υπάρχουσών κυματομορφών επικοινωνίας και τα πρότυπα συμβατά

πρωτόκολλα. Σε κοινά σχήματα σχεδιασμού σημασία έχει η αντιστάθμιση απόδοσης μεταξύ την ανίχνευση ραντάρ και επικοινωνίας.

Από την άλλη πλευρά, το πρωτόκολλο σχεδιασμού καθορίζει το πότε και πως χρησιμοποιούνται οι πόροι του συστήματος. Η σημασία του έγκειται στην δυνατότητα βέλτιστης συνύπαρξης επικοινωνίας και ανίχνευσης με χρήση κοινού φάσματος, χρόνων και ισχύος. Ένα σωστό πρωτόκολλο επικοινωνίας ελαχιστοποιεί τις παρεμβολές μεταξύ των δυο λειτουργιών, διαχειρίζεται αποδοτικά τους πόρους και η απόδοση μεγιστοποιείται. Ακόμη, προσδίδει ευελιξία και προσαρμοστικότητα σε μεταβαλλόμενες συνθήκες πραγματικού χρόνου, ενώ έχει την δυνατότητα ταυτόχρονης ή εναλλασσόμενης χρήσης πόρων (TDM,FDM) και αξιοποίησης υβριδικών λύσεων. Μέσω της μηχανικής μάθησης προκύπτουν τεχνικές που μετατρέπονται σε δυναμικά πρωτόκολλα, τα οποία είναι ικανά να υποστηρίξουν την συνδυαστική του λειτουργία σε αρκετά απαιτητικά περιβάλλοντα.

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζεται μια συστηματική μελέτη και πειραματική αξιολόγηση κυματομορφών και πρωτοκόλλων σε περιβάλλοντα ISAC, με στόχο να αναδειχθούν οι τεχνικές προκλήσεις των διαθέσιμων τεχνολογικών λύσεων και την προσομοίωση με χρήση Matlab. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην σύγκριση των κυματομορφών αναλύοντας βασικές τεχνολογικές κατηγορίες σχεδίασης, όπως η ένθετη διαμόρφωση και οι μέθοδοι συνσχεδίασης (CCWD, SCWD, JWOD), Επιπλέον, παρουσιάζεται εφαρμογή σε περιβάλλον Matlab με σκοπό την ανάλυση της απόδοσης και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Η διάρθρωση της εργασίας είναι η εξής: στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο των τεχνολογιών ISAC και των κυματομορφών που θα χρησιμοποιηθούν. Στο κεφάλαιο 3 θα αναφερθούν οι εφαρμογές του. Στο κεφάλαιο 4 τα πρωτόκολλα σχεδίασης και οι στρατηγικές ολοκλήρωσης επικοινωνίας και ανίχνευσης. Στο κεφάλαιο 5 θα παρουσιαστεί η μοντελοποίηση και η προσομοίωση με την χρήση Matlab και θα αναλυθούν τα παραδείγματα και τα συγκριτικά αποτελέσματα. Τέλος, στο κεφάλαιο 6 θα αναφερθεί στα συμπεράσματα και τις προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται βασικές έννοιες που αφορούν την ενοποίηση των λειτουργιών ραντάρ και επικοινωνίας και τα επίπεδα ενσωμάτωσης αυτών των τεχνολογιών. Αυτή η ενσωμάτωση περιλαμβάνει την κοινή χρήση φάσματος, υλικού και σημάτων με σκοπό την αύξηση της απόδοσης, την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση του κόστους. Έπειτα, θα αναλυθούν βασικές έννοιες που χρησιμοποιούνται στα βασικά επίπεδα ολοκλήρωσης.

2.1. Ιστορική Εξέλιξη

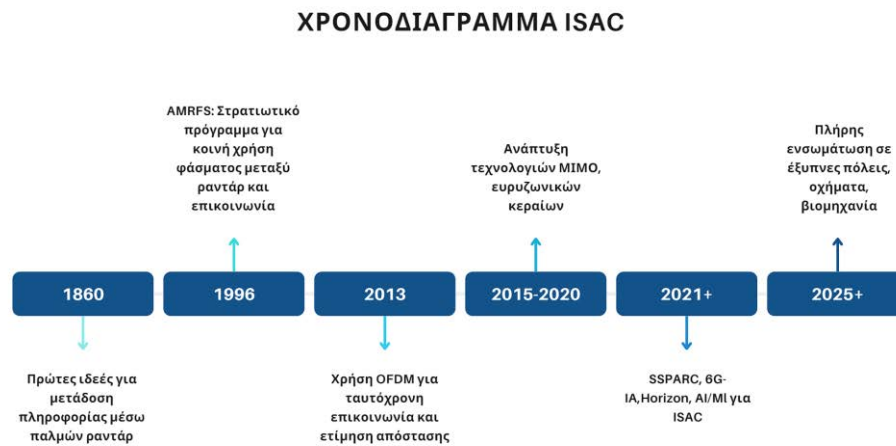
Παρότι ο όρος ISAC (Integrated Sensing and Communication) είναι σχετικά πρόσφατος όρος, η ιδέα της ταυτόχρονης χρήσης σήματος για επικοινωνία και ανίχνευση έχει ρίζες ήδη από τον 19^ο αιώνα. Ήδη από την δεκαετία του 1860, ξεκίνησε η μετάδοση πληροφορίας μέσω χρονοπρογραμματισμένων παλμών σε συστήματα ραντάρ, θέτοντας τα πρώτα θεμέλια αυτής της έννοιας.

Στα τέλη του 20^{ου} αιώνα, στρατιωτικά προγράμματα όπως το AMRFS εστίασαν στην εκμετάλλευση φάσματος και πόρων μεταξύ ραντάρ και επικοινωνιών. Η ιδέα εξελίχθηκε με την ανάπτυξη του Cognitive Radio (CR) και την εμφάνιση τεχνικών όπως είναι το chirp-based modulation, το οποίο παρείχε μεγαλύτερη ευελιξία και λειτουργικότητα.

Την δεκαετία του 2010, ο δρόμος για μια πιο ουσιαστική ενοποίηση ανοίχτηκε από τεχνολογίες όπως τα MIMO, το OFDM και οι ευρυζωνικές κεραίες. Ιδιαίτερα το 2013, αναδείχθηκε η δυνατότητα της χρήσης του OFDM τόσο για την επικοινωνία όσο και για την εκτίμηση απόστασης ραντάρ. Σειρά είχαν ερευνητικά προγράμματα, όπως το SSPARC, όπου προτάθηκε ο κοινός σχεδιασμός φάσματος για ραντάρ και επικοινωνία.

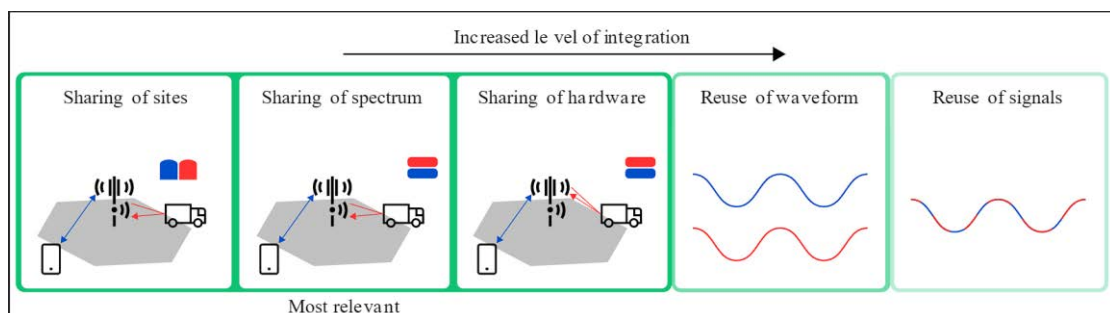
Κατά την μετάβαση προς το 6G, το ISAC αποκτά στρατηγική σημασία. Μερικοί ερευνητές διερευνήσαν σημαντικές υβριδικές αρχιτεκτονικές ISAC με κοινές κυματομορφές και δυναμικό σχηματισμό δέσμης, καθώς και τεχνικές που ενισχύουν την τεχνητή νοημοσύνη. Επιπλέον, χρηματοδοτούμενα έργα σαν τα Horizon Europe 6G-IA προωθούν την ενσωμάτωση ISAC σε τομείς, όπως τα αυτόνομα οχήματα, οι έξυπνες πόλεις και η Βιομηχανία 4.0. Εν κατακλείδι, η μετάβαση από τα ξεχωριστά συστήματα

ραντάρ και επικοινωνίας προς ένα ενιαίο συνεργατικό πλαίσιο ISAC, αποτελεί το αποτέλεσμα δεκαετιών ερευνητικής εξέλιξης και τεχνολογικής σύγκλισης



Εικόνα 1: Χρονολογική εξέλιξη της τεχνολογίας ISAC από το 1860 έως και τις σύγχρονες εφαρμογές της

2.2. Τα επίπεδα ολοκλήρωσης στην Ολοκληρωμένη Ανίχνευση και Επικοινωνία



Εικόνα 2: Τα επίπεδα ενσωμάτωσης στην ISAC: Από την απλή συνύπαρξη στην κοινή χρήση φάσματος, υλικού και κυματομορφών [72].

Η έννοια της ενσωμάτωσης αναφέρεται στα διαφορετικά επίπεδα συνδυασμού των δύο λειτουργιών. Τα πιο βασικά επίπεδα είναι η επικοινωνία και η ανίχνευση όπου μοιράζονται την ίδια τοποθεσία, χωρίς όμως να χρησιμοποιούν κοινό φάσμα ή κοινό υλικό. Σε επόμενο στάδιο ολοκλήρωσης, οι δύο λειτουργίες αρχίζουν να μοιράζονται το φάσμα, ενώ σε ακόμα βαθύτερα επίπεδα επιτυγχάνεται και η κοινή χρήση υλικού. Η κοινή χρήση τοποθεσιών, φάσματος και υλικού θεωρείται κρίσιμη για την πρακτική εφαρμογή του ISAC, καθώς επιτρέπει την αξιοποίηση της υπάρχουσας υποδομής

επικοινωνίας για ανίχνευση μειώνοντας ταυτόχρονα την πολυπλοκότητα της ανάπτυξης και το κόστος.

Σε πιο προηγμένα επίπεδα, η ίδια κυματομορφή μπορεί να χρησιμοποιείται ταυτόχρονα για επικοινωνία και ανίχνευση. Έτσι, τα σήματα επικοινωνίας μπορούν να επαναχρησιμοποιούνται για λειτουργίες εντοπισμού, χωρίς όμως να απαιτείται ξεχωριστή εκπομπή σημάτων ανίχνευσης. Βασίζεται η κυματομορφή κυρίως στην Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας με φυσικό επακόλουθο να στηρίζεται το πρότυπο της ανίχνευσης στον ίδιο τύπο κυματομορφής. Ωστόσο, κυματομορφές διαφορετικές από την OFDM μπορεί επίσης να εξεταστούν, εφόσον προσφέρουν ανώτερη απόδοση και είναι συμβατές με τον υπάρχοντα εξοπλισμό επικοινωνίας.

Το βαθύτερο δυνατό επίπεδο ενσωμάτωσης περιλαμβάνει την πλήρη επαναχρησιμοποίηση των σημάτων επικοινωνίας για ανίχνευση, χωρίς καμία επιπλέον εκπομπή. Με αυτήν την προσέγγιση εξοικονομείται ενέργεια και μειώνεται η πολυπλοκότητα όμως είναι εφαρμόσιμη μόνο όταν οι ιδιότητες του σήματος επικοινωνίας είναι κατάλληλες για ανίχνευση. Επομένως, αυτό το στάδιο θεωρείται περισσότερο ως μια βελτιστοποίηση που θα αξιοποιηθεί σε ώριμες εφαρμογές του ISAC.

Μέχρι ώρας, η ανάλυση της ενσωμάτωσης του ISAC έγινε από τεχνική σκοπιά επικεντρωμένη στο τομέα του ραδιοφάσματος και του εξοπλισμού. Για να καταστεί όμως το ISAC πραγματικά χρήσιμο πρέπει να ενσωματωθεί και σε επίπεδο δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να προσφέρεται μέσω ενός API έκθεσης, το οποίο θα επιτρέπει την πρόσβαση εξωτερικών εφαρμογών στις δυνατότητες αισθητήρων του δικτύου.

2.3. Φαινόμενο Doppler και Εκτίμηση Ταχύτητας

Το φαινόμενο Doppler σχετίζεται με την αλλαγή της συχνότητας ενός κύματος, όπως αυτή παρατηρείται από έναν παρατηρητή που κινείται σε σχέση με την πηγή του κύματος. Στον κόσμο των ραντάρ, χρησιμοποιείται εκτενώς σε συστήματα με Doppler radar για να εξάγει πληροφορία σχετικά με την ταχύτητα στόχων. Έστω ότι η αρχική συχνότητα εκπομπής είναι f_t , η ταχύτητα του φωτός είναι c και η ακτινική ταχύτητα του στόχου είναι v . Η συχνότητα που παρατηρείται στον δέκτη είναι μετατοπισμένη και εκφράζεται από τον τύπο:

$$f_r = f_t \left(\frac{1+v/c}{1-v/c} \right) = f_t \left(\frac{c+v}{c-v} \right) \quad (1)$$

Δεδομένου ότι $v \ll c$ στις περισσότερες εφαρμογές, η συχνότητα Doppler εκφράζεται ως:

$$f_d = 2v \frac{f_t}{c} \quad (2)$$

Στο πλαίσιο των ISAC συστημάτων, η συχνότητα εκπομπής f_r είναι γνωστή και μετρώντας τη μετατοπισμένη συχνότητα λήψης είναι ο δυνατός υπολογισμός της ταχύτητας του κινούμενου στόχου.

2.4. Γρήγορος Μετασχηματισμός Fourier (FFT) και εφαρμογή σε ISAC

Ο μετασχηματισμός Fourier (FT) είναι ένας ακέραιος μετασχηματισμός που μετατρέπει μια συνάρτηση στο πεδίο του χρόνου σε μια συνάρτηση που περιγράφει την κατανομή των συχνοτήτων στο αρχικό σήμα. Στην πράξη, χρησιμοποιούνται συχνότερα ο Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT) και ο Γρήγορος Μετασχηματισμός Fourier (FFT), που αποτελεί αποδοτικό υπολογιστικό εργαλείο για την υλοποίηση του DFT. Ο DFT για μια ακολουθία $x_{2m} = x_0, x_2, \dots, x_{N-2}$. Συγκεκριμένα εκφράζεται ως

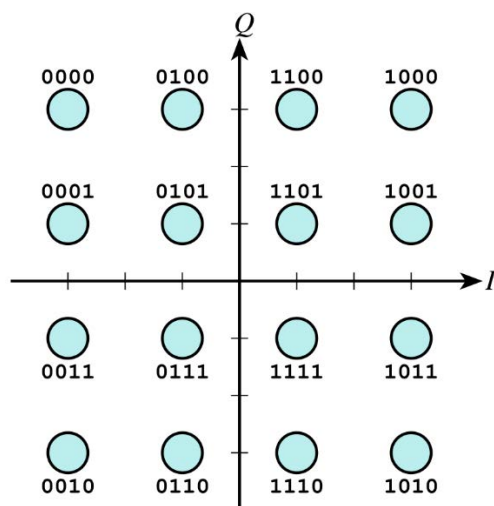
$$X_K = \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2m} e^{-2\pi/N(2m)k} + \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2m} 1 e^{-2\pi/N(2m)k} \quad (3)$$

Η βασική ιδιαιτερότητα του αλγορίθμου έγκειται στην ικανότητα του να εκφράζει τον DFT N σημείων ως συνδυασμό δύο $N/2$ σημείων. Αυτή η αναδρομική προσέγγιση μειώνει την υπολογιστική πολυπλοκότητα σε σύγκριση με τον άμεσο υπολογισμό.

2.5. Διάγραμμα Αστερισμού (Constellation Diagram)

Ένα διάγραμμα αστερισμού είναι μια γραφική αναπαράσταση ενός σήματος που έχει υποστεί ψηφιακή διαμόρφωση, όπως QAM ή PSK. Στην ψηφιακή διαμόρφωση, η πληροφορία μεταδίδεται ως ακολουθία διακριτών δειγμάτων. Το κάθε δείγμα καταλαμβάνει μια συγκεκριμένη χρονική θυρίδα και αναπαριστά το φέρον κύμα με συγκεκριμένο πλάτος και φάση, τα οποία έχουν επιλεγεί από 'σαν πεπερασμένο σύνολο δυνατών τιμών. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε δείγμα κωδικοποιεί ένα «σύμβολο», όπου μεταφέρει ένα ή περισσότερα bits πληροφορίας.

Είναι μια οπτική αναπαράσταση αυτών των συμβόλων. Κάθε σύμβολο κωδικοποιείται με συγκεκριμένο συνδυασμό πλάτους και φάσης του φέροντος επομένως εμφανίζεται ως ένα σημείο στο διάγραμμα, ως σημείο αστερισμού. Επιπλέον, το φέρον κύμα μπορεί να σχηματιστεί από το άθροισμα ενός συνημιτονικού κύματος και ενός ημιτονικού κύματος μετατοπισμένου κατά π . Κάθε σύμβολο που δημιουργείται από αυτές τις συνιστώσες αναπαρίσταται ως ένας μιγαδικός αριθμός, καθιστώντας το διάγραμμα αστερισμού ως ένα μιγαδικό επίπεδο, όπου ο οριζόντιος άξονας αναπαριστά το πραγματικό μέρος και ο κατακόρυφος το φανταστικό. Γενικότερα ισχύει ότι όσα περισσότερα σημεία υπάρχουν στο διάγραμμα, τόσα περισσότερα bits μπορούν να μεταφερθούν ανά δείγμα, αλλά τόσο αυξάνονται και οι απαιτήσεις στην αποδιαμόρφωση λόγω μικρότερης απόστασης μεταξύ των σημείων του αστερισμού.



Εικόνα 3: Διάγραμμα αστερισμού ενός συστήματος διαμόρφωσης 16-QAM [73].

3. Εφαρμογές & Σενάρια Χρήσης της ISAC

Η τεχνολογία ISAC βρίσκει εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα τομέων, καθώς συνδυάζει αρκετές δυνατότητες παρακολούθησης του περιβάλλοντος με ταυτόχρονη ασύρματη επικοινωνία. Με την ενοποιημένη αυτή λειτουργία επιτρέπεται η δυνατότητα έξυπνων συστημάτων, τα οποία ανταποκρίνονται σε πραγματικό χρόνο στις απαιτήσεις του φυσικού και ψηφιακού κόσμου. Η επικοινωνία σε συνδυασμό με την ανίχνευση βελτιώνει αποτελεσματικά την αποδοτικότητα φάσματος και ενέργειας, ενώ παράλληλα εξυπηρετεί ανάγκες επικοινωνίας των χρηστών.

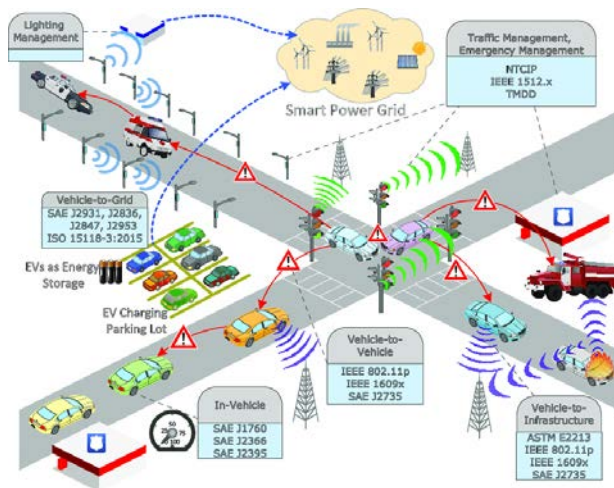
Παρακάτω, θα αναλυθούν μερικά σενάρια εφαρμογών της τεχνολογίας ISAC και τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν με τη χρήση τους.

Έξυπνα Συστήματα Μεταφοράς και Ανίχνευσης για Τουριστικές και Αστικές Περιοχές

Τα σύγχρονα έξυπνα συστήματα μεταφοράς χρησιμοποιούν τεχνικές ανίχνευσης και αυτοματοποίησης, ώστε να βελτιωθεί κυκλοφοριακή ροή και η οδική ασφάλεια. Βασικό στοιχείο για την πρόληψη ατυχημάτων αποτελεί η ανίχνευση εισβολής σε δρόμους και διασταυρώσεις παρουσία εμποδίων. Με την χρήση αισθητήρων, αλγορίθμων μηχανικής μάθησης ή καμερών αναγνωρίζονται επικίνδυνες καταστάσεις ειδοποιούν τους οδηγούς ή τις αρχές για να επέμβουν άμεσα. Επιπλέον, μειώνονται οι καθυστερήσεις και η συμφόρηση μέσω της ανίχνευσης οχημάτων σε πραγματικό χρόνο. Με την τεχνολογία ISAC, επιτρέπεται η ταυτόχρονη συλλογή όλων αυτών των δεδομένων κίνησης και παροχής ασύρματων υπηρεσιών επικοινωνίας στους πολίτες. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες σε φανάρια έχουν την δυνατότητα να ανιχνεύσουν σε πραγματικό χρόνο την κυκλοφοριακή ροή μέσω ραντάρ και να ρυθμίσουν δυναμικά την διάρκεια σηματοδοτών, ενώ παράλληλα διατηρούν σύνδεση με τα κέντρα ελέγχου.

Όσον αφορά τις περιοχές με τουριστικά αξιοθέατα και υψηλή επισκεψιμότητα η κυκλοφορία απαιτεί εξελιγμένες λύσεις για την διαχείριση της κυκλοφορίας. Η βελτιστοποίηση της κυκλοφορίας με την ανάλυση δεδομένων μετακίνησης και την πρόβλεψη της ροής των επισκεπτών, οδηγεί στην λειτουργία έξυπνων φαναριών ή σε συστήματα προσαρμοσμένης σηματοδότησης. Ακόμη, με την χρήση drones τα οποία επιτηρούν και ανιχνεύουν σε περιοχές όπως λιμάνια ή αεροδρόμια των αστικών περιβαλλόντων καθιστούν το αίσθημα της ασφάλειας σε περίπτωση κινδύνου.

Ο σχεδιασμός διαδρομής βάσει τεχνολογίας τεχνητής νοημοσύνης και η έξυπνη πλοήγηση επιτρέπουν στα οχήματα και στα μέσα μαζικής μεταφοράς να κινούνται με μεγαλύτερη ακρίβεια και απόδοση. Τα έξυπνα δρομολόγια λεωφορείων προσαρμόζονται στις απαιτήσεις των πολιτών και οι δυναμικές στάσεις μειώνουν τον χρόνο αναμονής και βελτιώνεται η εμπειρία των πολιτών. Παράλληλα, η έξυπνη παρακολούθηση καμπινών στα μέσα μαζικής μεταφοράς ενισχύει την ασφάλεια των επιβατών μέσω συστημάτων αναγνώρισης συμβάντων και αποτρέποντας εγκληματικές ενέργειες. Αν όλες αυτές οι τεχνολογίες συνδυαστούν οι έξυπνες πόλεις θα γίνουν πιο βιώσιμες, ασφάλειες και φιλικές προς τον πολίτη.



Εικόνα 3: Έξυπνο Σύστημα Μεταφοράς σε αστική περιοχή [74].

Έξυπνες τεχνολογίες στην Βιομηχανία: Ρομποτική, Ανίχνευση και Αυτόνομη πλοήγηση

Η αυτοματοποίηση στον κλάδο της Βιομηχανίας εξελίσσεται συνεχώς με την ενσωμάτωση έξυπνων τεχνολογιών ανίχνευσης και παρακολούθησης μηχανημάτων. Με αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης και αισθητήρων τα αυτόνομα βιομηχανικά οχήματα μπορούν να κινούνται ευέλικτα και με ασφάλεια στους χώρους παραγωγής αποφεύγοντας πιθανά εμπόδια και η διαδρομή τους προσαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο. Η ISAC επιτρέπει την παρακολούθηση μηχανών και διαδικασιών σε πραγματικό χρόνο σε συνδυασμό με αισθητήρες ραντάρ για τον εντοπισμό κινήσεων ή μεταβολών με ταυτόχρονη μετάδοση των δεδομένων στο δίκτυο ελέγχου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνονται οι καθυστερήσεις και να βελτιώνεται η αυτόνομη λειτουργία των συστημάτων ραντάρ.

Με την συνεργασία ανθρώπου και ρομπότ (cobots) σε βιομηχανικά περιβάλλοντα έχουμε την συνεργατική ρομποτική. Τα συγκεκριμένα ρομπότ προσαρμόζονται δυναμικά στις ανάγκες της παραγωγής μέσω προηγμένων συστημάτων οράσεως και αισθητήρων. Παράλληλα, με την απεικόνιση Terahertz υπάρχουν νέες δυνατότητες στην επιθεώρηση υλικών και προϊόντων, ανιχνεύοντας ελαττώματα που εντοπίζονται δύσκολα με τις συμβατικές τεχνικές. Επιπλέον, τα αυτόνομα κινητά ρομπότ αποφεύγουν τις συγκρούσεις και αυξάνουν την αποδοτικότητα των εργοστασίων και των αποθηκών με την έξυπνη καθοδήγηση, καθώς μειώνουν τον κίνδυνο ατυχημάτων και βελτιστοποιούν την διαχείριση υλικού. Αυτή η τεχνολογία βρίσκει εφαρμογή σε διάφορους τομείς όπως η

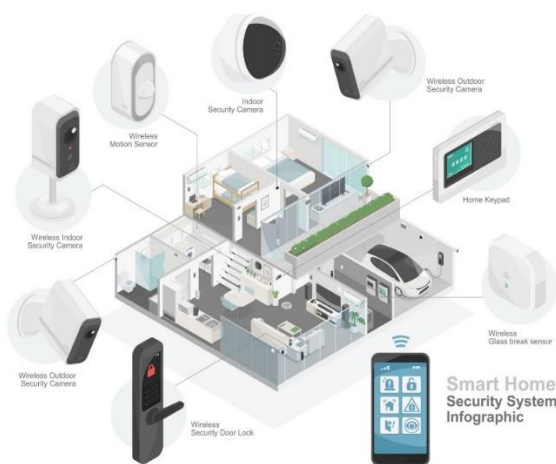
αεροδιαστημική, η φαρμακοβιομηχανία ή η ηλεκτρονική, όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια κατά τον ποιοτικό έλεγχο.

Κατά την πλοήγηση και τον σχηματισμό συμπλεγμάτων αυτόνομων συστημάτων φέρνουν επανάσταση στην βιομηχανική διαδικασία. Ένα σύμπλεγμα ρομπότ μπορεί να εκτελεί μια συντονισμένη εργασία, όπως η χαρτογράφηση του περιβάλλοντος και η βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας. Η ανάλυση και η απεικόνιση δεδομένων από τα συμπλέγματα επιτρέπει τον καλύτερο έλεγχο των διαδικασιών, στην μείωση του παραγόμενου κόστους και στην αύξηση της παραγωγικότητας. Με την ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών, η βιομηχανική διαδικασία γίνεται πιο ευφυής και αυτόνομη μελλοντικά, όπου η αποτελεσματικότητα και η αειφορία οδηγείται στην καινοτομία.

Έξυπνο Σπίτι: Ανίχνευση, Αλληλεπίδραση και Προσαρμοστικότητα

Η τεχνολογία των έξυπνων σπιτιών συνεχώς εξελίσσεται, ενσωματώνοντας σύγχρονα συστήματα ανίχνευσης εισβολής, σε εσωτερικούς χώρους του σπιτιού και εξωτερικούς γύρω απ' αυτό. Με αισθητήρες κίνησης, καμερών με τεχνητή νοημοσύνη και ανάλυσης ήχου, τα έξυπνα σπίτια έχουν την δυνατότητα να αναγνωρίζουν ύποπτες δραστηριότητες και να ειδοποιούν τους κατοίκους ή τις αρχές άμεσα. Τα προηγμένα συστήματα ελέγχου πρόσβασης, ενσωματώνουν βιομετρικά δεδομένα και αλγόριθμους αναγνώρισης προσώπου με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ασφάλεια του χώρου.

Εκτός από την ασφάλεια του χώρου, τα έξυπνα σπίτια βελτιώνουν την καθημερινή εμπειρία και ευεξία των κατοίκων. Γίνεται παρακολούθηση ύπνου μέσω αισθητήρων και wearables για την ακριβή ανάλυση του κύκλου ύπνου ενημερώνοντας για την καλύτερη ξεκούραση και τα δεδομένα ύπνου. Στα συστήματα του σπιτιού γίνονται ρυθμίσεις στις θερμοκρασίες και στον ήχο ανάλογα με τις καθημερινές ανάγκες των χρηστών. Δημιουργούνται ακόμη, εξατομικευμένα περιβάλλοντα διαβίωσης μέσω έξυπνων αλγορίθμων στους εσωτερικούς χώρους μαζί με την επαυξημένη πραγματικότητα όπως, ο δυναμικός φωτισμός και χωρικά προσαρμοσμένα ηχητικά εφέ. Με την αναγνώριση χειρονομιών και τη χωρικά ευφυής υπολογιστική (Spatially Aware Computing). Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει ένα ισομετρικό infographic με αισθητήρες κίνησης, εσωτερικές/ εξωτερικές κάμερες και έξυπνη κλειδαριά, όπου αναδεικνύουν ένα πλήρες σύστημα ασφαλείας σε ένα έξυπνο σπίτι.



Εικόνα 4: Ισομετρικό infographic “Smart home security” [75].

4. Σχεδιασμός Κυματομορφών και Πρωτοκόλλων σε Περιβάλλον ISAC

Το παρόν κεφάλαιο εστιάζει στον σχεδιασμό κυματομορφής και πρωτοκόλλων στο πλαίσιο των Ολοκληρωμένων Επικοινωνιών και Ανίχνευσης. Αρχικά, εισάγεται η εξέλιξη της επικοινωνίας και της ανίχνευσης και οι σχετικές προκλήσεις της. Στη συνέχεια αναλύονται οι βασικές στρατηγικές σχεδίασης κυματομορφών και χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: επικοινωνία, ανίχνευση και συν-βελτιστοποίηση. Έπειτα, αναλύονται τα πρωτόκολλα σε περιβάλλον ISAC. Η συγκεκριμένη ενότητα παρέχει θεωρητική βάση για τις τεχνικές προσομοίωσης στο επόμενο κεφάλαιο.

4.1. Εξελικτικά στάδια υλοποίησης ISAC

Η τεχνολογία ISAC επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση πληροφοριών μεταξύ σημείων και την ανίχνευση παραμέτρων του φυσικού περιβάλλοντος. Αποτελεί θεμελιώδη τεχνολογία για μελλοντικές εφαρμογές, όπως τα δίκτυα 6G. Ο συνδυασμός ανίχνευσης και ασύρματης επικοινωνίας του περιβάλλοντος συμβάλλει στη βελτίωση της ενεργειακής και φασματικής απόδοσης, καθώς και στην μείωση του κόστους υλικού, αφού τα ίδια σήματα και οι πόροι χρησιμοποιούνται τόσο για την μετάδοση δεδομένων όσο και για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος. Με την ενσωμάτωση αυτών των δύο εμφανίζονται προκλήσεις, λόγω διαφορετικών απαιτήσεων απόδοσης, πιθανής εμφάνισης παρεμβολών και ανάγκης επανασχεδιασμού κυματομορφών και

πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Η εξέλιξη της υλοποίησης του ISAC διακρίνεται σε τρία βασικά στάδια, καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει ένα διαφορετικό επίπεδο ενοποίησης και αλληλεπίδρασης μεταξύ των δυο λειτουργιών.

Στο αρχικό στάδιο, η επικοινωνία και η ανίχνευση συνυπάρχουν στο ίδιο σύστημα, όμως λειτουργούν ανεξάρτητα, χρησιμοποιώντας διάφορα υποσυστήματα υλικού, μοιράζοντας το ίδιο φάσμα συχνοτήτων. Αυτή η προσέγγιση έχει ως στόχο την μείωση των πόρων του φάσματος, επιτρέποντας την ταυτόχρονη αξιοποίηση τους. Ωστόσο, ένας βασικός περιορισμός είναι η πιθανότητα εμφάνισης αμοιβαίων παρεμβολών, καθώς το σήμα μπορεί να επηρεάσει την απόδοση της επικοινωνίας και αντιστρόφως. Για τον λόγο αυτό, το βασικό στάδιο που επικεντρώνεται η έρευνα είναι οι τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών και συντονισμού πόρων, για να είναι εξασφαλισμένη η συνύπαρξη των δύο λειτουργιών χωρίς να είναι αναγκασμένοι να επανασχεδιάσουν ριζικά τις κυματομορφές.

Το επόμενο στάδιο εισάγει έναν πιο συνεργατικό μηχανισμό, η επικοινωνία και ανίχνευση αρχίζουν να ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους, ενισχύοντας η μία την απόδοση της άλλης. Ουσιαστικά, η ανίχνευση για να βελτιώσει την ακρίβεια των μετρήσεων της αξιοποιεί δεδομένα από το σύστημα επικοινωνίας και η επικοινωνία από τα σήματα της ανίχνευσης βελτιστοποιεί την μετάδοση.

Ο σχεδιασμός κυματομορφής σε αυτήν την φάση βασίζεται σε τεχνολογίες χαλαρά συζευγμένες, όπου οι λειτουργίες χρησιμοποιούν κοινούς πόρους μέσω πολυπλεξίας (διαίρεσης χρόνου, συχνότητας ή χώρου). Παρόλο που η ενοποίηση στο στάδιο αυτό δεν είναι πλήρης, επιτρέπει την βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος προσφέροντας μια πιο αποδοτική και προσαρμοστική χρήση του φάσματος και των διαθέσιμων πόρων.

Το τελικό στάδιο, αφορά την πλήρη ενοποίηση των δυο λειτουργιών, όπου η επικοινωνία και η ανίχνευση μοιράζονται το ίδιο φάσμα, τους ίδιους πόρους, την ίδια κυματομορφή και τις τεχνικές διαμόρφωσης. Τα σήματα σε αυτή την φάση επανασχεδιάζονται ως σήματα σύντηξης, τα οποία προσαρμόζονται δυναμικά στις εκάστοτε απαιτήσεις επικοινωνίας και ανίχνευσης. Είναι σχεδιασμένα με στενή σύζευξη βελτιστοποιώντας την συνολική απόδοση του συστήματος, χωρίς να τίθεται κάποια λειτουργία σε προτεραιότητα. Κυριαρχεί διατήρηση της υψηλής ταχύτητας απόδοσης και αξιοπιστίας έχοντας χαμηλή καθυστέρηση. Αυτή η προσέγγιση έχει ιδιαίτερη

σημασία σε εφαρμογές όπως, τα αυτόνομα οχήματα, τα έξυπνα εργοστάσια και τα προηγμένα συστήματα επιτήρησης, όπου είναι αναγκαία η συγχρονισμένη λήψη αποφάσεων βάση ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

4.2. Προκλήσεις στον σχεδιασμό κυματομορφών

Σχετικά με τον σχεδιασμό συστημάτων ανίχνευσης και επικοινωνίας, η τεχνολογία ISAC αποσκοπεί στην βέλτιστη αξιοποίηση των ασύρματων πόρων και του υλικού, συνδυάζοντας δυο λειτουργίες για αμοιβαία οφέλη. Ο στόχος είναι όχι μόνο η συνύπαρξη ανίχνευσης και επικοινωνίας, αλλά και η ενίσχυση της απόδοσής της μια μέσω της άλλης. Η προσέγγιση αυτή έχει προσελκύσει σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον, καλύπτοντας ποικίλους τομείς, όπως ο σχεδιασμός κυματομορφών, τα θεμελιώδη όρια απόδοσης, η διαχείριση ραδιοφωνικών πόρων, η επεξεργασία σήματος, η συνύπαρξη ραντάρ και επικοινωνίας, καθώς και δοκιμαστικές πλατφόρμες.

Ωστόσο, οι διαφορετικοί λειτουργικοί μηχανισμοί και οι απαιτήσεις μεταξύ συστημάτων ανίχνευσης και επικοινωνίας είναι οι λόγοι που η αλληλεπίδραση μπορεί να δημιουργήσει αμοιβαίες παρεμβολές. Οι παρεμβολές αυτές μπορούν να μειωθούν ή και να εξαλειφθούν μέσω προηγμένων κυματομορφών προσαρμοσμένες σε συστήματα ISAC. Οι διαφορές των δύο λειτουργιών διαφέρουν σημαντικά: οι κυματομορφές επικοινωνίας χρειάζεται να υποστηρίζουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης των δεδομένων, ενώ οι κυματομορφές ανίχνευσης πρέπει να έχουν σταθερό περιβάλλον και καλές ιδιότητες συσχέτισης. Επιπλέον, η φασματική απόδοση των δικτύων μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με την χρήση κατάλληλων κυματομορφών καθώς με την συνεχή ανάπτυξη ασύρματων υπηρεσιών επιδεινώνει την συμφόρηση στο φάσμα.

4.3. Στρατηγικές Σχεδίασης Κυματομορφών ISAC

Κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός κυματομορφών που εξυπηρετεί ταυτόχρονα τις ανάγκες για ανίχνευση και επικοινωνία συνιστά κρίσιμο παράγοντα στα συστήματα ISAC. Στην παρούσα εργασία, θα αναλυθούν οι υφιστάμενες τεχνολογίες ISAC από την σκοπιά του σχεδιασμού κυματομορφών. Η ταξινόμηση των υπαρχουσών προσεγγίσεων σχεδιασμού κυματομορφών γίνεται σε τρεις κατηγορίες. Είναι ο σχεδιασμός κυματομορφής με έμφαση στην επικοινωνία (CCWD), σχεδιασμός κυματομορφής με έμφαση στην ανίχνευση (SCWD) και από κοινού βελτιστοποίηση και σχεδιασμός κυματομορφής (JWOD).

4.3.1 Σχεδιασμός κυματομορφής με έμφαση στην επικοινωνία (CCWD)

Ο σχεδιασμός της κυματομορφής με έμφαση στην επικοινωνία επιδιώκει στην διατήρηση της βασικής απόδοσης των συστημάτων επικοινωνίας, ενώ παράλληλα επιτρέπει τη λειτουργία ανίχνευσης μέσω κατάλληλων τροποποιήσεων ή μέσω άμεσης αξιοποίησης υφιστάμενων κυματομορφών επικοινωνίας. Σε αυτή την προσέγγιση, η μετάδοση των σημάτων για επικοινωνιακούς σκοπούς χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα και για εξαγωγή πληροφοριών ανίχνευσης, αξιοποιώντας τις ανακλώμενες ηχώ από στόχους. Η λογική είναι το σήμα που εκπέμπεται για επικοινωνιακούς σκοπούς να αξιοποιείται παράλληλα και για ανίχνευση. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η συμβατότητα με υπάρχουσες τεχνολογίες, καθώς οι περισσότερες κυματομορφές επικοινωνίας μπορούν να προσαρμοστούν για να υποστηρίξουν παράλληλα τις δυο λειτουργίες, χωρίς να αλλάξει ριζικά η υποδομή ή να απαιτείται τροποποίηση των φυσικών στρωμάτων των δικτύων. Ένα πρόβλημα του ISAC είναι η ύπαρξη αντισταθμίσιματος (trade-off) μεταξύ ρυθμού μετάδοσης και ακρίβειας ανίχνευσης.

Ωστόσο, η επιλογή της κατάλληλης κυματομορφής επηρεάζει άμεσα την απόδοση του ISAC συστήματος αν και θεωρητικά οποιαδήποτε κυματομορφή επικοινωνίας υποστηρίζει την μονοστατική ανίχνευση, η πρακτική υλοποίηση ενέχει κινδύνους. Η χρήση τυχαίων δεδομένων επικοινωνίας, ενδέχεται να υποβαθμίσει σημαντικά την απόδοση της ανίχνευσης, καθώς ενδέχεται να αυξήσει τον λόγο κορυφής προς μέση τιμή (PAPR) και τον φασματικό θόρυβο. Ακόμη, με την προσθήκη κυκλικών προθεμάτων, απαραίτητων για την αποφυγή παρεμβολής μεταξύ συμβόλων, μπορεί να εισάγει ασάφεια στο φάσμα Doppler, επηρεάζοντας αρνητικά την ακρίβεια στην εκτίμηση ταχύτητας στόχων. Επίσης, η μερική μεταφορά πληροφορίας μέσω των κυματομορφών οδηγεί σε αύξηση της πλευρικής ενίσχυσης, όπου με την σειρά της υποβαθμίζει την διακριτική ικανότητα του συστήματος στην ανίχνευση πολλαπλών στόχων. Επιπλέον, η μερική μεταφορά πληροφορίας μέσω των κυματομορφών οδηγεί σε αύξηση της πλευρικής ενίσχυσης και υποβαθμίζει τη διακριτική ικανότητα του συστήματος στην ανίχνευση πολλαπλών στόχων. Οι προαναφερθείσες προκλήσεις καθιστούν αναγκαία την βελτιστοποίηση των σημάτων με σκοπό την αποδεκτή ισορροπία μεταξύ των δύο λειτουργιών.

Οι κύριες προσεγγίσεις περιλαμβάνουν κυματομορφές όπως, η OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), η οποία είναι ήδη διαδεδομένη στις

σύγχρονες επικοινωνίες λόγω της ανθεκτικότητας της σε πολυδιαδρομικά κανάλια και δυνατότητες εύκολης ενσωμάτωσης τεχνικών ανίχνευσης. Επίσης, μελετώνται κυματομορφές απλού φορέα, οι οποίες παρέχουν πλεονεκτήματα σε περιβάλλοντα υψηλής κινητικότητας λόγω του χαμηλού PAPR, καθώς και αναδυόμενες κυματομορφές οι οποίες αναπτύσσονται ειδικά για ISAC, όπως οι GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing), OTFS (Orthogonal Time Frequency Space), OTSM (Orthogonal Time Frequency Space-Modulation), AFDM (Affine Frequency Division Multiplexing), επιδιώκοντας τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ επικοινωνίας και ανίχνευσης. Ωστόσο, η χρήση κυματομορφών επικοινωνίας για ανίχνευση ενδέχεται να μην επιτυγχάνει την ίδια ακρίβεια με παραδοσιακές κυματομορφές ανίχνευσης.

Συμπερασματικά, ο σχεδιασμός κυματομορφών με επικοινωνιοκεντρική προσέγγιση αποτελεί μια ελκυστική επιλογή λόγω της συμβατότητας με υφιστάμενα δίκτυα και της προσαρμοστικότητας της σε μελλοντικά 6G συστήματα. Παρ' όλα αυτά, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τη βελτιστοποίηση των σημάτων επικοινωνίας, ώστε να ενσωματώσουν δυνατότητες υψηλής ακρίβειας ανίχνευσης χωρίς να υποβαθμίζουν την απόδοση της επικοινωνίας.

4.3.1.1.OFDM

Η πολυτονική διαμόρφωση OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές διαμόρφωσης στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνίας, κυρίως λόγω της υψηλής φασματικής απόδοσης, της ανθεκτικότητας σε πολυδιαδρομική εξασθένιση (multipath fading) και της σχετικά απλής υλοποίησης. Παράλληλα, η OFDM προσφέρει σημαντική ευελιξία στη διαχείριση των πόρων σε χρόνο και συχνότητα, γεγονός που επιτρέπει τη συνδυασμένη λειτουργία επικοινωνίας και ανίχνευσης, διευκολύνοντας την αποτελεσματική αναγνώριση στόχων ραντάρ. Γενικά, η OFDM κυματομορφή ορίζεται ως:

$$s(t) = \sum_{n=1}^{N_s-1} \sum_{m=1}^{N_c-1} a(m,n) e^{j2\pi(f_c + m\Delta f)t} \text{rect}\left(\frac{t-nT_s}{T_s}\right) \quad (4)$$

Στον πυρήνα της λειτουργίας της, η OFDM διαμόρφωση ακολουθεί τα εξής βήματα: αρχικά, οι δυαδικές ακολουθίες δεδομένων μετατρέπονται σε σύμβολα διαμόρφωσης βάσει συγκεκριμένου αστερισμού (modulation constellation). Έπειτα, γίνεται η μεταφορά των συμβόλων από το πεδίο της συχνότητας στο πεδίο του χρόνου με την χρήση του Αντίστροφου Μετασχηματισμού Fourier (Inverse Fast Fourier

Transform-IFFT) και στην συνέχεια γίνεται η μετάδοση της. Στην λήψη η αποκωδικοποίηση των δεδομένων πραγματοποιείται με τον επικοινωνιακό δείκτη, ενώ με τον δείκτη ραντάρ γίνεται η ανίχνευση στόχων.

Μια πρωτοποριακή προσέγγιση [1] που προτάθηκε αναφέρεται στην αξιοποίηση της επεξεργασίας σήματος βασισμένης σε σύμβολα διαμόρφωσης, αντί των παραδοσιακών μεθόδων συσχέτισης (correlation-based methods) που χρησιμοποιούν σήματα χαμηλής ζώνης (baseband signals). Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την χρήση συμβόλων διαμόρφωσης κατά τη μετάδοση και λήψη για την εκτίμηση στις απόστασης (range) και στις ταχύτητας Doppler, με αποτέλεσμα την μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας του συστήματος.

Ενός κρίσιμος παράγοντας με μεγάλη επιρροή στην απόδοση της ανίχνευσης σε συστήματα ISAC που βασίζονται στην OFDM είναι η κατανομή ισχύος και ο αριθμός των υποφερόμενων (subcarriers). Η σωστή διαμόρφωση των παραπάνω παραμέτρων έχει την δυνατότητα να βελτιώσει σημαντικά την φασματική απόδοση και την ποιότητα ανίχνευσης. Στην εργασία [2] προσεγγίζεται μια πιο προσαρμοστική στρατηγική κατανομής ισχύος, στην οποία η ισχύς που μεταδίδεται και ο λόγος σήματος στις θόρυβο (SNR) θα προσαρμοστεί δυναμικά για κάθε υποφέρουσα, με βασικό σκοπό τη βελτίωση στις αξιοποίηση του φάσματος.

Επιπροσθέτως, στην εργασία [3] αναπτύχθηκε ένα βελτιωμένο μοντέλο σχεδιασμού, το οποίο λαμβάνει υπόψη όχι μόνο ο αριθμός των υποφερόντων (N_a) και των συμβόλων OFDM (N_s), αλλά και στις παραμέτρους του διαστήματος μεταξύ των προσφερόμενων (Δf) και το διάστημα επανάληψης των παλμών (pulse repetition interval), προκειμένου να ικανοποιούνται διαφορετικές απαιτήσεις στην επικοινωνία και την ανίχνευση.

Στην εργασία [4] υλοποιείται η ελαχιστοποίηση στις μεταδιδόμενη ισχύος σε κάθε υποφέρουσα, υπό τον περιορισμό στις αμοιβαίες πληροφορίας (mutual information-MI) και των απαιτούμενων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων. Αντίστοιχα, σε ένα πιο σύγχρονο μοντέλο [5] η κατανομή στις ισχύος προσαρμόστηκε δυναμικά βασισμένα στην ανάδραση των σκεδαζόμενων σημάτων (backscattered signals), με σκοπό να βελτιστοποιηθεί η συνολική απόδοση ανίχνευσης και επικοινωνίας.

Μια ακόμα σημαντική πληροφορία παρουσιάστηκε στην εργασία [6], όπου δεν έγινε χρήση όλων των διαθέσιμων υποφερουσών για την μετάδοση στις πληροφορίες.

Ωστόσο, εμπλουτίστηκαν οι «κενές» υποφέρουσες με βελτιστοποιημένα δείγματα στο πεδίο της συχνότητας, προκειμένου η ικανότητα ανίχνευσης του συστήματος ISAC να ενισχυθεί. Ακόμη, στην εργασία [7] καταγράφεται μια δυναμική προσέγγιση, σύμφωνα με την οποία διαφορετικά επίπεδα ισχύος και κωδικοποιήσεις φάσης εφαρμόστηκαν στις υποφέρουσες, λαμβάνοντας υπόψη την επιλεκτικότητα συχνότητας του ευρυζωνικού καναλιού. Τέλος, στην εργασία [8] γίνεται μελέτη στις ταυτόχρονης σχεδίασης κωδικών εκπομπής (transmit codes) και φίλτρων λήψης (receive filters) με στόχο τη δημιουργία μιας κυματομορφής που να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις επικοινωνίας όσο και στις απαιτήσεις ανίχνευσης.

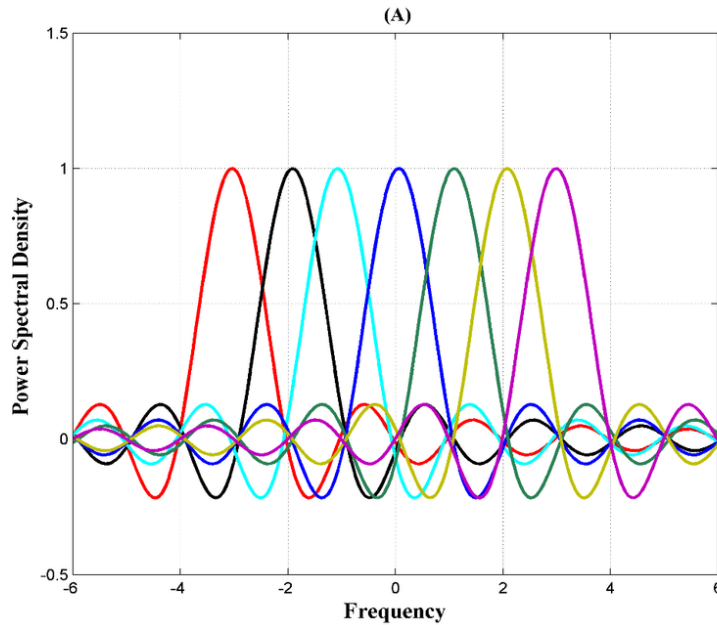
Ένα ακόμα πρόβλημα που απασχολεί τα συστήματα είναι ο υψηλός λόγος αιχμής προς μέση ισχύ (Peak-to-Average-Power-Ratio-PAPR), όπου ανεπιθύμητες μη γραμμικότητες στον πομπό μπορεί να προκληθούν. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το γεγονός προτάθηκε μια βελτιστοποιημένη στρατηγική για την μείωση του όπου περιέχεται μια προσεκτική ρύθμιση ισχύος στις υποφέρουσες που βρίσκονται σε συμπληρωματικές συχνότητες στις ζώνες επικοινωνίας [9].

Εκτός από την χρήση κατανομής υποφερόμενων για την βελτίωση στις απόδοσης, ορισμένοι ερευνητές μελετούν την επίτευξη υψηλής ανάλυσης εκτίμησης παραμέτρων ραντάρ σε συστήματα OFDM ISAC. Γι' αυτό τον λόγο, έχει προταθεί η μέθοδος της τυχαίας διαμόρφωσης φάσης υποφερόμενων, η οποία στοχεύει στην μείωση ασάφειας Doppler κατά την ανίχνευση. Στην εργασία των Li και συνεργάτες προτείνεται η εκτίμηση των καθυστερήσεων Doppler, καθώς και των σφαλμάτων αποδιαμόρφωσης, μέσω της μεθόδου σπάνιας αποκατάστασης με σκοπό να βελτιωθεί η χωρική και η χρονική ανάλυση μέσα σε ένα παθητικό σύστημα ραντάρ OFDM. Ομοίως, γίνεται παρουσίαση μιας μεθόδου υψηλής ανάλυσης για την εκτίμηση απόστασης και ταχύτητας, όπου το εύρος ζώνης του σήματος και το συνεκτικό χρονικό διάστημα επιλέγονται για να εξασφαλιστεί η ακρίβεια των υπολογισμών. Παράλληλα, υπάρχει η περίπτωση εκμετάλλευσης των υπάρχοντων επικοινωνιακών σημάτων για να επιτευχθεί υψηλή ανάλυση στην εκτίμηση απόστασης και ταχύτητας [13].

Ένα από τα βασικά ζητήματα είναι η διασφάλιση αξιοπιστίας στην επικοινωνία, κυρίως σε περιβάλλοντα κυψελωδών δικτύων. Διερευνάται κυρίως η διάκριση των επιθυμητών σημάτων από παρεμβολές και θόρυβο μέσω τεχνικών όπως η χρήση πολλαπλών συμπληρωματικών ακολούθων φάσης, κυρίως οι P3 και P4 οι οποίες

προστίθενται στις κυματομορφές καθιστώντας στις ανθεκτικές στις παρεμβολές μεταυποφερόμενων (Intercarrier Interference-ICI) και στην εξασθένιση λόγω πολυδιαδρομών (Multipath Fading). Για να βελτιωθεί η επικοινωνιακή αξιοπιστία και να ελαχιστοποιηθούν οι αμοιβαίες παρεμβολές μεταξύ επικοινωνίας και ανίχνευσης χρησιμοποιείται μια κυματομορφή βασισμένη στην διαίρεση κώδικα [14]. Βασίζεται στον πολλαπλασιασμό του διανύσματος κώδικα άμεσης ακολουθίας φασματικής διασποράς με τα πληροφοριακά σύμβολα, ώστε να είναι πιο αποτελεσματική η διάκριση των επιθυμητών σημάτων από παρεμβολές. Μια μέθοδος που προτείνεται είναι η μεγιστοποίηση του λόγου σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (SINR) [15], προσμετρώντας τους περιορισμούς ισχύος ανά κεραία στο ραντάρ και τον περιορισμό του συνολικού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Επιπρόσθετα, παρατίθενται μια μέθοδος στην οποία [16] οι πληροφορίες επικοινωνίας εισέρχονται στη στήριξη ενός αραιού διανύσματος και μεταδίδονται ως χαμηλής διάστασης σήμα, με σκοπό την βελτίωση στις αξιοπιστίας και ελαχιστοποίησης των πλευρικών λοβών του σήματος.

Συμπερασματικά, η κυματομορφή OFDM έχει μελετηθεί αναλυτικά για την υλοποίηση των ταυτόχρονων λειτουργιών στις ανίχνευσης και επικοινωνίας με κύριο σκοπό την βελτίωση των επιδόσεων. Οι κυριότερες ερευνητικές προκλήσεις που αναδείχθηκαν περιέχουν την ασάφεια Doppler και απόστασης, τον υψηλό λόγο κορυφής στις την μέση ισχύ, την παρεμβολή μεταξύ υποφερόμενων και την παρεμβολή μεταξύ συμβολών.



Εικόνα 5: Απεικόνιση πολλαπλών φερόντων στο σήμα OFDM

4.3.1.2. Κυματομορφές απλού φορέα

Οι κυματομορφές μονής συχνότητας, σε αντίθεση με την κυματομορφή OFDM που χρησιμοποιεί πολλαπλούς φορείς για την παράλληλη μετάδοση δεδομένων, εμφανίζει χαμηλότερη αναλογία κορυφής προς μέση ισχύ (PAPR). Η χαμηλή τιμή του PAPR επιφέρει θετικά αποτελέσματα, προσφέροντας αξιοπιστία στην άμεση ισχύ του συστήματος και αύξηση ανθεκτικότητας των ενισχυτών σε μη γραμμικές διαστρεβλώσεις. Η εφαρμογή της τεχνικής ευρέος φάσματος είναι βασικό συστατικό για στις κυματομορφές μονών φορέων και παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα στον τομέα στις επικοινωνίες. Στην επικοινωνία ευρέως φάσματος, τα μεταδιδόμενα δεδομένα πολλαπλασιάζονται σε ψευδοτυχαία ακολουθία, επεκτείνοντας το φάσμα πριν την μετάδοση. Οι ακολουθίες αυτές περιέχουν εξαιρετικές ιδιότητες αυτοσυσχέτισης γεγονός που τις καθιστά χρήσιμες και ανιχνεύουν στόχους μέσω των ραντάρ. Οι εν λόγω ακολουθίες συμβάλλουν στην αύξηση της ακρίβειας μέτρησης και παρέχουν υψηλή ανθεκτικότητα σε παρεμβολές και θόρυβο. Για τον λόγο αυτό, οι τεχνολογίες του ευρέως φάσματος χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές επικοινωνίας τρίτης γενιάς και σε σύγχρονα συστήματα χαμηλής φασματικής πυκνότητας, όπου απαιτείται αξιοπιστία και ασφάλεια.

Χρησιμοποιώντας το spread spectrum στην τεχνολογία ISAC έχει αναδειχθεί ως μια καινοτόμος προσέγγιση, ιδιαίτερα ως προς την αντιμετώπιση των προκλήσεων

συνύπαρξης ανίχνευσης και επικοινωνίας. Στις εσωτερικές ακολουθίες (ισοδύναμες άρτιες και περιττές) συνδέονται σε μια εξωτερική ακολουθία M , προκειμένου να δημιουργηθεί μια πιο συνθετική ακολουθία διάδοσης με εξαιρετικές ιδιότητες συσχέτισης, οι οποίες συμβάλλουν στην επίτευξη βελτιωμένων επιδόσεων. Επιπλέον, λόγω υψηλού PAPR εφαρμόζεται μια καινούρια καινοτομία για να επιλυθεί αυτό το πρόβλημα, η προσπέλαση συχνότητας μονών φορέων (SC-FDMA). Παράλληλα, σε ραντάρ παλμών μονής συχνότητας προτείνεται η αξιοποίηση των φασικών διαταραχών ψηφιακών ακολουθιών, ώστε να μειωθούν οι πλευρικές λοβοί στο πεδίο στις εμβέλειες και να βελτιωθεί η συνολική απόδοση. Οι παραπάνω μελέτες δείχνουν την εξέλιξη των τεχνικών του spread spectrum και την δυναμική ένταξη σε ενιαία συστήματα, τα οποία εξυπηρετούν την ανάγκη για ανίχνευση και επικοινωνία. Συμπερασματικά, οι κυματομορφές μονής συχνότητας και η τεχνική spread spectrum αποτελούν σημαντική επιλογή για υλοποιήσεις ISAC που απαιτούν χαμηλό PAPR σε συνδυασμό με υψηλή ακρίβεια ανίχνευσης και ανθεκτικότητα σε περιβάλλοντα με παρεμβολές.

4.3.1.3. Αναδυόμενες Κυματομορφές για ISAC

Εκτός από τις κλασσικές κυματομορφές, τα σήματα OFDM και οι κυματομορφές μονών φορέων αναπτύχθηκαν νέες τεχνολογίες που υποστηρίζουν διπλές λειτουργίες. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται η ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας με chirp (OCDM), διαμόρφωση με ένθετη μεταφορά πληροφορίας (IM) και η ορθογώνια διαμόρφωση στο πεδίο του χρόνου, της συχνότητας και του χώρου (OTFS).

OCDM (Orthogonal Chirp Division Multiplexing)

Η Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνοτήτων με chirp (OCDM) στηρίζεται στη μετάδοση πολλαπλών ορθογώνιων κυματομορφών τύπου chirp, όπου μοιράζονται το ίδιο εύρος ζώνης. Σ' αυτού του είδους την διαμόρφωση, τα διάφορα πλάτη και φάσεις επικαλύπτονται χρονικά ή/και φασματικά. Το κάθε chirp έχει έκταση σε ολόκληρο το φάσμα του σήματος, το εύρος ζώνης ελέγχεται από τον ρυθμό δειγματοληψίας του μετατροπέα από ψηφιακό σε αναλογικό (DAC).

Για να βελτιωθεί η απόδοση τέτοιων συστημάτων προτάθηκαν τεχνικές οι οποίες έρχονται αντιμέτωπες με συγκεκριμένες προκλήσεις. Πιο συγκεκριμένα [18], για να αυξηθεί η αποδοτικότητα στις ισχύος του συστήματος, προτάθηκε η μείωση του λόγου κορυφής προς μέση ισχύ (PAPR) και η μετατόπιση συχνότητας φορέα για τη εκτίμηση του καναλιού. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιήθηκε κυκλικό

πρόθεμα ως μηχανισμός αντιστάθμισης πριν από τη διαδικασία εκτίμησης του καναλιού, ώστε να βελτιωθεί η αξιοπιστία στις επικοινωνίες [19]. Η κυματομορφή OCDM παρουσιάζει υψηλή ανθεκτικότητα σε παρεμβολές και πολυδιαδρομικά φαινόμενα λόγω της ιδιότητας της να χρησιμοποιεί chirps που καταλαμβάνουν όλο το φάσμα, καθιστώντας την κατάλληλη για εφαρμογές ISAC σε δυναμικά περιβάλλοντα.

OTFS (Orthogonal Time Frequency Space)

Η κυματομορφή OTFS (Orthogonal Time Frequency Space) αποτελεί μια αναδυόμενη τεχνολογία διαμόρφωσης, η οποία έχει αναδειχθεί κατάλληλη για εφαρμογές επικοινωνίας σε περιβάλλοντα υψηλής κινητικότητας. Στηρίζεται στον συνδυασμό της τεχνικής παραθύρωσης (windowing) και της αντίστροφης συμπλεκτικής μετατροπής (inverse symplectic transform) επιτυγχάνοντας μια εναλλακτική μέθοδο διαμόρφωσης. Σε αντίθεση με την OFDM, η οποία πραγματοποιείται στον χρονο-συχνοτικό τομέα, η OTFS χρησιμοποιεί την διαμόρφωση στο πεδίο καθυστέρηση-Doppler για να αποτυπωθεί και να μεταδοθεί η πληροφορία. Γι' αυτό τον λόγο, η OTFS καθίσταται ιδιαίτερα ανθεκτική στις διακυμάνσεις του καναλιού, προσφέροντας αυξημένη αντοχή στις καθυστερήσεις και στις μεταβολές του Doppler, χαρακτηριστικά κρίσιμα για τα δίκτυα επικοινωνιών και σε συστήματα υψηλής ταχύτητας.

Η OTFS βρίσκει εφαρμογή τόσο στις κλασσικές ασύρματες επικοινωνίες όσο και σε συστήματα ολοκληρωμένης επικοινωνίας και ανίχνευσης. Σε πρόσφατη εργασία [20], παρουσιάζεται ενιαίο σύστημα εκτίμησης παραμέτρων ανίχνευσης και επικοινωνίας το οποίο βασίζεται στην διαμόρφωση OTFS και μπορεί να αξιοποιήσει μοναδικά χαρακτηριστικά στο πεδίο καθυστέρησης Doppler. Ακόμη, προτείνεται η μεθοδολογία εκτίμησης της απόστασης και της ταχύτητας, με στόχο την ενίσχυση των ραντάρ επόμενης γενιάς. Σε εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων [21] η OTFS έχει χρησιμοποιηθεί σε συστήματα ISAC για να βελτιωθεί η αξιοπιστία και η ενεργειακή απόδοση. Παράλληλα, το πλεονέκτημα της είναι να λειτουργεί αποτελεσματικά σε χρονικά μεταβαλλόμενα κανάλια, όπου την καθιστά κατάλληλη για δικτυακές εφαρμογές σε έξυπνες εφαρμογές και σε οχήματα συνδεδεμένα με δίκτυα V2X. Εκεί αξιοποιείται για την εκτίμηση θέσης, ταχύτητας και των οχημάτων σε πραγματικό χρόνο [22].

Συνολικά, η συγκεκριμένη κυματομορφή θεωρείται πρωτοποριακή για τέτοιου είδους συστήματα, με πλεονέκτημα σε δύσκολα ραδιοπεριβάλλοντα και σε εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις όπως τα δίκτυα 6G και τα αυτόνομα οχήματα. Σε σχέση με την

OFDM, η OTFS προσφέρει διαφορετικά πλεονεκτήματα χάρις στις ξεχωριστές φιλοσοφίας που υιοθετεί. Τα οποία θα αναλυθούν σε επόμενη ενότητα αυτής της εργασίας.

GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing)

Το GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing) είναι μια σύγχρονη τεχνική διαμόρφωσης που παρέχει ευελιξία και μειωμένη καθυστέρηση, κάτι που την καθιστά κατάλληλη τόσο για επικοινωνίες όσο και για εφαρμογές πέραν αυτών. Σε σύγκριση με τη OFDM, η GFDM παρουσιάζει χαμηλότερες εκπομπές εκτός ζώνης και μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό των υποσυμβόλων και των υποκαναλιών.

Η μετάδοση πραγματοποιείται μέσω μπλοκ και είναι πολυφασική τεχνική διαμόρφωσης. Κατά την εφαρμογή διαμόρφωσης χρησιμοποιείται ένα δίπτυχο χρόνου-συχνότητας αποτελούμενο από M συμβολοσειρές και N υποφέρουσες για την μετάδοση συνολικά $M \times N$ συμβόλων δεδομένων $d_{n,m}$ όπου $n=0,\dots,N-1, m=0,\dots,M-1$. Το διακριτό σήμα εκπομπής στην βασική ζώνη για ένα τυπικό σύστημα δίνεται μέσω κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου. Πλήθος μελετών έχει δείξει ότι η GFDM υπερτερεί της OFDM ανεξαρτήτως τύπου καναλιού διάδοσης, ενώ προσφέρει δυνατότητες μείωσης της υπολογιστικής πολυπλοκότητας. Επιπλέον, προτάθηκε η συνδυασμένη χρήση στις τεχνικές massive MIMO (πολλών χρηστών και πολλαπλών κεραιών) με τη GFDM. Τα αποτελέσματα του πειράματος έδειξαν ότι αυξήθηκε ο αριθμός των κεραιών στον σταθμό βάσης με φυσικό επακόλουθο να μειωθεί ο ρυθμός σφαλμάτων bit, ειδικά σε σενάρια χαμηλού SNR. [37]. Επιπλέον, αναπτύχθηκε μια μέθοδο ταυτόχρονου συγχρονισμού στον χρόνο και την συχνότητα, η οποία αποδείχθηκε ανθεκτική σε σημαντικές χρονικές και συχνοτικές αποκλίσεις. Η συγκεκριμένη τεχνική εφαρμόστηκε σε συστήματα με διαμόρφωση GFDM, αποδεικνύοντας ότι μπορεί να χειρίζεται μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ πομπού και δέκτη [38].

Τέλος, τα σχήματα GFDM μπορούν να αξιοποιηθούν και σε περιβάλλοντα διπλής διασποράς (χρονική και συχνοτική). Ακόμη, προτάθηκε η χρήση έξυπνων ανακλαστικών επιφανειών (Intelligent Reflective Surfaces – IRS) σε συστήματα GFDM με τα αποτελέσματα να δείχνουν ότι είχε βελτιωθεί σημαντικά ο ρυθμός μετάδοσης και το BER [39]. Η GFDM αποτελεί μια ελκυστική λύση για μελλοντικά συστήματα, χάρη στην παραμετρική του ευελιξία, την προσαρμοστικότητα σε δυναμικά κανάλια και την συμβατότητα σε τεχνολογίες όπως Massive MIMO το και το IRS.

OTSM (Orthogonal Time- Sequence Multiplexing)

Η διαμόρφωση OTSM (Orthogonal Time- Sequence Multiplexing) αποτελεί μια νεότερη τεχνική διαμόρφωσης μονού φέροντος (single- carrier), η οποία επιτυγχάνει παρόμοια απόδοση ως στις τον ρυθμό σφαλμάτων bit BER με τη διαμόρφωση OTFS. Η OTSM συνδυάζει τον πολυπλεξισμό κατά χρόνο (TDM) με τον πολυπλεξισμό ακολουθιών (sequence multiplexing), με τα σύμβολα πληροφορίας να πολυπλέκονται στο πεδίο καθυστέρησης και στην περιοδική δομή ακολουθίας. Στο πλαίσιο αυτό, η ακολουθία ορίζεται ως ο αριθμός μηδενικών διελεύσεων ανά μονάδα χρόνου.

Σε περιβάλλοντα ασύρματης επικοινωνίας με υψηλή κινητικότητα η OTSM παρουσιάζει ιδιαίτερα αξιόπιστη απόδοση. Συγκριτικά με στις κυματομορφές OTFS, OTSM και OCDM στα κανάλια με διπλή διασπορά (σε χρόνο και συχνότητα), η OTSM μπορεί να μεταδώσει πολλαπλά σήματα με ένα μόνο κανάλι, χρησιμοποιώντας ορθογώνιες κυματομορφές για την μετάδοση συμβόλων στον χρόνο και στην κατανομή στις στις υποφέροντες στις συχνότητας. Η παραπάνω τεχνική παρουσιάζει ευρεία εφαρμοστικότητα σε σύγχρονα ασύρματα συστήματα, ειδικά σε κυψελοειδή δίκτυα. Επίσης, η απόδοση BER των OTFS και OTSM τόσο σε περιβάλλοντα μεμονωμένων όσο και πολύπλοκων χρηστών, υπερσχύει σημαντικά σε σχέση με την OFDM. Τέλος, προτάθηκε στον ανιχνευτή χαμηλής πολυπλοκότητας για MIMO συστήματα βασισμένα στην OTSM. Ο συγκεκριμένος ανιχνευτής αξιοποιεί τα διανύσματα συμβόλων από διαφορετικά παρακλάδια πολυπλοκότητας, με σκοπό να ενισχύσει σταδιακά τον λόγο σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο. Με αυτόν τον τρόπο, τα φαινόμενα πολλαπλών διαδρομών αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά και οι παρεμβολές μεταξύ κεραιών. Η OTSM αποτελεί μια υποσχόμενη επιλογή για μελλοντικά συστήματα, λόγω της απλότητας, της αντοχής σε δυναμικά κανάλια και το πόσο συμβατή είναι με αρχιτεκτονικές MIMO.

AFDM (Affine Frequency Division Multiplexing)

Τα σύγχρονα συστήματα επικοινωνίας συχνά αντιμετωπίζουν δυσκολίες στην αποδοτική αξιοποίηση του φάσματος και στη διατήρηση υψηλών ρυθμών μετάδοσης, ειδικά σε περιβάλλοντα υψηλής κινητικότητας και πολλαπλών συνδέσεων. Για την αντιμετώπιση αυτών των θεμάτων αναπτύσσονται νέες κυματομορφές στις η AFDM (Affine Frequency Division Multiplexing), η οποία βελτιστοποιεί τις παραμέτρους διαμόρφωσης με στόχο την αύξηση της φασματικής απόδοσης και τη βελτίωση της ταχύτητας μετάδοσης.

Σε ασύρματα περιβάλλοντα με παρεμβολές και φαινόμενα εξασθένισης, η AFDM βασίζεται στον αντίστροφο διακριτό μετασχηματισμό Affine Fourier (IDAF), ο οποίος διαμορφώνει σύμβολα σε έναν «παραμορφωμένο» χωροχρονικό ή συγχρονικό χώρο, επιτυγχάνοντας ορθογωνιότητα στον άξονα καθυστέρησης-Doppler και προσφέροντας ευελιξία στον σχεδιασμό. Η AFDM διακρίνεται για την πλήρη διαφοροποίηση, τη δυνατότητα βελτιστοποίησης, τον υψηλό ρυθμό μετάδοσης και τη μειωμένη υπολογιστική πολυπλοκότητα- χαρακτηριστικά που καθιστούν ισχυρή υποψήφια για μελλοντικές ISAC εφαρμογές [40].

Πολλές μελέτες έχουν επιβεβαιώσει τα πλεονεκτήματα της. Αρχικά, αναπτύχθηκε ένα ISAC σύστημα βασισμένο στην AFDM, το οποίο παρουσίασε αυξημένη ανοχή σε μεταβολές Doppler και ικανοποιητική ποιότητα σήματος ακόμη και σε υψηλές ταχύτητες. Μια άλλη έρευνα, δημιούργησε ένα απλό ISAC σύστημα με μια μόνο κεραία, όπου ακόμα και με ένα μόνο σύμβολο καθοδηγούμενης συχνότητας επιτυγχάνεται ανίχνευση παρόμοια με εκείνη ενός πλήρους πλαισίου, μειώνοντας την ανάγκη για πολύπλοκη ακύρωση παρεμβολών και απλοποιώντας την υλοποίηση.

Επιπλέον, προτάθηκαν κυματομορφές σε ορθογώνια LFM σήματα διακριτού χρόνου, οι οποίες προσφέρουν πλήρη διαφοροποίηση ακόμα και σε κανάλια διπλής σκέδασης, αποδεικνύοντας ότι η AFDM υπερέχει εναντίον της OFDM και άλλων πολυκαναλικών τεχνικών σε σενάρια υψηλής κινητικότητας. Επιπλέον, η AFDM προσφέρει καλύτερη φασματική εκμετάλλευση και χαμηλότερες απαιτήσεις από την πλευρά του χρήστη σε σχέση με την OTFS [41].

Σε συγκριτικές μελέτες, έδειξαν ότι η AFDM μπορεί να προσφέρει παρόμοια παρόδοση με την OTFS σε δύσκολα κανάλια, ειδικά όταν εφαρμόζεται εκτίμηση μεγίστης πιθανοφάνειας. Με χρήση τεχνικών εξίσωσης, όπως το MMSE, εντοπίστηκε ένα κατώτατο όριο για το σφάλμα bit βοηθώντας στην μέγιστη απόδοση [42]. Συνοψίζοντας, η AFDM αποτελεί μια καινοτόμο κυματομορφή με σημαντικά πλεονεκτήματα για ISAC εφαρμογές σε απαιτητικά δίκτυα επόμενης γενιάς και ραδιοπεριβάλλοντα.

MIMO-OFDM

Τα συστήματα MIMO-OFDM ενσωματώνουν στις τεχνολογίες MIMO και OFDM επιτυγχάνοντας την ταυτόχρονη αξιοποίηση της χωρικής ποικιλομορφίας προσφερόμενη από πολλαπλές κεραίες του MIMO και της υψηλής φασματικής αποδοτικότητας του OFDM. Ο συνδυασμός αυτός έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών

μετάδοσης και βελτιωμένης ποιότητας σήματος σε ασύρματα περιβάλλοντα. Η ανάθεση συχνοτήτων και χωρικών στοιχείων στις κεραίες αναλύεται με μαθηματικά μέσω μεταθέσεων και συνδυασμών. Ο συνολικός αριθμός μεταθέσεων (N_p) και συνδυασμών (N_c) εξαρτάται από τον τρόπο κατανομής των υποφερουσών συχνοτήτων (subcarriers) σε ομάδες των κεραιών. Στο MIMO-OFDM σύστημα ραντάρ με ορθογώνια ανάθεση συχνοτήτων, τα N διαθέσιμα subcarriers κατανέμονται σε M_T ομάδες (όσες είναι και οι κεραίες εκπομπής), δίχως επαναλήψεις, με την σχέση:

$$N_c = \binom{N}{M_T} M_T^{N-M_T} \quad (5)$$

Όπου επιλέγονται τα πρώτα M_T subcarriers από τα N και στην συνέχεια οι υπόλοιποι $N-M_T$ ομάδες.

Σε περιπτώσεις όπου κάθε κεραία πρέπει να λάβει ίσο αριθμό υποφερουσών, δηλαδή $L_s = \frac{N}{M_T}$, ο συνολικός αριθμός συνδυασμών υπολογίζεται μέσω πολλαπλών διαδοχικών δυαδικών συνδυασμών ως εξής:

$$N_c = \binom{N}{L_s} \binom{N-L_s}{L_s} \dots \binom{L_s}{L_s} = \frac{N!}{(L_s!)^{M_T}} \quad (6)$$

Ο αριθμός των μεταθέσεων, δηλαδή των δυνατών αναδιατάξεων των ομάδων υποφερουσών ανάμεσα στις κεραίες ισούται με $N_p = M_T!$.

Επιπλέον, προτάθηκε ένα επικοινωνιακό μοντέλο βασισμένο στην επιλεκτική κατά συχνότητα εξασθένιση, προκειμένου να μοντελοποιηθεί η συσχέτιση μεταξύ των υποφερουσών στο αισθητήριο κανάλι. Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση των υποφερουσών λόγω φαινομένων εξασθένισης και πολυδιαδρομικότητας, το οποίο στηρίζεται στη ύπαρξη ιδανικής γνώσης κατάστασης καναλιού.

Η επιλογή της κατάλληλης κυματομορφής εξαρτάται από τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Αν το ζητούμενο είναι η υψηλή απόδοση τόσο στην επικοινωνία όσο και στην ανίχνευση, τότε οι κυματομορφές όπως OTSM, OTFS και AFDM είναι κατάλληλες για να προσφέρουν εξαιρετικές επιδόσεις και στις δύο λειτουργίες. Αν από την άλλη, προτεραιότητα είναι η επικοινωνία με χαμηλά φάσματα ή υψηλή φασματική απόδοση, τότε η GFDM είναι ιδανική επιλογή καθώς υστερεί στην ανίχνευση. Για να υπάρχει ένας ισορροπημένος σχεδιασμός οι OFDM και OCDM προσφέρουν ικανοποιητικές επιδόσεις και στους δύο τομείς. Από την άλλη, αν κύριο ζήτημα είναι η

ανίχνευση, η LFM είναι η ιδανική λύση, προσφέροντας εξαιρετική ακρίβεια ανίχνευσης με μέτρια απόδοση στην επικοινωνία.

Συμπερασματικά, η επιλογή της κυματομορφής θα πρέπει να γίνεται με βάση τις απαιτήσεις της εφαρμογής, με στόχο να διασφαλιστεί η βέλτιστη λειτουργία του ISAC συστήματος. Ο Πίνακας 1, παρουσιάζει μια συνοπτική σύγκριση των βασικών κυματομορφών που μελετήθηκαν.

Πίνακας 1: Σύγκριση των κυματομορφών που χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό κυματομορφής με έμφαση την επικοινωνία για ISAC

Μέθοδος Διαμόρφωσης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
OFDM	Υψηλή φασματική απόδοση, μεγάλη αντοχή στη πολυδιαδρομικότητα, εύκολη υλοποίηση	Υψηλό πρόβλημα PAPR, ευαισθησία σε αποκλίσεις συχνότητας και θόρυβο φάσης
OCDM	Ανθεκτικότητα στην πολυδιαδρομικότητα, υποστήριξη επικοινωνίας μεγάλης χωρητικότητας	Πρόβλημα παρεμβολής μεταξύ κωδικών, πολύπλοκη υλοποίηση CDMA
IM	Αποδοτική αξιοποίηση φυσικών και εικονικών πόρων, αύξηση φασματικής αποδοτικότητας	Πιθανή πολυπλοκότητα στο σχεδιασμό και αποκωδικοποίηση
OTSM	Υψηλή φασματική αποδοτικότητα, βελτιωμένη αξιοπιστία συστήματος	Υψηλή πολυπλοκότητα συστήματος, απαιτεί ακριβή συγχρονισμό στον χρόνο και την συχνότητα
GFDM	Υψηλή φασματική ευελιξία, χαμηλή καθυστέρηση, υποστήριξη μη ορθογώνιων υποφερουσών	Υψηλή πολυπλοκότητα δέκτη και προβλήματα παρεμβολής μεταξύ υποφερουσών
AFDM	Ανθεκτικότητα σε επιλεκτική κατά συχνότητα εξασθένιση, υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης	Πολύπλοκη υλοποίηση, απαιτεί ακριβή έλεγχο συχνότητας

MIMO-OFDM	Αυξημένη χωρητικότητα και φασματική αποδοτικότητα, ενισχυμένη αντοχή σε παρεμβολές	Υψηλές απαιτήσεις σε κεραίες και υλικό, πολύπλοκη υλοποίηση συστήματος
------------------	--	--

4.3.2. Σχεδιασμός κυματομορφής με έμφαση την ανίχνευση (SWCD)

Ο σχεδιασμός κυματομορφής με βάση την ανίχνευση (Sensing-Centric Waveform Design-SWCD) αποτελεί κύρια προσέγγιση στα συστήματα ISAC, όπου βασικός στόχος είναι η ενσωμάτωση λειτουργιών επικοινωνίας σε ήδη υπάρχουσες κυματομορφές ανίχνευσης.

Τα ραντάρ διαθέτουν εξαιρετικές δυνατότητες ανίχνευσης και οι πιο πολλές κυματομορφές έχουν σχεδιαστεί με προσανατολισμό την αίσθηση για να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές επικοινωνίας που βασίζονται σε ραντάρ. Ωστόσο, δεν περιλαμβάνονται απευθείας πληροφορίες σηματοδότησης, με αποτέλεσμα να μην είναι κατάλληλες για άμεση χρήση στην επικοινωνία. Συνεπώς, η κύρια πρόκληση στον σχεδιασμό είναι η ενσωμάτωση δεδομένων επικοινωνίας στην κυματομορφή ανίχνευσης, ώστε να διατηρούνται παράλληλα οι πρωταρχικές τις ιδιότητες για την αποτελεσματική εκτέλεση λειτουργιών ανίχνευσης.

Οι τεχνικές ενσωμάτωσης πληροφοριών στις κυματομορφές ανίχνευσης ταξινομούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες. Είναι η ενσωμάτωση πληροφοριών μέσω κυματομορφής chirp. Χρησιμοποιεί τη διαμόρφωση της συχνότητας του σήματος για να μεταδίδει ταυτόχρονα δεδομένα επικοινωνία και διατηρώντας την αποδοτική ανίχνευση. Η ενσωμάτωση πληροφοριών στον χωρικό τομέα εκμεταλλεύεται την κατανομή των σημάτων στον χώρο μέσω χρήσης πολλαπλών κεραιών προσθέτοντας επιπλέον βαθμούς ελευθερίας με σκοπό την ενσωμάτωση δεδομένων επικοινωνίας και τέλος προστίθεται ως τέταρτη κατηγορία μια νέα γενιά κυματομορφής, βασισμένη στο delay-Doppler domain ή Orthogonal Delay Division Multiplexing.

4.3.2.1. Γραμμική διαμόρφωση συχνότητας - Ενσωμάτωση μέσω chirp

Η κυματομορφή τύπου chirp αποτελεί μια από τις διαδεδομένες κυματομορφές ραντάρ και χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση συμβόλων επικοινωνίας σε ένα σύστημα ISAC. Πιο συγκεκριμένα, η μαθηματική έκφραση του είναι η ακόλουθη:

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right)e^{j\pi(2f_c t + \mu t^2)} \quad (7)$$

Όπου, το μ είναι ο ρυθμός διαμόρφωσης της συχνότητας chirp (chirp rate) και ορίζεται από το πηλίκο του εύρους ζώνης προς τη διάρκεια του παλμού.

Ο βασικός στόχος είναι να διαμορφωθούν τα σύμβολα επικοινωνίας στον παλμό chirp είτε μέσω της διαπαλμικής είτε μέσω της ενδοπαλμικής διαμόρφωσης. Μέσω κατάλληλων κανόνων αντιστοίχισης, τα σύμβολα επικοινωνίας αντιστοιχίζονται με διαφορετικούς ρυθμούς chirp και φάσεων.

Αρχικά, τα σήματα ανίχνευσης και επικοινωνίας υιοθετούν το μοντέλο του σήματος στην παραπάνω εξίσωση, όμως με αντίστροφο ρυθμό διαμόρφωσης συχνότητας (μ) [23]. Επιπλέον, τα σύμβολα πληροφορίας ενσωματώνονται σε κάθε ορθογώνια κυματομορφή μέσω διαμόρφωσης φάσης (PSK) [24], ενώ διάφορες ορθογώνιες κυματομορφές χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση διαφορετικών bit επικοινωνίας [25]. Υπάρχουν αρκετοί μέθοδοι για να αποκαταστήσουν την καλή απόδοση στην ανίχνευση ραντάρ, αλλά η απόδοση στην επικοινωνία είναι περιορισμένη. Ένας πιθανός τρόπος να βελτιωθεί ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων είναι να ενσωματωθεί μια ακολουθία δυαδικών συμβόλων μέσα σε κάθε παλμό chirp ή μιας ορθογώνιας κυματομορφής. Μέσω των συνεχών όρων φάσης της συνεχούς διαμόρφωσης φάσης (PM) για την κωδικοποίηση των συμβόλων επικοινωνίας [26] σε συνδυασμό με τον χωρισμό του συνολικού χρόνου σάρωσης T του σήματος LFM σε N μικρότερες υποομάδες διάρκειας T_s , δηλαδή $T=N \times T_s$, όπου κάθε υποομάδα θα μεταφέρει ένα σύμβολο διαμόρφωσης φάσης. Το αποτέλεσμα είναι να επιτευχθούν υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων και ταυτόχρονα να λειτουργεί ικανοποιητικά η ανίχνευση [27].

Τα σήματα τύπου chirp ή LFM (Linear Frequency Modulated) σήμα, χαρακτηρίζονται από γραμμική παρεμβολή της συχνότητας στο χρόνο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φορέας διαμόρφωσης. Κύριες παράμετροι είναι το πλάτος (A), η αρχική συχνότητα και η αρχική φάση, ώστε να μεταφερθούν τα δεδομένα επικοινωνίας ή ακόμη και ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας.

Από την άλλη, τα FMCW (Frequency- Modulated Continuous Wave) σήματα, που είναι LFM σήματα, επιτρέπουν την μετάβαση μεταξύ λειτουργιών επικοινωνίας και ραντάρ. Τα συστήματα στα οποία χρησιμοποιείται η frequency hopping ή ο συνδυασμός με άλλες τεχνικές, όπως FSK και orthogonal keying για την ενσωμάτωση επικοινωνιακής πληροφορίας, προσφέρουν ισορροπία μεταξύ πολυπλοκότητας και απόδοσης.

Μια ακόμη πιο εξελιγμένη κυματομορφή είναι η PMCW (Phase- Modulated Continuous Wave) και η παραλλαγή της CO-PMCW (Code-Orthogonal PMCW). Είναι ιδανική για περιπτώσεις που απαιτείται αυξημένη ανθεκτικότητα σε πολλαπλές ανακλάσεις, σε μεταβολές Doppler και σε δυναμικά περιβάλλοντα, διατηρώντας σχεδόν αμετάβλητη την απόδοση ραντάρ.

4.3.2.2 Ενσωμάτωση πληροφορίας στον χωρικό τομέα

Οι χωρικοί βαθμοί ελευθερίας (DoFs) σε συστοιχίες κεραιών αξιοποιούνται για την ενσωμάτωση πληροφορίας στο ίδιο σήμα και ενισχύουν την ακρίβεια στον εντοπισμό στόχων. Αυτή η προσέγγιση εκμεταλλεύεται τη δυνατότητα του συστήματος να κατευθύνει την ακτινοβολία του σε διαφορετικές γωνίες μέσω beamforming, επιτρέποντας τη διακριτή διαχείριση του σήματος για ραντάρ και για επικοινωνία. Δύο βασικές τεχνικές σχεδιασμού κυματομορφών που αξιοποιούν αυτή την δυνατότητα κατηγοριοποιούνται σε μεθόδους ελέγχου πλευρικών λοβών (sidelobe control) και διαμόρφωσης συστοιχίας κεραιών (array modulation), κάθε μια εκ των οποίων παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα και τεχνολογικές προκλήσεις.

Έλεγχος Πλευρικών Λοβών

Ο στόχος του σχεδιασμού κυματομορφών με βάση τον έλεγχο των πλευρικών λοβών είναι η βελτιστοποίηση της απόδοσης των ραντάρ και των επικοινωνιακών συστημάτων μέσω της διαχείρισης της ενέργειας που εκπέμπεται στους διάφορους λοβούς της δέσμης. Η κύρια δέσμη του διαγράμματος ακτινοβολίας, χρησιμοποιείται για την ανίχνευση στόχων, ενώ οι πλευρικές περιοχές για την μετάδοση επικοινωνιακής πληροφορίας. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση του πλευρικού λοβού πλησίον του κύριου λοβού επιτρέπει την ανίχνευση αδύναμων στόχων χωρίς παρεμβολές που προκαλούνται από ανεπιθύμητες παρεμβολές. Στην βιβλιογραφία προτείνονται τεχνικές, όπου πολλαπλές ορθογώνιες κυματομορφές εκπέμπονται ταυτόχρονα με την δυνατότητα κωδικοποίησης επικοινωνιακής πληροφορίας μέσω διαφορετικών επιπέδων ισχύος και διανυσμάτων διαμόρφωσης δέσμης [28].

Περαιτέρω, μια αρχιτεκτονική εκπομπής για περιβάλλοντα μακρινού πεδίου, επιτρέπει τον διαχωρισμό λειτουργιών ανίχνευσης και επικοινωνίας σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Αντίστοιχα, στην εργασία παρουσιάζεται [29] μια τεχνική δυναμικής προσαρμογής της δομής της συστοιχίας κεραιών για τον έλεγχο της κατανομής της ακτινοβολούμενης ενέργειας στους πλευρικούς λοβούς της δέσμης. Επιπλέον, έχει

προταθεί [30] η διαμόρφωση της συνάρτησης ασάφειας μέσω μηδενισμού συγκεκριμένων σημείων να χρησιμοποιείται τόσο για την διατήρηση της ποιότητας της ρανταρικής ανίχνευσης όσο και για την κωδικοποίηση πληροφορίας.

Σε όλες τις προαναφερθείσες προσεγγίσεις, οι κυματομορφές εκπέμπονται ταυτόχρονα με κάθε κυματομορφή να μεταφέρει μια μονάδα πληροφορίας (σύμβολο). Ωστόσο, ένας βασικός περιορισμός αυτών των τεχνικών είναι ότι ο ρυθμός επικοινωνίας εξαρτάται από την συχνότητα επανάληψης των παλμών, γεγονός που θέτει ανώτατα όρια στην ποσότητα της ενσωματωμένης πληροφορίας ανά παλμό. Παρότι αυτή η μέθοδος είναι αρκετά ώριμη και εφαρμόσιμη, παρουσιάζει περιορισμούς, όπως ο χαμηλός ρυθμός επικοινωνίας, λόγω του περιορισμένου αριθμού παλμών και η στενή γωνιακή περιοχή όπου είναι εφικτή η μετάδοση πληροφορίας.

Διαμόρφωση Συστοιχίας

Στην παρούσα ενότητα, εξετάζονται τεχνικές σχεδιασμού κυματομορφών που βασίζονται στη διαμόρφωση συστοιχίας, όπως η χρονοδιαμορφωμένη συστοιχία (Time-Modulated Array – TMA) και η συστοιχία διαφοροποίησης συχνότητας (Frequency Diversity Array-FDA). Σε αντίθεση με τον έλεγχο πλευρικών λοβών, η διαμόρφωση συστοιχίας προτείνει μια πιο ριζοσπαστική αξιοποίηση της ίδιας της δομής της συστοιχίας κεραιών για την μετάδοση πληροφορίας. Στην εργασία [31], το σύστημα κεραίας TMA εφαρμόστηκε για τη δημιουργία συστοιχίας διπλής λειτουργίας, όπου οι δυνατότητες ραντάρ και επικοινωνίας υλοποιήθηκαν αντίστοιχα στον κύριο και στους πλευρικούς λοβούς της δέσμης. Η TMA επιτρέπει τον έλεγχο των διακοπών ραδιοσυχνότητας των στοιχείων της συστοιχίας μέσω της σύνθεσης μιας περιοδικής ακολουθίας παλμών. Στη μελέτη [32] αναπτύχθηκε με χρονοδιαμορφωμένη MIMO συστοιχία με διαφοροποίηση συχνοτήτων, όπου η τεχνική διάδοσης ακολουθίας αξιοποιήθηκε για την ενσωμάτωση πληροφοριών. Αντίστοιχα, στην εργασία [33] διερευνήθηκε η χρήση διαφορετικών αρμονικών σημάτων για να κωδικοποιήσει επικοινωνιακά δεδομένα, ενώ αναλύθηκαν στρατηγικές μείωσης ενεργειακών απωλειών με σκοπό την αύξηση της απόδοσης του συστήματος.

Επιπλέον, οι συστοιχίες με συχνοτική διαφοροποίηση επιτρέπουν σε κάθε στοιχείο της συστοιχίας να εκπέμπει σε ελαφρώς διαφορετική συχνότητα, δημιουργώντας ένα δυναμικό και ευέλικτο beam pattern. Έτσι, με αυτόν τον τρόπο, η επικοινωνιακή πληροφορία μπορεί να ενσωματωθεί σε περιοχές του χώρου όπου δεν υπάρχει απαίτηση ραντάρ. Υπήρξε μελέτη [43] στην οποία παρουσιάστηκε ένα σύστημα όπου οι λοβοί

χρησιμοποιούνται για ραντάρ και οι sidelobes για επικοινωνία, ενώ σε μια άλλη [44] εξετάστηκε ο διαχωρισμός της συστοιχίας σε δύο τμήματα με ξεχωριστά frequency steps για παράλληλη εκτέλεση των δύο λειτουργιών.

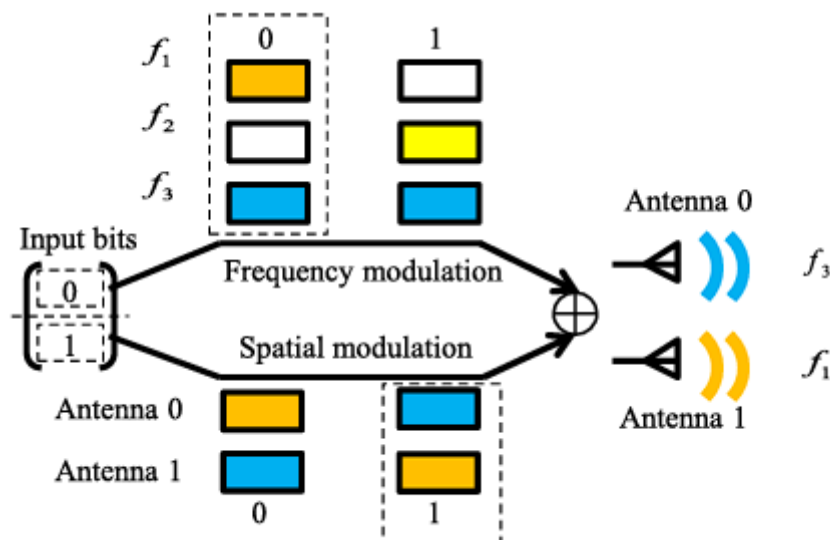
Σχετικά με την προσέγγιση FDA, κάθε στοιχείο της συστοιχίας εκπέμπει σε διαφορετική συχνότητα με συγκεκριμένη συχνοτική μετατόπιση. Στην εργασία [34], προτάθηκε μια μέθοδος, όπου οι λειτουργίες ραντάρ και επικοινωνίας διαχωρίζονται χωρικά, με την πρώτη να πραγματοποιείται στον κύριο λοβό και τη δεύτερη στους πλευρικούς λοβούς της δέσμης. Στο πλαίσιο αυτής της τεχνικής, χρησιμοποιήθηκε η μήτρα Butler για την βελτιστοποίηση της διαμόρφωσης δέσμης εκπομπής και η FDA συστοιχία εκπομπής χωρίστηκε σε δύο υποσυστοιχίες καθεμία από τις οποίες χρησιμοποιούσε διαφορετικά διαστήματα συχνοτικής μετατόπισης για τη διευκόλυνσή διακριτών λειτουργιών. Εκτός από τις προαναφερθείσες στρατηγικές ενσωμάτωσης πληροφορίας αξιοποιήθηκε η φασική αμεταβλητότητα. Στην μελέτη [35], εφαρμόστηκε μια τεχνική διαμόρφωσης επικοινωνιακών συμβόλων, όπου συγκεκριμένες χρονικές περίοδοι ενός γραμμικά διαμορφωμένου συχνότητας (LFM) σήματος τροποποιήθηκαν μέσω διαταραγμένων όρων διαμόρφωσης φάσης (PM).

Συνοψίζοντας οι τεχνικές ενσωμάτωσης πληροφορίας μέσω χωρικής διαμόρφωσης και ελέγχου πλαϊνών λοβών αποτελούν σημαντικά εργαλεία στον σχεδιασμό κυματομορφών για ISAC. Οι πρώτες είναι πιο εύκολες στην υλοποίηση αλλά με περιορισμένο ρυθμό μετάδοσης, ενώ οι τεχνικές array modulation προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία και πιο υψηλούς ρυθμούς με αυξημένη πολυπλοκότητα. Επιπλέον, ο συνδυασμός αυτών καθώς και με την χρήση τεχνητής νοημοσύνης ή προσαρμοστικού σχηματισμού δέσμης (adaptive beamforming) θα υπάρξουν πιο προηγμένες λύσεις για ολοκληρωμένες επικοινωνιακές και ανιχνευτικές εφαρμογές του μέλλοντος.

4.3.2.3.Κυματομορφή Βασισμένη στην Ενσωμάτωση Πληροφορίας

Η ενσωμάτωση πληροφορίας αποτελεί καινοτόμο μέθοδο όπως προαναφέρθηκε στην παραπάνω ενότητα. Κυρίως εκμεταλλεύεται τη χωρική διαφοροποίηση των συστοιχιών κεραιών (spatial diversity of the antenna array), τη συχνοτική ποικιόμορφη (signal's frequency diversity) και την κωδικοποίηση σημάτων (coding diversity) με σκοπό να δημιουργήσει διαφορετικά σύμβολα επικοινωνίας. Η επιλογή διαφορετικών στοιχείων, συχνοτήτων και κωδικοποιητικών σημάτων παράγουν διαφορετικούς δείκτες. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της SCWD με IM είναι ότι η προσθήκη πληροφορίας πάνω

στην κυματομορφή ραντάρ δεν την αλλοιώνει, δηλαδή δεν αλλάζει τη μορφή ή τα βασικά της χαρακτηριστικά. Έτσι, η επίδραση της στη απόδοση του ραντάρ είναι ελάχιστη. Η IM είναι μια τεχνική ψηφιακής διαμόρφωσης που μεταδίδει επιπλέον πληροφορία μέσω της αλλαγής του δείκτη συγκεκριμένων παραμέτρων του σήματος, αντί να βασίζεται στην παραδοσιακή αλλαγή του πλάτους, της συχνότητας ή της φάσης. Τα παραδείγματα κυματομορφών είναι τα συστήματα CAESAR (ευέλικτο ραντάρ με φάση), το ραντάρ MIMO με αναπήδηση συχνότητας (FH-MIMO) και άλλες προσεγγίσεις. Παρακάτω στην εικόνα 6 ακολουθεί ένα παράδειγμα της IM διαμόρφωσης.



Εικόνα 6: Παράδειγμα σχήματος IM (Index Modulation), όπου τα εισερχόμενα bits διαχωρίζονται σε δύο υποσύνολα [77]

Υπάρχουν 2 διαθέσιμες συχνότητες και 2 κεραίες εκπομπής. Τα εισερχόμενα bits χωρίζονται σε δύο υποομάδες, η μία καθορίζει την συχνότητα και η άλλη την κεραία εκπομπής. Αν δηλαδή το πρώτο bit είναι 0 και το δεύτερο 1, τότε χρησιμοποιείται η συχνότητας της πρώτης στήλης και η κεραία της δεύτερης. Αρά, η κεραία 0 μεταδίδει την συχνότητα f_3 και η κεραία 1 στη f_1 .

Αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι κεραίες είναι εκπομπής, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ισχύ του εκπεμπόμενου σήματος, όμως είναι αρκετά ενεργοβόρο και ενδεχομένως όχι τόσο ιδανικό για σχήματα που χρησιμοποιούνται για ευρεία κατανάλωση. Επιπλέον, παρουσιάζει σχετικό χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

Το μειονέκτημα αυτό αντιμετωπίζεται μέσω της αξιοποίησης της κυματομορφής FMCW και της τεχνικής IM (Index Modulation) επιλέγοντας μόνο κάποιες από τις

διαθέσιμες κεραίες για εκπομπή σε κάθε παλμό. Έτσι, έχουμε μεγαλύτερο αριθμό βαθμών ελευθερίας (DoFs) και με την χρήση δυαδικής διαμόρφωσης φάσης (Binary Phase Modulation-PM) αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης επικοινωνιακών δεδομένων [36].

Συμπερασματικά, η μέθοδος αυτή καθιστά εφικτή τη μετάδοση δεδομένων χωρίς την ανάγκη επιπρόσθετης ισχύος ή φάσματος.

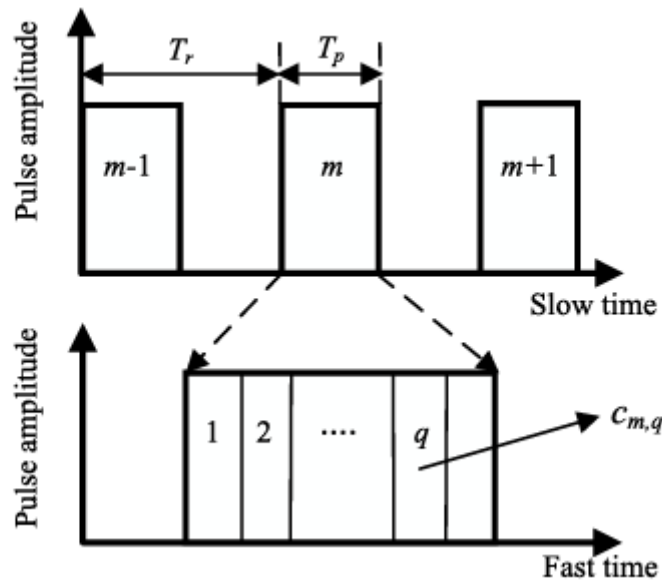
Caesar

Μια χαρακτηριστική εφαρμογή κυματομορφής βασισμένη στην ενσωμάτωση πληροφορίας είναι το CAESAR (Configurable Array Enhanced Scanning for Automotive Radar). Είναι ένα σύστημα που προσαρμόζεται με συστοιχία κεραιών και χρησιμοποιείται σε αυτοκινούμενα αυτοκίνητα, το οποίο αξιοποιεί τις δυνατότητες των MIMO ραντάρ σαρώνοντας και ταυτόχρονα να επικοινωνώντας.

Ο Huang και οι συνεργάτες [78] του πρότειναν ένα σύστημα διπλής λειτουργίας για ραντάρ και επικοινωνία, με την ονομασία MAJoRCom, αξιοποιώντας την ευελιξία στη συχνότητα και στον χώρο που παρέχεται από τα Frequency agile ραντάρ και τις αντίστοιχες επιλογές κεραιών. Σε κάθε παλμό εκπομπής, επιλέγονται πολλές φέρουσες συχνότητες από ένα προκαθορισμένο σύνολο και μεταδίδονται μέσω επιλεγμένων κεραιών. Οι διαφορετικοί συνδυασμοί συχνοτήτων και κεραιών κωδικοποιούν τα δεδομένα επικοινωνίας, με αποτέλεσμα το σύστημα CAESAR να μπορεί να μεταδίδει πληροφορίες επικοινωνίας ταυτόχρονα με την ανίχνευση. Χαρακτηριστικό του συστήματος είναι ότι κάθε δέκτης επικοινωνίας λαμβάνει σήμα μόνο σε μία συχνότητα, κάτι που απλοποιεί τον απαιτούμενο εξοπλισμό. Ακόμη, η επικοινωνιακή πληροφορία ενσωματώνεται στον δείκτη ενεργοποίησης στοιχείων της συστοιχίας και ο παραλήπτης αποκωδικοποιεί τα δεδομένα εντοπίζοντας ποια στοιχεία της συστοιχίας χρησιμοποιούνται για την μετάδοση.

FH-MIMO Radar

Μια σημαντική κατηγορία της τεχνικής Index Modulation είναι το FH-MIMO (Frequency Hopping Multiple-Input Multiple- Output) radar. Το FH-MIMO βασίζεται στην γρήγορη εναλλαγή συχνοτήτων, όπου κάθε παλμός ραντάρ χωρίζεται σε πολλαπλούς υποπαλμούς. Η κεντρική συχνότητα του εκπεμπόμενου σήματος μεταβάλλεται τυχαία μεταξύ των υποπαλμών και των κεραιών, προσφέροντας έναν επιπλέον βαθμό ευελιξίας. Μέσω της επιλογής συγκεκριμένων υποπαλμών και κεραιών κωδικοποιούνται διαφορετικά δεδομένα επικοινωνίας.



Εικόνα 6: Παράδειγμα σχήματος FH-MIMO. Κάθε παλμός χωρίζεται σε πολλαπλούς υποπαλμούς [77].

Στο παραπάνω σχήμα τα T_r και T_p συμβολίζουν την διάρκεια του παλμού και τον χρόνο επανάληψης παλμών, αντίστοιχα. Ουσιαστικά, η συγκεκριμένη τεχνολογία αξιοποιεί δύο βασικά σχήματα διαμόρφωσης:

- Την παραδοσιακή διαμόρφωση φάσης (Phase Modulation-PM) και
- Την διαμόρφωση μέσω ποικιλίας συχνοτήτων (Frequency Diversity Modulation)

Οι πιο συνηθισμένες τεχνικές PM περιλαμβάνουν την PSK (Phase Shift Keying), τη διαφορική PSK (DPSK) και την συνεχή PM (CPM). Ωστόσο, η χρήση PSK ενδέχεται να διακόψει τη συνέχεια της φάσης μεταξύ των υποπαλμών της κυματομορφής FH, προκαλώντας διαρροή στο φάσμα. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, οι Eedera και Amin πρότειναν την χρήση DPSK, η οποία διατηρεί τη συνέχεια φάσης και μειώνει τη διαρροή. Επιπλέον, η στοχαστικότητα της DPSK μπορεί να μειώσει σημαντικά τις παράπλευρες λοβοειδείς αποκρίσεις (range sidelobes) και FH-MIMO ραντάρ.

Ο Baxter και οι συνεργάτες του εισήγαγαν τη μέθοδο FHCS (Frequency Hopping Code Selection), η οποία εκμεταλλεύεται συνδυασμούς μεταξύ συμβόλων επικοινωνίας και συνόλων συντελεστών hopping για την μετάδοση των πληροφοριών. Αν και ο ρυθμός μετάδοσης της FHCS εξαρτάται από τον αριθμό των διαφορετικών συνδυασμών, η

συνδυασμένη χρήση PM και Frequency Diversity Modulation ενισχύει τον ρυθμό επικοινωνίας.

Επιπλέον, το FH-MIMO μπορεί να υλοποιηθεί και μέσω μεταθέσεων συχνοτήτων. Στην προκείμενη περίπτωση, η ενσωμάτωση των επικοινωνιακών συμβόλων γίνεται σε κάθε hop, καθιστώντας δυνατό έναν υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης από τη συχνότητα επανάληψης παλμών του ραντάρ.

Τα παραπάνω έργα προϋποθέτουν ακριβή εκτίμηση του καναλιού και του χρονικού συγχρονισμού, οι Wu και οι συν. πρότειναν μια νέα προσέγγιση για την εκτίμηση των αντίστοιχων παραμέτρων, σχεδιάζοντας έναν ειδικό διακριτό μετασχηματισμό που αποκαλύπτει καθαρότερη δομή στο σήμα και μειώνει τις παρεμβολές μεταξύ των hops και καναλιών ακόμα και κατά την μετατόπιση του χρόνου.

Τέλος, παρουσιάστηκε ένας εναλλακτικός τρόπος ενσωμάτωσης επικοινωνιακών πληροφοριών μέσω της συσχέτισης της χωρικής διαμόρφωσης (sparse array configuration) και της εκπεμπόμενης κυματομορφής. Πρόκειται για μια γενικευμένη μορφή χωρικής Index Modulation, η οποία απαιτεί κάθε κεραία λήψης να επεξεργάζεται σήματα από όλες τις συχνότητες, κάτι που συνεπάγεται με αυξημένες απαιτήσεις εύρους ζώνης και πολύπλοκη υλοποίηση υλικού. Εναλλακτικά, προτείνεται η χρήση κυκλικά μετατοπισμένων chirps για την υλοποίηση διπλής λειτουργικότητας.

4.3.2.4. ODDM (Integrated waveforms based on orthogonal delay – Doppler vision multiplexing)

Η διαμόρφωση ODDM θεωρείται μια βελτιωμένη εκδοχή της OTFS, με βασικό στόχο τη βελτιστοποίηση του παλμού διαμόρφωσης (pulse shaping). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται ειδικά σχεδιασμένοι παλμοί που είναι ορθογώνιοι, δηλαδή αμοιβαία ανεξάρτητοι, ως προς την ανάλυση στον χώρο καθυστέρησης και Doppler, επιτρέποντας μια πιο αποτελεσματική μετάδοση των σημάτων.

Στο σχήμα αυτό, θεωρούμε ότι διαθέτουμε ένα σύνολο $M \times N$ συμβόλων πληροφορίας, στο οποίο διαμορφώνονται σε M πολυφασματικά σύμβολα. Κάθε τέτοιο σύμβολο περιέχει N υποφέρουσες συχνότητες και η απόσταση μεταξύ των υποφερουσών τίθεται σε $1/NT$, ώστε να προκύπτουν σύμβολα που έχουν περίοδο NT , τα οποία συνδέονται με την ανάλυση καθυστέρησης, δημιουργώντας μια διαστρωματωμένη δομή στο σήμα.

Με αυτόν τον τρόπο, το σήμα ODDM περιγράφεται ως συνδυασμός παλμών μετατοπισμένων στον χρόνο και πολλαπλασιασμένων με φασματικούς όρους (εκθετικές συναρτήσεις), που καλύπτουν τον χώρο καθυστέρησης-Doppler. Ο παλμός εκπομπής $v(t)$ έχει σχεδιαστεί, ώστε να είναι ορθογώνιος ως προς την ανάλυση Doppler, εξασφαλίζοντας την καλύτερη δυνατή δυνατότητα μεταξύ των μεταδιδόμενων συμβόλων.

Η συγκεκριμένη τεχνική, αν και βρίσκεται υπό μελέτη, τα πρώτα αποτελέσματα είναι αρκετά θετικά. Η απόδοση της ODDM σε περιβάλλοντα με υψηλή κινητικότητα, όπου υπάρχουν σφάλματα στην εκτίμηση του καναλιού. Συγκρίνοντας, τρεις διαφορετικούς ανιχνευτές, διαπιστώθηκε ότι η ODDM προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα υπό διαφορετικές συνθήκες και περιορισμούς. Από την άλλη, μελετήθηκε η εφαρμογή της ODDM σε φυσικά κανάλια με ταυτόχρονη μεταβλητότητα σε καθυστέρηση και Doppler με την βοήθεια των μετασχηματισμών Fourier (DFT και IDFT) και σχεδιάστηκαν κατάλληλα φίλτρα για μετάδοση και λήψη. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν πως η προσέγγιση αυτή είναι πολλά υποσχόμενη για τη δημιουργία ενοποιημένων συστημάτων επικοινωνίας και ανίχνευσης.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της ODDM είναι η ιδιότητα ορθογωνιότητας των παλμών, η οποία επιτρέπει στο μεταδιδόμενο σήμα να «κουμπώνει» με την ανάλυση καθυστέρησης και Doppler του καναλιού. Το αποτέλεσμα είναι:

- Απλοποιημένες σχέσεις εισόδου-εξόδου
- Ακριβή εκτίμηση καναλιού, και
- Μειωμένο κόστος και υπολογιστικό βάρος, σε σχέση με άλλες τεχνικές.

Η σχεδίαση κυματομορφών η οποία επικεντρώνεται στο ραντάρ αποτελεί σημαντικό πεδίο μελέτης. Στην πράξη, πολλές κυματομορφές ραντάρ μπορούν να ενσωματώσουν σύμβολα επικοινωνίας μέσα στον παλμό, τη συχνότητα ή τη φάση του σήματος. Ωστόσο, η ενσωμάτωση αυτή συνηθώς υποβαθμίζει κάπως την ακρίβεια της ανίχνευσης του ραντάρ.

Συμπερασματικά, ενώ οι κυματομορφές με επίκεντρο το ραντάρ παρέχουν έναν τρόπο να ενσωματώνουν την επικοινωνία σε υφιστάμενα συστήματα ανίχνευσης, δεν μπορούν να υποκαταστήσουν τις απαιτήσεις των συστημάτων επικοινωνίας, διότι οι δυνατότητες είναι περιορισμένες και η πολυπλοκότητα στην υλοποίηση παραμένει

υψηλή. Παρακάτω ακολουθεί ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις κυματομορφές που προαναφέρθηκαν στον σχεδιασμό κυματομορφών με έμφαση την ανίχνευση.

Πίνακας 2: Σύγκριση των κυματομορφών που χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό κυματομορφής με έμφαση την ανίχνευση για ISAC

Μέθοδος Διαμόρφωσης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
LFM (Linear Frequency Modulation)	Καλή ανάλυση απόστασης, ισχυρή αντίσταση σε πολυδιαδρομική παρεμβολή, μικρότερη ευαισθησία σε παρεμβολές στενής ζώνης	Χαμηλή φασματική απόδοση, η ενσωμάτωση κυματομορφών LFM σε συστήματα επικοινωνίας αυξάνει την πολυπλοκότητα υλοποίησης
Spatial domain embedding	Επιτρέπει την υλοποίηση χωρικής πρόσβασης, ενισχύοντας έτσι την φασματική απόδοση και τη χωρητικότητα του συστήματος	Απαιτεί πολλαπλές κεραίες και πολύπλοκους αλγορίθμους επεξεργασίας σήματος, με συνέπεια υψηλή πολυπλοκότητα στην υλοποίηση.
Index Modulation	Απλός σχεδιασμός με υψηλή ενεργειακή απόδοση, κατάλληλη για απλές εφαρμογές ανίχνευσης	Χαμηλή φασματική απόδοση, περιορισμένες επιδόσεις σε απαιτητικά περιβάλλοντα με υψηλή ακρίβεια ή πολυπλοκότητα στην ανίχνευση
ODDM	Ισχυρή ικανότητα αντίστασης σε παρεμβολές, κατάλληλη για περιβάλλοντα υψηλής κινητικότητας με καλή ανάλυση Doppler	Πολύπλοκη εκτίμηση και αντιστάθμιση του καναλιού, αυξημένες απαιτήσεις συγχρονισμού καναλιού

4.3.3. Κοινή Σχεδίαση Κυματομορφών για Ολοκληρωμένη Επικοινωνία και Ανίχνευση (JWOD)

Οι υπάρχουσες προσεγγίσεις σχεδίασης κυματομορφών που εστιάζουν είτε στην ανίχνευση είτε στην επικοινωνία έχουν επιτρέψει την εφαρμογή του ISAC σε έναν βαθμό, εξακολουθεί να υπάρχει ένα βασικό ζήτημα συμβιβασμού μεταξύ των δύο λειτουργιών. Πιο συγκεκριμένα, η ενίσχυση της απόδοσης της μιας λειτουργίας συχνά περιορίζει την άλλη. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, η ερευνητική κοινότητα έχει προτείνει το πλαίσιο της κοινής βελτιστοποίησης και σχεδίασης κυματομορφών (Waveform Optimization and Design – JWOD). Η προσέγγιση αυτή προσφέρει σημαντικούς βαθμούς ελευθερίας και μεγαλύτερη ευελιξία σε σύγκριση με τις παραδοσιακές κυματομορφές, έχοντας μια πιο αποτελεσματική εξισορρόπηση μεταξύ επικοινωνίας και ανίχνευσης. Επιπλέον, δεν περιορίζεται από υπάρχοντα σχήματα κυματομορφής, γεγονός που καθιστά δυνατή την βελτίωση και των δυο. Σε αυτό τον τομέα έχουν αναπτυχθεί διάφορα ενδεικτικά σχήματα, τα οποία εντάσσονται σε τρεις κατηγορίες: βελτιστοποίηση κυματομορφής, διαμόρφωση δέσμης στον χωρικό τομέα και ο κοινός σχεδιασμός στον χρονικό και στον συχνοτικό τομέα.

4.3.3.1.Ολοκληρωμένος Σχεδιασμός Κυματομορφής μέσω Βελτιστοποίησης

Ο σχεδιασμός κυματομορφών σε περιβάλλοντα Ολοκληρωμένης Επικοινωνίας και Ανίχνευσης καθίσταται κρίσιμο βήμα για την ταυτόχρονη υποστήριξη μετάδοσης δεδομένων και αισθητήρων λειτουργίας. Η προσέγγιση της βελτιστοποίησης κυματομορφής έχει ως στόχο την διαμόρφωση των σημάτων που εξυπηρετούν από κοινού τις απαιτήσεις των συστημάτων ραντάρ και επικοινωνίας, ενσωματώνοντας τα χαρακτηριστικά και των δυο στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων. Η συγκεκριμένη διαδικασία περιλαμβάνει την ταυτόχρονη ικανοποίηση ποικίλων περιορισμών, όπως ο λόγος σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (SINR), το κατώφλι Cramer-Rao (CRLB), η αμοιβαία πληροφορία (MI) και η ομοιότητα με ιδανικές κυματομορφές.

Σύγχρονες ερευνητικές εργασίες υποστηρίζουν τη βελτιστοποίηση αυτών των μεγεθών με ποικίλους τρόπους. Για παράδειγμα, ο Zhao [45] και οι συνεργάτες του, ανέπτυξαν μια μέθοδο ταυτόχρονου σχεδιασμού δέσμης εκπομπής και λήψης (beamforming), που εξισορροπεί την απόδοσή ραντάρ και επικοινωνίας με κριτήριο το SINR, ακόμη και σε συνθήκες ατελούς γνώσης καναλιού. Αντίστοιχα, ο Wang [46] εστίασε στην ελαχιστοποίηση του κατωφλίου Cramer-Rao για να εκτιμήσει την γωνία

άφιξης, έχοντας παράλληλα εξασφαλίσει ικανοποιητική ποιότητα επικοινωνίας για κάθε χρήστη. Άλλες μελέτες ενσωματώνουν την αμοιβαία πληροφορία και τον ρυθμό μετάδοσης ως ταυτόχρονους στόχους, ενώ ορισμένες μεθοδολογίες που βασίζονται στην σύγκριση με πρότυπες κυματομορφές επιδιώκουν να εξισορροπήσουν πλευρικούς λοβούς και παρεμβολές. Σε πιο εφαρμοσμένα σενάρια, έχει προταθεί η χρήση τεχνικών OFDM με ανακατανομή ισχύος για να μειωθούν τα σφάλματα καθυστέρησης Doppler, σε συστήματα πλήρους αμφίδρομης λειτουργίας.

Η παραπάνω προσέγγιση, υλοποιείται από διαφορετικές στρατηγικές για τον σχεδιασμό κυματομορφής μέσω βελτιστοποίησης, οι οποίες ομαδοποιούνται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: βασισμένες στο SINR, στο CRLB, στην αμοιβαία πληροφορία(MI) και στην ομοιότητα κυματομορφών. Η κάθε κατηγορία προσφέρει ένα ξεχωριστό συμβιβασμό στις ανάγκες επικοινωνίας και ανίχνευσης και παρουσιάζεται αναλυτικά στις επόμενες ενότητες.

Βελτιστοποίηση βάσει του λόγου SINR

Μια από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες προσεγγίσεις στην βελτιστοποίηση κυματομορφών για ISAC είναι η χρήση του λόγου σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο ως κύριο κριτήριο. Η μέγιστη αξιοποίηση του μπορεί να επιτευχθεί είτε ως πρωτεύων στόχος είτε ως περιορισμός, εξασφαλίζοντας την απαιτούμενη απόδοση τόσο για τον ραντάρ αισθητήρα όσο και για την επικοινωνιακή σύνδεση. Στην ενότητα αυτή εξετάζονται μελέτες που το χρησιμοποιούν, ώστε να πετύχουν ισορροπημένο σχεδιασμό beamforming και κυματομορφών.

Ο δείκτης SINR είναι θεμελιώδους σημασίας τόσο για την εκτίμηση στόχων όσο και για την αποδοτική μετάδοση δεδομένων. Αρχικά, [47] προτάθηκε ένα σχήμα συνεκμετάλλευσης φάσματος για συνεπτυγμένα MIMO ραντάρ και MIMO επικοινωνία, όπου μεγιστοποιώντας τον δείκτη SINR του δέκτη ραντάρ ταυτόχρονα εξασφαλιζόταν ο ελάχιστος ρυθμός επικοινωνίας και το όριο ισχύος. Αντίστοιχα, οι Liu και συνεργάτες [48] πρότειναν μια μέθοδο κοινής σχεδίασης κυματομορφής και φίλτρων με βάση την προσαρμοστική επεξεργασία χώρου- χρόνου και την προκωδικοποίηση σε επίπεδο συμβόλου, ώστε να μεγιστοποιηθεί το ραντάρ SINR και να εξασφαλιστεί η ποιότητα υπηρεσίας της επικοινωνίας. Οι Qian και συνεργάτες [49], πρότειναν δύο μεθόδους κοινής σχεδίασης κυματομορφής: η πρώτη μεγιστοποιεί το ραντάρ υπό περιορισμούς που

αφορούν την ομοιότητα κυματομορφής, τον ρυθμό μετάδοσης και την ισχύ εκπομπής, ενώ η δεύτερη μεγιστοποιεί τον ρυθμό επικοινωνίας για δεδομένο ραντάρ SINR.

Τέλος, δημιουργήθηκε ένα σχήμα που στοχεύει στην μέγιστη απόδοση επικοινωνίας και στην ελαχιστοποίηση του σφάλματος προσέγγισης του radar beampattern μέσω του σχεδιασμού των message splits και των precoders. Το σύστημα στηρίζεται σε αρχιτεκτονική rate-splitting multiple access, χρησιμοποιώντας δέκτες με successive interference cancellation για τη μείωση παρεμβολών τόσο μεταξύ χρηστών όσο και μεταξύ radar και επικοινωνίας [50].

Βελτιστοποίηση βάσει του κατώτατου ορίου Cramer-Rao

Μια ακόμη σημαντική στρατηγική σχεδιασμού βασίζεται στην χρήση του κατώτατου ορίου Cramer-Rao, το οποίο εκφράζει τη θεμελιώδη ακρίβεια με την οποία μπορούν να εκτιμηθούν παράμετροι όπως η γωνία άφιξης ή η απόσταση στόχου. Ο βασικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του CRLB, με ταυτόχρονη διατήρηση ικανοποιητικής ποιότητας επικοινωνίας συνήθως μέσω περιορισμών SINR ανά χρήστη. Η προσέγγιση αυτή καθίσταται ιδιαίτερα χρήσιμη σε εφαρμογές εντοπισμού στόχων υψηλής ακρίβειας.

Το κατώτατο όριο Cramer-Rao (CRB) παρέχει το θεωρητικό κατώφλι για την διακύμανση κάθε αμερόληπτης εκτίμησης παραμέτρων, με αποτέλεσμα να είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές ανίχνευσης. Ο Cheng [51] μελέτησε το πρόβλημα εντοπισμού στόχων, ελαχιστοποιώντας το CRB για την εκτίμηση της κατεύθυνσης άφιξης, διατηρώντας ταυτόχρονα ικανοποιητική ποιότητα επικοινωνίας (QoS). Σε ένα άλλο έργο [5], η ελαχιστοποίηση του CRB για την εκτίμηση παραμέτρων υπό περιορισμούς στο sidelobe level. Έπειτα μελετήθηκε [53] η μείωση του CRB της μήτρας beamforming με την προϋπόθεση ότι τα κριτήρια SINR ανά χρήστη και ο συνολικός περιορισμός ισχύος εκπομπής πληρούνται. Επιπλέον, ο Wang [54] διερεύνησε την συνδυασμένη σχεδίαση κυματομορφών σταθερού πλάτους και ρυθμιζόμενων ανακλαστικών επιφανειών. Η μεθοδολογία αποσκοπεί στην μείωση της παρεμβολής μεταξύ χρηστών, υπό τους περιορισμούς CRB και του σταθερού πλάτους της κυματομορφής.

Βελτιστοποίηση βάσει της Αμοιβαίας Πληροφορίας

Η αμοιβαία πληροφορία χρησιμοποιείται συχνά ως ένα πιο θεωρητικό αλλά ισχυρό εργαλείο για την ταυτόχρονη αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος ως προς την επικοινωνία και την ανίχνευση. Σε συνδυασμό με τον ρυθμό μετάδοσης δημιουργείται

ένα δίδυμο στόχων ή περιορισμών, όπου η βελτιστοποίηση στοχεύει στην επίτευξη συμβιβασμού μεταξύ ακρίβειας ραντάρ και απόδοσης επικοινωνίας. Σε αυτή την ενότητα θα εξεταστούν τεχνικές που αξιοποιούν το ΜΙ για πολυμετρική βελτίωση.

Η αμοιβαία πληροφορία (Mutual Information-MI) αποτελεί κύριο κριτήριο τόσο στο ραντάρ όσο και στα συστήματα επικοινωνίας. Στο πλαίσιο των επικοινωνιών, η ΜΙ εκφράζει την ποσότητα πληροφορίας που μπορεί να μεταδοθεί στον δέκτη όταν γνωρίζει την κατάσταση του καναλιού. Από την μεριά του ραντάρ, η ΜΙ εκφράζει την ποσότητα πληροφορίας για τον στόχο ή το περιβάλλον που συλλέγεται στον δέκτη. Η αμοιβαία πληροφορία μεταξύ καναλιού ραντάρ και ληφθέντος σήματος δίνεται από την σχέση:

$$I_R(H_R; Y_R | X) = W \log_2 \left(\det \left(\frac{1}{\sigma_Z^2} X^H \Sigma_{H_R} X + I_K \right) \right) \quad (8)$$

Όπου X είναι το σήμα που μεταδίδεται, το H_R το κανάλι του ραντάρ, Y_R το σήμα που ανακλάται, W ο αριθμός των κεραιών λήψης και σ_Z^2 η διασπορά του θορύβου. Για την επικοινωνία, η αντίστοιχη σχέση είναι:

$$I_C(X; Y_C | H_C) = K \log_2 \left(\det \left(\frac{1}{\sigma_Z^2} H_C^H \Sigma_X H_C + I_W \right) \right) \quad (9)$$

Όπου Y_C είναι το ληφθέν επικοινωνιακό σήμα και H_C το κανάλι επικοινωνίας. Στην μελέτη [55], εξετάστηκε η σχεδίαση κυματομορφής με βάση το ΜΙ για συστήματα ISAC με θόρυβο Gaussian mixture. Μια άλλη μελέτη [56], ανέπτυξε τον σχεδιασμό space-time power mask με στόχο την μεγιστοποίηση της ΜΙ σε τρία σενάρια: μόνο για επικοινωνία, μόνο για ραντάρ και με γραμμικό συνδυασμό με τις δυο περιπτώσεις (weighted sum).

Βελτιστοποίηση βάσει Ομοιότητας

Ένας τελευταίος εναλλακτικός τρόπος ολοκλήρωσης λειτουργιών ραντάρ και επικοινωνίας είναι η σύγκριση κυματομορφών με πρότυπα. Η συγκεκριμένη τεχνική βασίζεται στην ελαχιστοποίησή της απόστασης ή της διαφοράς μεταξύ της σχεδιασμένης κυματομορφής και μιας επιθυμητής, υπό κάποιους περιορισμούς όπως η παρεμβολή, οι πλευρικοί λοβοί και η ευθυγράμμιση του διαγράμματος ακτινοβολίας. Οι προσεγγίσεις αυτές συχνά χρησιμοποιούν γεωμετρικά ή φασματικά κριτήρια και μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές βελτιστοποιήσεις στον χωρικό και χρονικό έλεγχο των σημάτων.

Η βελτιστοποίηση βάσει ομοιότητας επιδιώκει να σχεδιάσει κυματομορφές που προσεγγίζουν μια αναφορά ή «ιδανική» κυματομορφή. Η ομοιότητα μπορεί να βρίσκεται είτε στην ίδια κυματομορφή είτε το beampattern εκπομπής και μπορεί να περιλαμβάνεται είτε ως περιορισμός είτε ως στόχος στη βελτιστοποίηση. Ο μαθηματικός τύπος που περιγράφει την ομοιότητα είναι:

$$\min_{\alpha, R} \sum_{m=1}^M |\alpha \widetilde{P}_d(\theta_m) - a^H(\theta_m) R a(\theta_m)|^2 \quad (10)$$

Όπου α είναι ο παράγοντας κλιμάκωσης, R είναι η μήτρα συνδιακύμανσης της κυματομορφής (θ_m) οι γωνίες $\widetilde{P}_d(\theta_m)$ είναι το επιθυμητό το beampattern. Όταν υπάρχει η περίπτωση απομακρυσμένης ανάπτυξης ραντάρ- επικοινωνίας, η παρεμβολή ραντάρ προς τους χρήστες επικοινωνίας θα εξουδετερωθεί με την τεχνική μηδενικής εξαναγκασμένης και θα σχεδιαστεί ραντάρ beampattern το οποίο ισοδυναμεί με τον σχεδιασμό της μεταδιδόμενης διακύμανσης. Μερικές προτάσεις που μελετήθηκαν [57], [58] ήταν ο σχεδιασμός κυματομορφής ISAC με καλό omnidirectional και directional beampattern, ελαχιστοποίηση της διαφοράς μεταξύ της επιθυμητής και της αναφοράς κυματομορφής λόγω προβλημάτων που αντιμετωπίστηκαν με την φασματική συμβατότητα για συνεπτυγμένα MIMO ραντάρ. Τέλος, [59] προτάθηκε η σχεδίαση μείωσης sidelobe στην απόσταση με την λογική της ελαχιστοποίησης της Ευκλείδειας απόστασης από κυματομορφές αναφοράς.

4.3.3.2. Χωρική Διαμόρφωση Δέσμης

Η χωρική διαμόρφωση δέσμης αποτελεί βασικό μηχανισμό στα συστήματα MIMO ραντάρ και επικοινωνίας, επιτρέποντας τη συγκέντρωση της εκπεμπόμενης ισχύς σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις και την καταστολή της σε περιοχές δίχως ενδιαφέρον. Η συγκεκριμένη τεχνική βελτιώνει την αποδοτικότητα φάσματος, επιτρέπει την παράλληλη διαχείριση πολλαπλών εργασιών σε διαφορετικές γωνίες και αυξάνει την ανθεκτικότητα σε παρεμβολές, ακόμη και σε ηλεκτρομαγνητικά «βαριά» περιβάλλοντα. Αποτελείται από τρεις υποκατηγορίες και αναλύονται παρακάτω.

Σχεδιασμός Precoding

Ο σχεδιασμός έχει ουσία για την κοινή μετάδοση σημάτων ραντάρ και επικοινωνίας, ειδικά σε πολυχρηστικά περιβάλλοντα. Αποσκοπεί στην διαμόρφωση της εκπομπής, ώστε να ενισχύσει την απόδοση του ραντάρ και παράλληλα να διατηρείται υψηλή η ποσότητα υπηρεσίας για τους χρήστες επικοινωνίας. Μια προσέγγιση βασίζεται στην

κατασκευή προκωδικοποιητών που ενσωματώνουν σημεία μηδενισμού σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις, ώστε να αποφεύγεται η παρεμβολή μεταξύ της ανίχνευσης και του χρήστη επικοινωνίας [60].

Η μεθοδολογία της joint waveform και precoder optimization είναι ιδιαίτερα αποδοτική, καθώς λαμβάνει υπόψη ταυτόχρονα τις απαιτήσεις του καναλιού επικοινωνίας και του καναλιού ραντάρ. Μέσω αυτής της προσέγγισης, μπορούν να διαμορφωθούν beam patterns που ικανοποιούν τόσο τις απαιτήσεις ακριβείας εντοπισμού όσο και τις ανάγκες μετάδοσης δεδομένων [61]. Στο πεδίο των MIMO συστημάτων, αξιοποιούνται μαθηματικά εργαλεία όπως η ανάλυση ιδιοτιμών για την κατασκευή precoders, οι οποίοι κατανέμουν κατάλληλα την ισχύ ανάμεσα σε διακριτές κατευθύνσεις [62].

Βελτιστοποίηση Πολλαπλών Δεσμών

Η δημιουργία και διαχείριση πολλαπλών δεσμών αποτελεί έναν αποδοτικό τρόπο συμβίωσης λειτουργιών επικοινωνίας και αισθητήρων στο ίδιο σύστημα. Στην συγκεκριμένη τεχνική, διαφορετικές δέσμες θα σχεδιαστούν για να εξυπηρετήσουν ταυτόχρονα επικοινωνία με χρήστες και παρακολούθηση περιοχών ενδιαφέροντος. Με την χρήση της πολυδεσμικής εκπομπής επιτρέπει την ευέλικτη προσαρμογή του pattern της ακτινοβολίας ανάλογα με τις ανάγκες [63].

Ένα ιδιαίτερο πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι η δυνατότητα της δυναμικής επανακατανομής πόρων μεταξύ ανίχνευσης και επικοινωνίας, ειδικά σε σενάρια όπου οι απαιτήσεις αλλάζουν γρήγορα. Για την υλοποίηση αυτής της τεχνικής χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που λαμβάνουν υπόψη ταυτόχρονα την ποιότητα του καναλιού επικοινωνίας και τα χαρακτηριστικά στόχων εντοπισμού [64]. Ακόμη, ο συνδυασμός των πολλαπλών δεσμών με την προκωδικοποίηση ενισχύουν ακόμη περισσότερο την προσαρμοστικότητα του συστήματος [65].

Υβριδική Διαμόρφωση Δέσμης

Η υβριδική διαμόρφωση δέσμης συνδυάζει την ευελιξία της ψηφιακής επεξεργασίας με την απόδοση της αναλογικής προσαρμογής φάσης, με αποτέλεσμα να προσφέρει έναν αποδοτικό συμβιβασμό μεταξύ κόστους, κατανάλωσης και επιδόσεων. Αυτή η τεχνική είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για συστήματα mmwave και THz, όπου ο αριθμός από τα στοιχεία της κεραίας είναι μεγάλος και η πλήρης ψηφιακή λύση είναι αρκετά δύσκολη [66].

Στο πλαίσιο του ISAC, η hybrid beamforming έχει την δυνατότητα να βελτιστοποιεί τα δικά της χαρακτηριστικά ταυτόχρονα για την επικοινωνία και για την ανίχνευση. Με τον συνδυασμό ψηφιακών και αναλογικών precoders, καθίστανται δυνατός ο σχηματισμός πολλαπλών λοβών όπου η καθεμία εξυπηρετεί διαφορετική λειτουργία [67]. Η επιλογή των coefficients του αναλογικού μέρους αν γίνει προσεκτικά μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση των παρεμβολών και να βελτιώσει την ακρίβεια [68]. Επιπλέον, έχουν προταθεί τεχνικές για την κοινοχρησία του hardware μεταξύ των δύο λειτουργιών, για να έχει μείωση τους κόστους και της πολυπλοκότητας του συστήματος [69].

4.3.3.3. Συνδυασμένος σχεδιασμός σε Πεδίο Χρόνου – Συχνότητας

Η σχεδίαση κυματομορφών και δομών πλαισίων αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο για την υλοποίηση ολοκληρωμένων λειτουργιών επικοινωνίας και αισθητήρων. Από την οπτική του χρόνου, οι προσαρμογές στα επικοινωνιακά πλαίσια επιτρέπουν τη ταυτόχρονη χρησιμοποίηση των ίδιων σημάτων για μετάδοση δεδομένων και για ανίχνευση στόχων, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η ακριβή εκτίμηση απόστασης και ταχύτητας. Η υιοθέτηση ακολουθιών σαν τη Prouhet-Thue-Morse ενισχύει την ανθεκτικότητα στο φαινόμενο Doppler, ενώ ευέλικτες δομές πλαισίων επιτρέπουν την προσαρμογή του αριθμού πλαισίων που χρησιμοποιούνται για αισθητήρες και επικοινωνία ή ακόμη και τη συγχώνευση δεδομένων από διαφορετικά συστήματά. Στον τομέα της συχνότητας, η διαίρεση των υποφερόντων του OFDM σε διαφορετικές ομάδες για αισθητήρες και επικοινωνία εξασφαλίζει την αποτελεσματική αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων και τη δυνατότητα προσαρμογής σε διαφορετικές απαιτήσεις. Επιπλέον, με τον συνδυασμό του χρονικού και συχνотικού τομέα στον σχεδιασμό του σήματος ενισχύεται η συνολική απόδοση του συστήματος. Η ανάπτυξη ευέλικτων δομών πλαισίων, διευκολύνουν την κατανομή πόρων και την προσαρμογή τους σε διαφορετικές ανάγκες συστημάτων, όπως για παράδειγμα τα οχήματα αυτόνομης οδήγησης. Με τον διαμοιρασμό δεδομένων αισθητήρων σε κατανεμημένα συστήματα βελτιώνει την ακρίβεια εκτίμησης θέσης και γωνίας παρέχοντας έτσι ευρύτερη εικόνα του περιβάλλοντος.

Παράλληλα, στον συχνотικό τομέα, με την διαίρεση των υποφερόντων του OFDM σε διακριτές ομάδες για αισθητήρες και επικοινωνία εξασφαλίζεται η αποτελεσματική αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων και επιτρέπεται η ευέλικτη προσαρμογή σε διαφορετικά σενάρια. Η ενσωματωμένη σχεδίαση σημάτων στον χρονικό

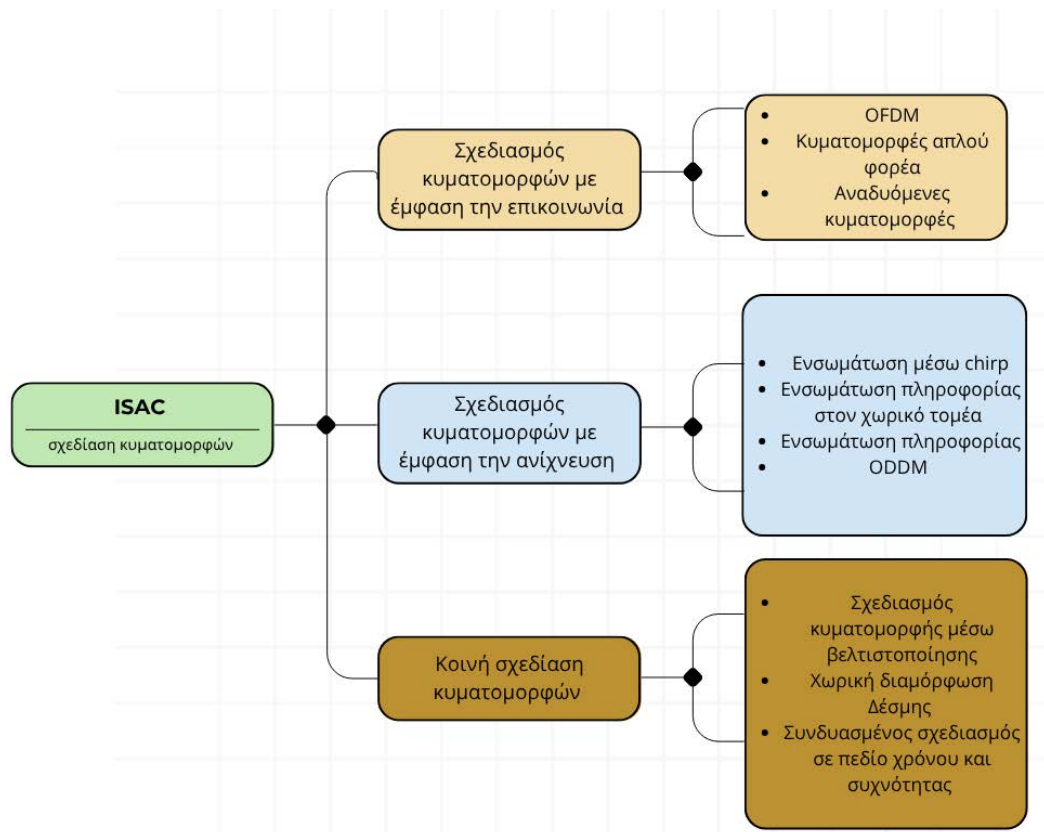
και συχνοτικό τομέα επιτρέπει την υπέρθεση παραδοσιακών σημάτων OFDM με αισθητηριακές πληροφορίες στο κομμάτι καθυστέρησης- Doppler, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η απόδοση της εκτίμησης και να μειώνονται τα σφάλματα. Τέτοιου είδους τεχνικές αξιοποιούν τα όρια Cramer-Rao, ώστε να επιτευχθεί υψηλότερη ακρίβεια στην ανίχνευση στόχων, ενώ παράλληλα διατηρούν ικανοποιητικές επιδόσεις στην επικοινωνία. Αν και οι προσεγγίσεις αυτές συνοδεύονται από υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα, προσφέρουν βασικά πλεονεκτήματα σε απόδοση και αξιοπιστία για μελλοντικά ISAC συστήματα.

Παρακάτω ακολουθεί ένας συγκριτικός πίνακας των μεθοδολογιών και ένα διάγραμμά τους.

Πίνακας 3: Συγκριτική ανάλυση των μεθοδολογιών CCWD, SCWD, JWOD: πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Σχεδιασμός Κυματομορφών	Μεθοδολογίες	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
CCWD	- Κυματομορφές ενός φέροντος - OFDM - Αναδυόμενες κυματομορφές	- Αξιοπιστία και αποτελεσματική απόδοση επικοινωνίας - Υποβοήθηση επικοινωνίας μέσω αισθητήρων	- Περιορισμένη ανίχνευση ακρίβειας - Δύσκολη υλοποίηση της full-duplex
SCWD	- Chirp - IM - Ενσωμάτωση πληροφορίας στον χωρικό τομέα	- Αξιόπιστη απόδοση αισθητήρα - Ευκολία υλοποίησης λειτουργίας full-duplex	- Έλλειψη αποτελεσματικών αρχών για αποδιαμόρφωση - Δύσκολη η εκτίμηση

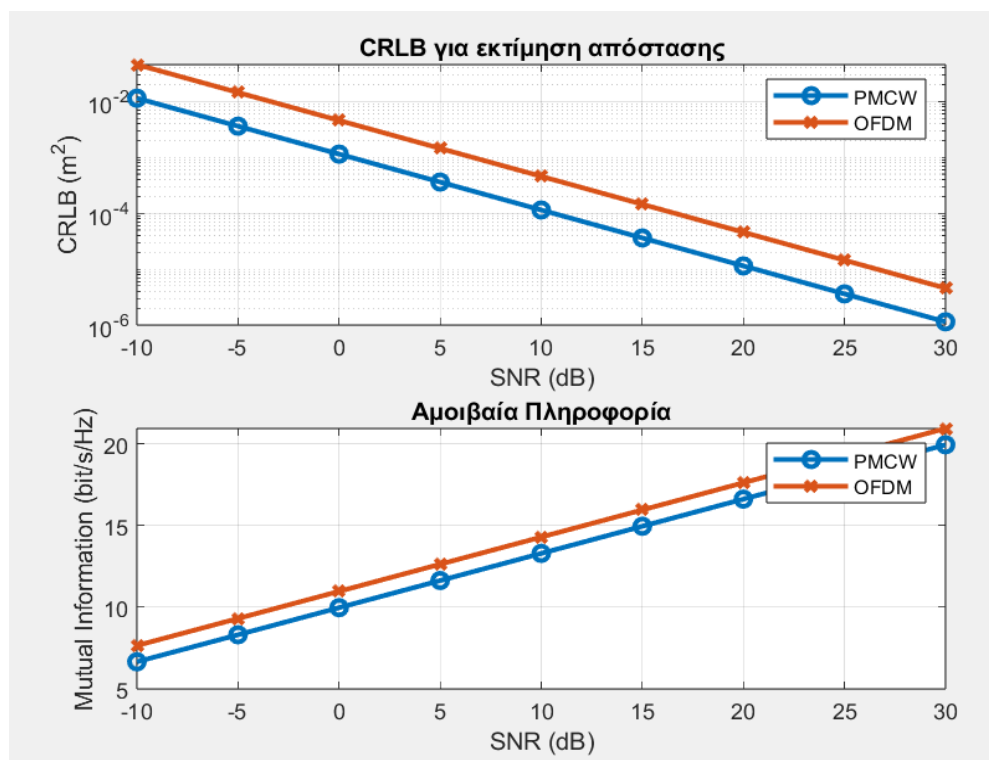
		• Σύγχρονο ρολόι στα περισσότερα ραντάρ	των καναλιών
JWOD	• Βελτιστοποίηση κυματομορφών • Κοινός σχεδιασμός στους τομείς χρόνου/ συχνότητας • Χωρικό beamforming	• Αρκετοί βαθμοί ελευθερίας για ανεξάρτητο σχεδιασμό κυματομορφών • Αμοιβαίο κέρδος απόδοσης	• Υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα • Έλλειψη ενοποιημένης μέτρησης απόδοσης



Εικόνα 8: Κατηγοριοποίηση στρατηγικών σχεδίασης για ISAC συστήματα.

4.4. Μελέτη περίπτωσης (Βελτιστοποίηση με το CRLB, MI)

Η μελέτη περίπτωσης που ακολουθεί επικεντρώνεται στη σύγκριση δύο κυματομορφών που χρησιμοποιούνται σε σενάρια Ολοκληρωμένης Επικοινωνίας και Ανίχνευσης, συγκεκριμένα της PMCW και της OFDM. Η ανάλυση ασχολείται με δύο βασικές παραμέτρους βελτιστοποίησης: τη Κατώτερη Οριακή Διακύμανση Cramer-Rao (CRLB), η οποία αντιπροσωπεύει την ελάχιστη δυνατή διακύμανση στην εκτίμηση απόστασης, και την Αμοιβαία Πληροφορία (Mutual Information, MI), που εκφράζει την ικανότητα μετάδοσης πληροφορίας μέσω του καναλιού. Η συγκριτική αξιολόγηση αυτών των κυματομορφών, σε συνάρτηση με τον λόγο σήματος προς θόρυβο, προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες για την βελτιστοποίηση αυτών των συστημάτων. Ο υπολογισμός του CRLB και της αμοιβαίας πληροφορίας σχετικά με τις κυματομορφές PMCW και OFDM παρουσιάζεται στον κώδικα του Παραρτήματος Α και τα αντίστοιχα γραφήματα στην εικόνα 9.



Εικόνα 9: Σύγκριση των κυματομορφών PMCW και OFDM ως προς την ακρίβεια εκτίμησης απόστασης (CRLB) και την αμοιβαία πληροφορία συναρτήσει του SNR

Στα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρείται ότι το CRLB για την εκτίμηση της απόστασης μειώνεται εκθετικά, καθώς το SNR αυξάνεται, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι

το ισχυρότερο σήμα μειώνει την αβεβαιότητα στην εκτίμηση. Συγκεκριμένα, η κυματομορφή PMCW έχει χαμηλότερες τιμές CRLB σε σχέση με την OFDM, υποδεικνύοντας υψηλότερη ακρίβεια και αξιοπιστία στην εκτίμηση απόστασης. Αυτό οφείλεται στην υψηλή συμπακνωμένη ενέργεια και την καλύτερη αυτοσυσχέτιση που χαρακτηρίζουν την PMCW, καθιστώντας την ιδιαίτερα κατάλληλη για εφαρμογές ανίχνευσης.

Από την άλλη πλευρά, η αμοιβαία πληροφορία (MI) εμφανίζει αυξητικές τιμές με το SNR τόσο το PMCW όσο και η OFDM βελτιώνοντας την μετάδοση πληροφορίας όσο αυξάνεται η ποιότητα του σήματος. Ωστόσο, η OFDM παρουσιάζει υψηλότερες τιμές, γεγονός που αποτυπώνει την ανώτερη απόδοση του σενάρια επικοινωνίας. Η πολυπλεξία συχνοτήτων που περιέχει η OFDM βοηθάει στην μετάδοση μεγαλύτερου όγκου δεδομένων με αρκετή αποτελεσματικότητα, καθιστώντας το ιδανικό για συστήματα επικοινωνιακά.

4.5. Συμπεράσματα του σχεδιασμού κυματομορφών

Συνοψίζοντας, η τεχνολογία του Communication-Centric Waveform Design (CCWD) αναδεικνύει την δυνατότητα αξιοποίησης ή προσαρμογής των υπάρχουσών κυματομορφών επικοινωνίας για την εξαγωγή πολύτιμων πληροφοριών ανίχνευσης από τα σήματα που ανακλώνται και παράγονται από στόχους στο περιβάλλον. Το ιδιαίτερο σημαντικό στοιχείο αυτής της προσέγγισης είναι ότι η απόδοση επικοινωνίας διατηρείται, ενώ σχεδόν κάθε κυματομορφή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανίχνευση, εφόσον το σήμα που μεταδίδεται είναι γνωστό εκ των προτέρων στον δέκτη.

Η ενσωμάτωση της ανίχνευσης σε συστήματα επικοινωνίας φαίνεται φυσική, αφού η επικοινωνία βασίζεται στην εκτίμηση της κατάστασης του καναλιού-διαδικασία που θυμίζει τις τεχνικές παρακολούθησης του περιβάλλοντος. Ωστόσο, στα συστήματα millimeter wave με massive MIMO έχουν παρατηρηθεί εντυπωσιακές ομοιότητες στην επεξεργασία σήματος και στα χαρακτηριστικά του καναλιού μεταξύ επικοινωνίας και ανίχνευσης, με την εκτίμηση παραμέτρων να μοιάζει με εκείνη στα ραντάρ.

Ωστόσο, η ακρίβεια και η αξιοπιστία της ανίχνευσης μπορεί να εξαρτώνται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος λειτουργίας και επηρεάζονται από την τυχαιότητα που εισάγουν τα δεδομένα επικοινωνίας. Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων απαιτούνται τεχνολογικές βελτιώσεις, όπως η πλήρης διπλή λειτουργία, ακύρωση

αυτοπαρεμβολων και προηγμένοι αλγόριθμοι που αξιοποιούν υπερ-ανάλυση και λαμβάνουν υπόψη τα φαινόμενα Doppler.

Συνολικά, η συγκεκριμένη μέθοδος προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση για την υλοποίηση ενιαίων συστημάτων επικοινωνίας και ανίχνευσης, όπου συνδυάζουν υψηλή ακρίβεια ανθεκτικότητα κα αξιοπιστία.

Όσον αφορά την μέθοδο Sensing-Centric Waveform Design (SCWD) για τα συγκεκριμένα συστήματα έχει προσελκύσει σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον. Συγκρίθηκαν διάφορες κυματομορφές τόσο με την χρήση chirp- based όσο και το IM-based τεχνικών και αναδείχθηκαν τα πλεονεκτήματα και οι προκλήσεις τους. Ακόμα και αν θεωρητικά οποιαδήποτε ραντάρ κυματομορφή αξιοποιείται για ενσωμάτωση συμβολών επικοινωνίας σε διάφορους πόρους, η ενσωμάτωση φαίνεται να επιφέρει υποβάθμιση στην απόδοση ανίχνευσης. Επιπλέον, η πολυπλοκότητα στην αρχιτεκτονική του πομποδέκτη, λόγω των απαιτήσεων κωδικοποίησης/αποκωδικοποίησης των πληροφοριών επικοινωνίας, καθιστώντας αναγκαία την εξέταση τρόπων για τον περιορισμό του κόστους υλικού.

Στην τελευταία ενότητα, εξετάστηκαν οι μέθοδοι Joint Waveform Optimization Design (JWOD) για τα συστήματα ISAC. Η συγκεκριμένη προσέγγιση διαφοροποιείται από τις προηγούμενες μεθόδους καθώς δεν στηρίζεται σε υπάρχουσες κυματομορφές αρντάρ ή επικοινωνίας, αλλά σχεδιάζει κυματομορφές που ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες απαιτήσεις ανάλογα με τα σενάρια λειτουργίας.

Αν και οι μέθοδοι είναι αρκετά πολύπλοκες λόγω της απαίτησής ανάπτυξης νέων κυματομορφών, προσφέρουν υψηλότερη ευελιξία και αξία, χάρη στις ιδιότητες τους που προσαρμόζονται στις ανάγκες. Επιπλέον, οι μέθοδοι αυτές επιτυγχάνουν μια κλιμακούμενη ισορροπία μεταξύ της απόδοσης της ανίχνευσης και της επικοινωνίας κάτι που διαχωρίζει από τις άλλες δύο, οι οποίες περιορίζονται ως προς τη λειτουργία του δεύτερου στοιχείου τους.

4.6. Πρωτόκολλα Συνδυασμένης Επικοινωνίας και Ανίχνευσης

Η επιτυχής υλοποίηση συστημάτων ISAC δεν εξαρτάται μόνο από τις επιλεγμένες κυματομορφές, αλλά και από τα πρωτόκολλα διαχείρισης πόρων. Είναι υπεύθυνο για το πώς επιτυγχάνεται η ταυτόχρονη ή εναλλασσόμενη λειτουργία ανίχνευσης και

επικοινωνίας στο ίδιο φυσικό σύστημα, με στόχο την καλύτερη αξιοποίηση φάσματος, τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και την διατήρηση υψηλής ποιότητας υπηρεσιών.

4.6.1. Extended automated request (e-ARQ)

Στο πλαίσιο των ολοκληρωμένων συστημάτων επικοινωνίας και ανίχνευσης, πέρα από τον σχεδιασμό κυματομορφών που συνδυάζουν δυο λειτουργίες, έχουν αναπτυχθεί και στρατηγικές που στηρίζονται στην προσαρμοστικότητα του συστήματος. Η προσέγγιση αυτή είναι η διαδικασία Extended Automated Request (e-ARQ), όπου είναι ένας μηχανισμός ανάδρασης που αξιολογεί την ποιότητα ανίχνευσης και ρυθμίζει δυναμικά την κατανομή των πόρων μεταξύ επικοινωνίας και ανίχνευσης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί δείκτες αξιοπιστίας ώστε να καθοριστεί εάν απαιτούνται πρόσθετοι πόροι για ανίχνευση ή αν μπορεί να συνεχιστεί η κανονική λειτουργία επικοινωνίας, παρέχοντας ένα ευέλικτο και αποδοτικό πλαίσιο διαχείρισης πόρων για τα συγκεκριμένα συστήματα. Τέλος, το e-ARQ έχει την δυνατότητα να ενσωματωθεί σε συστήματα που χρησιμοποιούν κυματομορφές, όπως OFDM, PMCW FMCW προσφέροντας μια προοπτική προσαρμοστικής βελτιστοποίησης που συμπληρώνει τον σχεδιασμό κυματομορφών.

4.6.2. Πρωτόκολλα Βασισμένα σε Μηχανική Μάθηση

Με την ενσωμάτωση τεχνικών μηχανικής μάθησης στα πρωτόκολλα των συστημάτων ISAC έχει ως στόχο τη δημιουργία ευέλικτων, προσαρμοστικών μηχανισμών διαχείρισης πόρων. Συγκεκριμένα, μέσω των τεχνικών ενισχυτικής μάθησης διαμορφώνονται πρωτόκολλα που λαμβάνουν αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο, όπως ποιος πόρος θα χρησιμοποιηθεί (χρονικός, συχνотικός ή χωρικός) για επικοινωνία ή ανίχνευση. Τέτοιου είδους πρωτόκολλο μεγιστοποιεί την απόδοση του συστήματος, προσαρμόζει αυτόματα τις παραμέτρους του σύμφωνα με περιβαλλοντικές συνθήκες, μειώνει την παρεμβολή και αυξάνει την αξιοπιστία της επικοινωνίας και της ανίχνευσης. Επιπλέον, προτείνονται εξελιγμένες προσεγγίσεις όπως meta-learning και graph neural networks (GNNs). Αυτά τα πρωτόκολλα θεωρούνται το επόμενο βήμα για την υλοποίηση πλήρως ευφών ISAC συστημάτων, με την δυνατότητα να μαθαίνουν, να προσαρμόζονται και να βελτιώνονται συνεχώς [82].

4.6.3. Μέθοδοι Κατανομής Πόρων σε ISAC Συστήματα: TDM, FDM και CDM

Σχετικά με την βέλτιστη κατανομή πόρων σε συστήματα ISAC, εξετάζονται τρεις τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης: TDM (Time Division Multiplexing), FDM (Frequency Division Multiplexing) CDM (Code Division Multiplexing). Οι μέθοδοι επιτρέπουν την ταυτόχρονη ή διακριτή εκτέλεση ανίχνευσης και επικοινωνίας, με διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς την απόδοση, την πολυπλοκότητα και τη απόδοση φασμάτος. Στην εργασία [ChirpforSensing, 2025], προτείνεται ένα ενοποιημένο chirp κυματομορφών για όλες τις μεθόδους, με στόχο την μείωση του PAPR και την ενίσχυση της ευελιξίας του συστήματος.

Πίνακας 5: Πίνακας Σύγκρισης Μεθόδων

Μέθοδος	Κατανομή πόρων	PAPR	Απόδοση ανίχνευσης	Χρήση για
TDM	Για επικοινωνία και ανίχνευση διαφορετικά σύμβολα OFDM	Χαμηλό	Υψηλή	• Ευκρίνει α ανίχνευσης • Σταθερά περιβάλλοντα
FDM	Στο ίδιο σύμβολο διαφορετικές υποφέρουσες	Χαμηλό	Καλή	• Ισορροπία • ISAC πραγματικού χρόνου
CDM	Ορθογώνια κωδικοποίηση στο ίδιο σύμβολο και υποφέρουσες	Υψηλό	Μέτρια	• Band-width-constrained εφαρμογές

5. Μοντελοποίηση και Προσομοίωση με MATLAB

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται παραδείγματα Ολοκληρωμένης Ανίχνευσης και Επικοινωνίας, τόσο από την βιβλιογραφία όσο και μέσω υλοποίησης στο MATLAB. Αρχικά, πρόκειται να αναλυθούν τρία ενδεικτικά σενάρια από το MathWorks με κυματομορφές PMCW, OFDM και τον συνδυασμό τους. Στην συνέχεια, θα υλοποιηθούν οι κυματομορφές OFDM και OTFS στο MATLAB, με στόχο την σύγκριση τους ως προς την εκτίμηση ταχύτητας και απόστασης.

5.3. Προσέγγιση με επίκεντρο το ραντάρ χρησιμοποιώντας κυματομορφή PMCW

Η πρώτη υλοποίηση [79] αναφέρεται στην μοντελοποίηση ενός συστήματος Ενοποιημένης Ανίχνευσης και Επικοινωνίας με επίκεντρο το ραντάρ χρησιμοποιώντας μια κυματομορφή συνεχούς κύματος με διαμόρφωση φάσης (PWCW). Αρχικά, περιγράφεται η λειτουργία του συστήματος ISAC η οποία συνδυάζει λειτουργίες ραντάρ και επικοινωνίας σε μια κοινή πλατφόρμα χρησιμοποιώντας κοινό υλικό και κυματομορφή. Ιδιαίτερης σημασίας είναι τα περιβάλλοντα με περιορισμένο φάσμα, σαν τα 6G, μιας και επιτρέπει την αποδοτική χρήση του φάσματος και μειώνει το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος. Παράλληλα, επιτρέπει την ενσωμάτωση ενός bit επικοινωνίας ανά περίοδο διαμόρφωσης, δίχως σημαντική υποβάθμιση των επιδόσεων ραντάρ.

Το σύστημα έχει συχνότητα φορέα 77 GHz και εύρος ζώνης 150 MHz με διαμόρφωση PMCW με m-sequence. Η κεραία είναι MIMO με 4 πομπούς και 4 δέκτες σε ομοιόμορφες γραμμικές συστοιχίες. Είναι ένα μονοστατικό ραντάρ το οποίο εντοπίζει στόχους και μεταδίδει δεδομένα σε έναν χρήστη κατερχόμενης ζεύξης. Το αποτέλεσμα είναι να εκτιμάται η απόσταση και η ταχύτητα των στόχων με χρήση cross-correlation και Doppler. Να ανακατασκευάζεται η φάση του σήματος και να φαίνεται το ποσοστό της επιτυχούς μετάδοσης bit, καθώς και εικόνες, όπως constellation diagram και range Doppler maps.

5.4. Προσέγγιση με επίκεντρο την επικοινωνία χρησιμοποιώντας MIMO-OFDM

Το δεύτερο παράδειγμα [80], είναι ένα σύστημα επικοινωνιακεντρικό, αλλά ενσωματώνει και λειτουργίες ραντάρ. Περιέχονται OFDM σήματα με pilot subcarriers, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την εκτίμηση στόχων, όπως γίνεται σε channel estimation. Το OFDM είναι σήμα με πολλαπλούς φορείς, όπου αποτελείται από ένα σύνολο ορθογώνιων σύνθετων εκθετικών, οι οποίοι λέγονται υποφορείς. Το σύνθετο πλάτος κάθε υποφορέα μεταφέρει δεδομένα επικοινωνίας με υψηλό ρυθμό δεδομένων. Οι pilot subcarriers εκτιμούν κανάλι, όπου αξιοποιείται για την ανακατασκευή της χρονικής καθυστέρησης και μετατόπισης Doppler.

Τα χαρακτηριστικά του συστήματος είναι η συχνότητα 6 GHz με εύρος ζώνης 100 MHz και κυματομορφή MIMO-OFDM. Περιέχει έναν πομπό και έναν δέκτη (διστατικό σενάριο). Το αποτέλεσμα είναι η εκτίμηση της χρονικής καθυστέρησης για την απόσταση και Doppler για την ταχύτητα από την απάντηση καναλιού. Επιπλέον, παρατηρούνται οι επιδόσεις επικοινωνίας και μέσω των διαγραμμάτων της κυματομορφής αναλύονται οι frequency responses, channel estimates και το constellation diagrams.

5.5. Συνδυαστική υλοποίηση PMCW και OFDM

Ένα από τα πιο σύνθετα συστήματα [81], στο οποίο συγκρίνονται δυο κυματομορφές: η PMCW (κυματομορφή συνεχούς φάσης) και η OFDM (κυματομορφή ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας) μέσω στο ίδιο σήμα. Σκοπός είναι να συγκριθεί η αποτελεσματικότητα της καθεμίας για την ταυτόχρονη λειτουργία ραντάρ και επικοινωνίας. Τα κύρια χαρακτηριστικά της είναι η συχνότητα στα 24 GHz, το εύρος ζώνης 100MHz και MIMO αρχιτεκτονική. Επιπλέον, συγκρίνονται οι αποδόσεις ραντάρ (range/Doppler resolution, clutter suppression), η ακρίβεια της εκτίμησης στόχου (range/Doppler scatter plots) και οι επικοινωνιακές αποδόσεις (BER, EVM). Εμφανίζει range-Doppler maps και BER μαζί, ώστε να δεις τη «trade-off» σε σχέση με ραντάρ precision και throughput στην επικοινωνία. Παρακάτω αναλύονται τα τρία παραδείγματα με έναν πίνακα συγκριτικής παρουσίασης.

Πίνακας 4: Συγκριτική αξιολόγηση των κυματομορφών PMCW, OFDM, Joint PMCW vs OFDM

Παράδειγμα	Ρόλος Κυματομορφής	Εστίαση	Ανίχνευση	Επικοινωνία	Δομή
Radar Centric PMCW	PMCW	Ραντάρ	Ναι	Ναι (bit ανά block)	4×4 MIMO
Communication centric OFDM	OFDM (with pilots)	Επικοινωνία	Ναι (Από pilots)	Ναι	1×1 MIMO
Joint PMCW vs OFDM	PMCW & OFDM	Συνδυασμός	Ναι	Ναι	Γενική

5.4. Υλοποίηση και Σύγκριση Κυματομορφών ISAC σε περιβάλλον MATLAB

Στην παρούσα εργασία έγινε υλοποίηση και σύγκριση δύο κυματομορφών σε περιβάλλον ISAC. Η μια ήταν η παραδοσιακή OFDM και η εξελιγμένη OTFS. Η OFDM αξιοποιώντας το πεδίο χρόνου-συχνότητας επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων και ανιχνεύει στόχους μέσω Range- Doppler ανάλυσης. Η OTFS από την άλλη, υλοποιείται στο πεδίο καθυστέρησης Doppler προσφέροντας σε μεγάλα κανάλια μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε ταχέως μεταβαλλόμενα κανάλια και ακρίβεια στην εκτίμηση των χαρακτηριστικών του στόχου. Οι δύο μέθοδοι ενσωματώνουν επικοινωνιακή λειτουργία παρατηρώντας ότι η OTFS επιδεικνύει βελτιωμένη απόδοση σε σενάρια υψηλού Doppler.

Για την OFDM- ISAC:

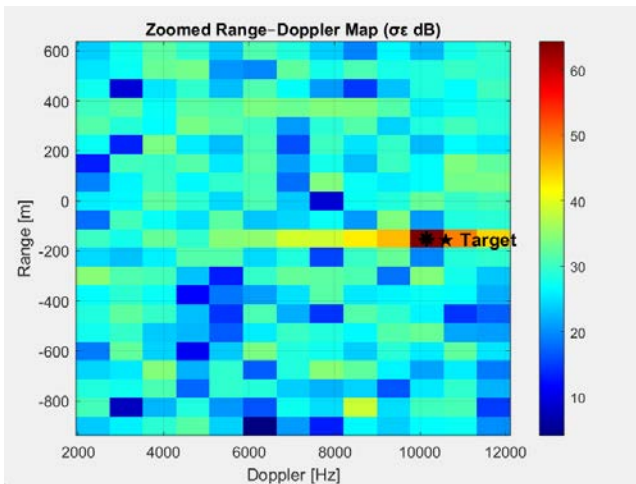
- Διαμόρφωση και Εκπομπή: στον κώδικα δημιουργούνται QPSK σύμβολα, η διαμόρφωση γίνεται μέσω του IFFT και γίνεται προσθήκη του Cyclic Prefix για ανοχή και πολυδιαδρομικότητα. Τα σύμβολα μετατρέπονται σε RF σήμα μέσω του upconversion, όπου προσομοιώνει την εκπομπή.
- Μοντελοποίηση καναλιού και στόχου: Το κανάλι περιέχει καθυστέρηση, φαινόμενο Doppler και προσθήκη λευκού θορύβου AWGN. Αφορά το κινητό στόχο σε απόσταση 150 μέτρα και με ταχύτητα 20 m/s.

- Λήψη και Επεξεργασία: Το σήμα υποβάλλεται σε FFT και αποδιαμόρφωση (downconversion). Το αποτέλεσμα τους είναι ένα πλέγμα συμβόλων στο πεδίο συχνοτήτων προς επεξεργασία.
- Εκτίμηση απόστασης και ταχύτητας - Range-Doppler Map: Μέσω 2D FFT του εκτιμώμενου δημιουργείται χάρτης απόστασης – Doppler. Ο εντοπισμός της μέγιστης ενέργειας δίνει εκτίμησης της απόστασης και της ταχύτητας του στόχου.
- Αξιολόγηση Επικοινωνιακής Απόδοσης (BER): Γίνεται εξισορρόπηση του καναλιού και η αποδιαμόρφωση των λαμβανόμενων συμβόλων. Συγκρίνοντας τα αρχικά και τελικά bits αποδίδει το Bit Error Rate, με σκοπό την αξιολόγηση της επικοινωνιακής αξιοπιστίας του συστήματος.
- Οπτικοποίηση RD Map: Μετατροπή του χάρτη σε dB και απεικόνιση του με ζουμ στην περιοχή της κορυφής, όπου εμφανίζεται ο στόχος. Προσθήκη αστεριού για επισήμανση θέσης μέγιστης ενέργειας.

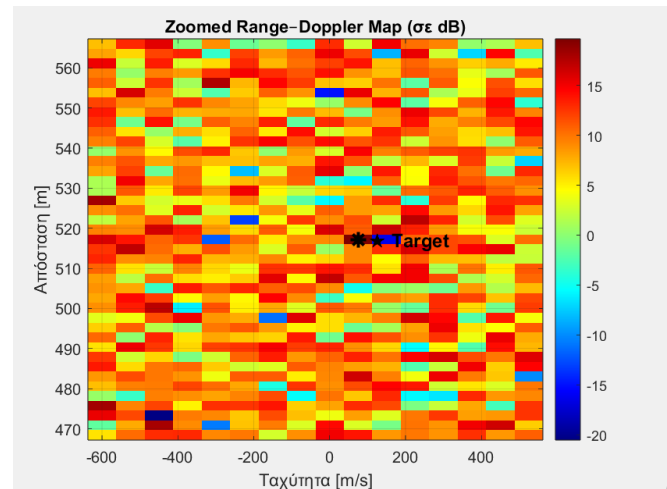
Για την OTFS-ISAC:

- Δημιουργία και Διαμόρφωση OTFS συμβόλων: Δημιουργία τυχαίων QAM συμβόλων και οργανώνονται σε πλέγμα καθυστέρησης-Doppler διαστάσεων $M \times N$. Μέσω του ISFFT γίνεται η μετατροπή από το Delay-Doppler domain στο πεδίο χρόνου-συχνότητας, ενώ η τελική διαμόρφωση του σήματος επιτυγχάνεται με IFFT για να παραχθεί το σήμα προς εκπομπή.
- Μοντελοποίηση καναλιού με ανακλώμενο στόχο: Μοντελοποιείται το κανάλι με καθυστέρηση, μετατόπιση Doppler και λευκό θόρυβο AWGN. Η προσομοίωση αφορά έναν στόχο σε απόσταση 30 μέτρα και ταχύτητα 20 m/s.
- Λήψη και Επεξεργασία : Το ληφθέν σήμα επαναδιαμορφώνεται στο πεδίο χρόνου-συχνότητ και μετά μέσω SFFT επιστρέφει στο Delay-Doppler πεδίο. Δημιουργία πίνακα Y_{dd} , ο οποίος περιέχει τις ανακλώμενες συνιστώσες του σήματος από τον στόχο.
- Εκτίμηση απόστασης και ταχύτητας με χρήση διφασικού αλγορίθμου: Ο αλγόριθμος διακρίνεται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο περιέχει μια αρχική χονδρική αναζήτηση της κορυφής ενέργειας στο Delay-Doppler πλέγμα. Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την βελτιστοποίηση μέσω Golden Section Search για ακρίβεια στην εκτίμηση καθυστέρησης και Doppler. Η καθυστέρηση μετατρέπεται σε απόστασης και η συχνότητα Doppler σε ταχύτητα.

- Επικοινωνιακή Ανάκτηση και BER: Ευθυγράμμιση του εκτιμώμενου σήματος βάση της εκτιμώμενης καθυστέρησης και Doppler. Μετά την εξισορρόπηση και την αποδιαμόρφωση γίνεται υπολογισμός του BER, συγκρίνοντας τα ληφθέντα με τα αρχικά bits.
- Οπτικοποίηση Range-Doppler: Ο πίνακας Y_{dd} μετατρέπεται σε dB και απεικονίζεται ως Range-Doppler. Η κορυφή επισημαίνεται με αστέρι, υποδεικνύοντας την θέση του στόχου και προβάλλεται η περιοχή γύρω από την κορυφή με ζουμ.



Εικόνα 10: Zoomed Range–Doppler Map: Εστιασμένος χάρτης απόστασης–ταχύτητας για την κυματομορφή OFDM-ISAC.



Εικόνα 11: Zoomed Range–Doppler Map που απεικονίζει την εκτιμώμενη απόσταση και ταχύτητα στόχου στο σύστημα OTFS-ISAC.

6.Μελλοντικές επεκτάσεις

και προκλήσεις

Η τεχνολογία Ολοκληρωμένης Επικοινωνίας και Ανίχνευσης συνιστά έναν από τους θεμελιώδεις πυλώνες των μελλοντικών ασύρματων συστημάτων 6G συνδυάζοντας λειτουργίες επικοινωνίας και ανίχνευσης αξιοποιώντας κοινό φάσμα, υλικό, baseband, σήμα και λοιπές υποδομές. Παρά το μεγάλο δυναμικό που ενσωματώνει, η ISAC είναι σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης και έχει να αντιμετωπίσει σημαντικές τεχνολογικές προκλήσεις.

Μια από τις βασικές προκλήσεις είναι η διαμόρφωση των κυματομορφών ISAC. Η OFDM αποτελεί το πιο διαδεδομένο σχήμα διαμόρφωσης στις κινητές επικοινωνίες λόγω της χαμηλής πολυπλοκότητας και της εύκολης υλοποίησης της. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα, όπως η περιορισμένη ανθεκτικότητα στις μετατοπίσεις Doppler, ο υψηλός λόγος μεγίστης προς μέση ισχύ και η αυξημένη αμφισημία Doppler. Εναλλακτικές λύσεις όπως, οι GFDM, FMCW, OTFS και AFDM έχουν αναδειχθεί ως υποσχόμενες επιλογές. Η GFDM προσφέρει καλύτερες επιδόσεις σε σύγκριση με την OFDM, αν και απαιτεί μεγαλύτερη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Η FMCW, παρά την ανάγκη για σύνθετους μηχανισμούς εκτίμησης καναλιού, παρέχει απλή υλοποίηση και χαμηλή ένταση πλευρικών λοβών. Οι OTFS και AFDM επιδεικνύουν αυξημένη ανθεκτικότητα σε μεταβολές Doppler και ξεχωρίζουν για την ικανότητα τους να επιτυγχάνουν διαφοροποίηση σε απαιτητικά περιβάλλοντα καναλιού, ειδικά σε συνθήκες χαμηλού λόγου σήματος προς θόρυβο. Παρά τις ανώτερες επιδόσεις τους σε σχέση με την OFDM, απαιτούν βελτιώσεις στη αποδοτικότητα ισχύος, την φασματική αποδοτικότητα και την πολυπλοκότητα της εκτίμησης καναλιού.

Ένα σημαντικό εμπόδιο στην επεξεργασία σήματος των κυματομορφών ISAC είναι η παρουσία παρεμβολών, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα σταθμών βάσης και χρηστών. Η διάκριση μεταξύ σημάτων επικοινωνίας και σημάτων ανίχνευσης αποτελεί κρίσιμο ζήτημα, το οποίο επιδεινώνεται σε υψηλές συχνότητες λόγω των αυξημένων απωλειών διαδρομής και του θορύβου. Παρόλο που έχουν προταθεί μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης για την εξαγωγή χαρακτηριστικών των σημάτων, αυτές απαιτούν εκτενή εκπαίδευση, κατάλληλα σύνολα δεδομένων και εξειδικευμένες αρχιτεκτονικές νευρωνικών δικτύων. Οι διαφορές που παρουσιάζουν τα σήματα επικοινωνίας σε σχέση με εκείνα της ανίχνευσης καθιστούν δύσκολη την ενιαία αποδοτική επεξεργασία τους. Η έρευνά επικεντρώνεται στην σχεδίαση νέων κυματομορφών που θα είναι ανθεκτικές σε παρεμβολές και θα αξιοποιούν τον χρόνο, την συχνότητα και τον χώρο, καθώς και σε προηγμένες μεθόδους εκτίμησης και διαχωρισμού παρεμβολών στον δέκτη.

Ζήτημα υψίστης σημασίας αποτελεί και η διασφάλιση της ιδιωτικότητας και της ασφάλειας στα ISAC συστήματα. Η κοινή χρήση της ίδιας κυματομορφής για επικοινωνία και ανίχνευση εγκυμονεί κινδύνους, καθώς επιτρέπει σε κακόβουλους παράγοντες να υποκλέψουν πληροφορίες ή να διαταράξουν κρίσιμες λειτουργίες. Προκειμένου να διασφαλιστεί η εμπιστευτικότητα και η ακεραιότητα των δεδομένων

προτείνονται στρατηγικές όπως η ενίσχυση της ανθεκτικότητας των σημάτων στις παρεμβολές κατά την διάρκεια της επεξεργασίας των δεδομένων ανίχνευσης. Μια ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος είναι η χρήση τεχνητού θορύβου, η οποία περιλαμβάνει την προσθήκη θορύβου στον μηδενικό υποχώρο του καναλιού του δέκτη. Αυτή η προσέγγιση μειώνει την απόδοση του καναλιού του υποκλοπέα και ενισχύει την ασφάλεια της επικοινωνίας.

Ένα ακόμη προκλητικό πεδίο είναι η δέσμευση δέσμης (beamforming) σε δυναμικά περιβάλλοντα. Η ανάγκη για συνεχή ευθυγράμμιση των δεσμών επικοινωνίας και ανίχνευσης, ειδικά σε περιπτώσεις κινητών πομπών ή δεκτών, καθιστά δύσκολη τη διατήρηση υψηλών ρυθμών μετάδοσης. Τεχνολογίες όπως οι επαναδιαμορφώσιμες έξυπνες επιφάνειες (RIS) μπορούν να προσφέρουν σημαντική συμβολή, διευκολύνοντας τον έξυπνο σχηματισμό δέσμης και την αύξηση της εμβέλειας επικοινωνίας. Η δημιουργία αυτών των δεσμών απαιτεί πρόσβαση σε δεδομένα περιβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο, ενώ η εφαρμογή συστημάτων κλειστού βρόχου που συνδυάζουν ανίχνευση, beamforming και επικοινωνία είναι κρίσιμη για την βελτιστοποίηση της απόδοσης σε τομείς όπως ο εντοπισμός θέσης, η παρακολούθηση στόχων και η αυτόνομη πλοήγηση.

Τέλος, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη εναρμονισμένων και πολυδιάστατων δεικτών απόδοσης για τις κυματομορφές ISAC, καθώς αυτές εξυπηρετούν ταυτόχρονα στόχους επικοινωνίας και ανίχνευσης. Οι παραδοσιακές μετρικές της θεωρίας πληροφορίας δεν είναι επαρκείς για να αποτυπώσουν τη πολυπλοκότητα των συστημάτων ISAC. Νέες μετρικές, όπως ο ρυθμός πληροφοριών εκτίμησης, το ισοδύναμο μέσο τετραγωνικό σφάλμα και η συνάρτηση χωρητικότητας- παραμόρφωσης, επιτρέπουν μια ποσοτική εκτίμηση της ισορροπίας μεταξύ δύο λειτουργιών. Στο μέλλον, αυτά τα συστήματα θα πρέπει να ενσωματώνουν ευέλικτους μηχανισμούς βελτιστοποίησης, προκειμένου να προσαρμόζουν δυναμικά την ακρίβεια ανίχνευσης, τους ρυθμούς επικοινωνίας και την κατανομή των πόρων, ανάλογα με το εκάστοτε περιβάλλον,. Επιπλέον, η αξιολόγηση της απόδοσης θα πρέπει να περιλαμβάνει παραμέτρους όπως η καθυστέρηση, η απόκριση σε πραγματικό χρόνο, η ενεργειακή κατανάλωση, η χωρική ανάλυση και η εμβέλεια. Η εφαρμογή τεχνικών μηχανικής μάθησης για την πρόβλεψη της ζήτησης και την αυτόματη αναπροσαρμογή των

επιδόσεων μπορεί να είναι καθοριστική για την αποδοτική λειτουργία των συστημάτων σε πολύπλοκα και μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα.

7. Συμπεράσματα

Η παρούσα πτυχιακή εργασία είχε ως βασικό στόχο την μελέτη και μοντελοποίηση πρωτοκόλλων και κυματομορφών σε περιβάλλοντα ολοκληρωμένης επικοινωνίας και ανίχνευσης με χρήση MATLAB. Η ερευνητική προσπάθεια ξεκίνησε με βιβλιογραφική ανασκόπηση των βασικών αρχών της τεχνολογίας ISAC και των κυματομορφών που τη συνοδεύουν. Στη συνέχεια, αναλύθηκαν οι εφαρμογές της ISAC σε τομείς όπως οι έξυπνες πόλεις, η βιομηχανία και τα έξυπνα αυτοκίνητα. Τέλος, αναπτύχθηκαν σενάρια προσομοίωσης στο MATLAB για την εκτίμηση απόστασης και ταχύτητας στόχων.

Κατά την πορεία της εργασίας αντιμετωπίστηκαν σημαντικές προκλήσεις, κυρίως στην κατανόηση και υλοποίηση των μοντέλων στο MATLAB. Ορισμένα σενάρια, όπως η εφαρμογή της OTFS φάνηκε ιδιαίτερα απαιτητικά, τόσο ως προς την τεχνική τους πολυπλοκότητα όσο και ως προς την ακρίβεια των συμπερασμάτων. Η συνεχής εξέταση του κώδικα, η σύγκριση με επίσημα υποδείγματα της MathWorks και η μελέτη θεωρίας συνέλαβαν στην κατανόηση των εννοιών και στη σταδιακή βελτίωση των αποτελεσμάτων.

Εάν ξεκινούσα εκ νέου την ίδια εργασία, ενδεχομένως να προσέγγιζα την ανάπτυξη των σεναρίων MATLAB με μικρότερα και επαληθεύσιμα βήματα εξ' αρχής, ώστε να περιοριστεί ο χρόνος επίλυσης σφαλμάτων και η τεχνική απογοήτευση που προέκυψε σε κάποιες φάσεις. Ωστόσο, η ενασχόληση με το θέμα αποδείχθηκε ιδιαίτερα παραγωγική και με βοήθησε να αποκτήσω βαθύτερη κατανόηση σε τεχνολογίες που σχετίζονται με τις ασύρματες επικοινωνίες, την επεξεργασία σήματος και την ενσωμάτωση ραντάρ με επικοινωνιακά συστήματα.

Η εργασία αυτή παρακίνησει να εμβαθύνω περαιτέρω στον χώρο των έξυπνων συστημάτων και των ενσωματωμένων τεχνολογιών. Θεωρώ ότι η μελλοντική συνέχεια της παρούσας εργασίας δύναται να περιλαμβάνει την ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης για βελτιστοποίηση των αποφάσεων beamforming ή waveform selection, την αξιολόγηση σε πραγματικές συνθήκες πεδίου μέσω SDR (Software Defined Radio) και την επέκταση

του σεναρίου MATLAB σε πολυδιάστατη ανάλυση (2D FFT) για την πλήρη αποσυσχέτιση πολλαπλών στόχων.

Τέλος, η εργασία μπορεί να αποτελέσει βάση για μελλοντική διπλωματική εργασία όπου θα συνδυάζει ISAC με δίκτυα 6G, τεχνικές ενισχυτικής μάθησης ή εφαρμογές edge computing σε πραγματικό χρόνο.

Βιβλιογραφία

- [1] Y. Liu, G. Liao, J. Xu, Z. Yang, and Y. Zhang, “Adaptive OFDM integrated radar and communications waveform design based on information theory,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 21, no. 10, pp. 2174–2177, Oct. 2017.
- [2] Y. Liu, G. Liao, Z. Yang, and J. Xu, “Design of integrated radar and communication system based on MIMO-OFDM waveform,” *J. Syst. Eng. Electron.*, vol. 28, no. 4, pp. 669–680, Aug. 2017.
- [3] C. Shi, F. Wang, S. Salous, and J. Zhou, “Low probability of intercept-based optimal OFDM waveform design strategy for an integrated radar and communications system,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 57689–57699, 2018.
- [4] M. F. Keskin, V. Koivunen, and H. Wymeersch, “Limited Feedforward waveform design for OFDM dual-functional radar-communications,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 69, pp. 2955–2970, 2021.
- [5] S. D. Liyanarachchi, T. Riihonen, C. B. Barneto, and M. Valkama, “Optimized waveforms for 5G–6G communication with sensing: Theory, simulations and experiments,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 12, pp. 8301–8315, Dec. 2021.
- [6] C. D. Ozkaptan, E. Ekici, and O. Altintas, “Adaptive waveform design for communication-enabled automotive radars,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 21, no. 6, pp. 3965–3978, Jun. 2022.
- [7] J. Johnston, L. Venturino, E. Grossi, M. Lops, and X. Wang, “MIMO OFDM dual-function radar-communication under error rate and beam pattern constraints,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 40, no. 6, pp. 1951–1964, Jun. 2022.
- [8] Y. Huang, S. Hu, S. Ma, Z. Liu, and M. Xiao, “Designing low-PAPR waveform for OFDM-based RadCom systems,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 21, no. 9, pp. 6979–6993, Sep. 2022.
- [9] R. F. Tigrek, W. J. A. De Heij, and P. Van Genderen, “OFDM signals as the radar waveform to solve doppler ambiguity,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 48, no. 1, pp. 130–143, Jan. 2012.
- [10] J. B. Sanson, P. M. Tomé, D. Castanheira, A. Gameiro, and P. P. Monteiro, “High-resolution delay-doppler estimation using received communication signals

- for OFDM radar communication system,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 11, pp. 13112–13123, Nov. 2020.
- [11] X. Chen, Z. Feng, Z. Wei, P. Zhang, and X. Yuan, “Code-division OFDM joint communication and sensing system for 6G machine type communication,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 15, pp. 12093–12105, Aug. 2021
 - [12] B. Kang and M. Rangaswamy, “Radar waveform design under communication sum capacity constraint,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 69, pp. 2795–2806, 2021.
 - [13] R. Zhang, B. Shim, W. Yuan, M. D. Renzo, X. Dang, and W. Wu, “Integrated sensing and communication waveform design with sparse vector coding: Low sidelobes and ultra reliability,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 71, no. 4, pp. 4489–4494, Apr. 2022.
 - [14] K. Mizutani and R. Kohno, “Inter-vehicle spread spectrum communication and ranging system with concatenated EOE sequence,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 2, no. 4, pp. 180–191, Dec. 2001.
 - [15] X. Lv, J. Wang, Z. Jiang, and W. Jiao, “A novel PAPR reduction method for OCDM-based radar-communication signal,” in *Proc. Int. Microw. Workshop 5G Hardw. Syst. Technol.*, 2018, pp. 1–3.
 - [16] R. Zhang, Y. Wang, and X. Ma, “Channel estimation for OCDM transmissions with carrier frequency offset,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 11, no. 3, pp. 483–487, Mar. 2022.
 - [17] L. Gaudio, M. Kobayashi, G. Caire, and G. Colavolpe, “On the effectiveness of OTFS for joint radar parameter estimation and communication,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 9, pp. 5951–5965, Jun. 2020.
 - [18] K. Wu, J. A. Zhang, X. Huang, and Y. J. Guo, “OTFS based joint communication and sensing for future industrial IoT,” *IEEE Internet Things J.*, early access, Dec. 31, 2021, doi: 10.1109/JIOT.2021.3139683.
 - [19] W. Yuan, Z. Wei, S. Li, J. Yuan, and D. W. K. Ng, “Integrated sensing and communication-assisted orthogonal time frequency space transmission for vehicular networks,” *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 15, no. 6, pp. 1515–1528, Nov. 2021.

- [20] G. N. Saddik, R. S. Singh, and E. R. Brown, "Ultra-wideband multifunctional communications/radar system," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 55, no. 7, pp. 1431–1437, Jul. 2007.
- [21] A. Hassanien, M. G. Amin, Y. D. Zhang, and B. Himed, "A dual-function MIMO radar-communications system using PSK modulation," in *Proc. 24th Eur. Signal Process. Conf. (EUSIPCO)*, 2016, pp. 1613–1617.
- [22] Y. Gu, L. Zhang, Y. Zhou, and Q. Zhang, "Embedding communication symbols into radar waveform with orthogonal FM scheme," *IEEE Sensors J.*, vol. 18, no. 21, pp. 8709–8719, Nov. 2018.
- [23] M. Jiang, G. Liao, Z. Yang, Y. Liu, and Y. Chen, "Tunable filter design for integrated radar and communication waveforms," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 25, no. 2, pp. 570–573, Feb. 2021.
- [24] M. Bekar, C. J. Baker, E. G. Hoare, and M. Gashinova, "Joint MIMO radar and communication system using a PSK-LFM waveform with TDM and CDM approaches," *IEEE Sensors J.*, vol. 21, no. 5, pp. 6115–6124, Mar. 2021.
- [25] A. Hassanien, M. G. Amin, Y. D. Zhang, and F. Ahmad, "Dual function radar-communications: Information embedding using side lobe control and waveform diversity," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 64, no. 8, pp. 2168–2181, Apr. 2016.
- [26] L. Feng, G. Cui, L. Kong, and X. Zhang, "A RadCom system with flexible array controls," in *Proc. IEEE Radar Conf.*, 2019, pp. 1–5.
- [27] J. Yang, G. Cui, X. Yu, and L. Kong, "Dual-use signal design for radar and communication via ambiguity function sidelobe control," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 9, pp. 9781–9794, Sep. 2020.
- [28] J. Euzière, R. Guinvarc'h, M. Lesturgie, B. Uguen, and R. Gillard, "Dual function radar communication time-modulated array," in *Proc. Int. Radar Conf.*, 2014, pp. 1–4.
- [29] S. Y. Nusenu, W.-Q. Wang, and A. Basit, "Time-modulated FD MIMO array for integrated radar and communication systems," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 17, no. 6, pp. 1015–1019, Jun. 2018.
- [30] C. Shan, J. Shi, Y. Ma, X. Sha, Y. Liu, and H. Zhao, "Power loss suppression for time-modulated arrays in radar-communication integration," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 15, no. 6, pp. 1365–1377, Nov. 2021.

- [31] A. Hassanien, M. G. Amin, Y. D. Zhang, and F. Ahmad, "Dual-function radar-communications using phase-rotational invariance," in *Proc. 23rd Eur. Signal Process. Conf. (EUSIPCO)*, 2015, pp. 1346–1350
- [32] Q. Zhang, Y. Zhou, L. Zhang, Y. Gu, and J. Zhang, "Circulating code array for a dual-function radar-communications system," *IEEE Sensors J.*, vol. 20, no. 2, pp. 786–798, Jan. 2020
- [33] D. Ma, N. Shlezinger, T. Huang, Y. Liu, and Y. C. Eldar, "FRaC: FMCW-based joint radar-communications system via index modulation," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 15, no. 6, pp. 1348–1364, Nov. 2021
- [34] C. B. A. Wael, M. A. M. Ali, and M. A. M. M. Isa, "Performance of Regularized Zero Forcing (RZF) Precoding for Multiuser Massive MIMO-GFDM System over mmWave Channel," in *Proc. 2021 Int. Conf. Recent Adv. Mechatronics Electr. Technol. (ICRAMET)*, 2021, pp. 1–5.
- [35] A-Lin YongWiriyanku, Watchparan Suwansantisuk, "Time and frequency synchronization of GFDM waveforms," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 5, pp. 1043–1055, 2024.
- [36] M. Khan, S. A. Hassan, M. M. Butt, J. Qadir, and D. Pesch, "Intelligent reflecting surface-assisted GFDM communication systems," *IEEE Systems Journal*, vol. 18, no. 2, pp. 1730–1741, Jun. 2023.
- [37] M. Kountouris, N. Ksairi, and A. Bemani, "Time synchronization in GFDM: A low-complexity energy-based method," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 73, no. 4, pp. 4685–4696, May 2024.
- [38] A. Bemani, N. Ksairi and M. Kountouris, "AFDM: A Full Diversity Next Generation Waveform for High Mobility Communications," in *Proc. IEEE Internat. Conf. Commun. (ICC)*, Montréal, Canada, Jun. 14–23 2021.
- [39] Z. Li, X. Fang, H. Dong and C. Zhang, "Chirp Parameter Selection for AFDM with MMSE Equalization in Static Multipath Channels," in *2023 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Rome, Italy, Dec. 2023. [43] S. Y. Nusenu, S. Huai-zong, P. Ye, W. Xuehan, and A. Basit, "Dual-function radar-communication system design via sidelobe manipulation based on FDA butler matrix," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 18, no. 3, pp. 452–456, Mar. 2019.

- [40] S. Y. Nusenu and A. Basit, “Cognitive transmit subarray FDA design for integrated radar-communication using flexible sidelobe control,” in Proc. IEEE 7th Int. Conf. Adapt. Sci. Technol. (ICAST), 2018, pp. 1–6.
- [41] Z. Liu, S. Aditya, H. Li and B. Clerckx, “Joint Transmit and Receive Beamforming Design in Full-Duplex Integrated Sensing and Communications,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, early access, pp. 1–1, Sep. 2023
- [42] X. Wang, Z. Fei, J. A. Zhang and J. Xu, “Partially-Connected Hybrid Beamforming Design for Integrated Sensing and Communication Systems,” IEEE Trans. Commun., vol. 70, no. 10, pp. 6648–6660, Oct. 2022,
- [43] B. Li and A. P. Petropulu, “Joint transmit designs for coexistence of MIMO wireless communications and sparse sensing radars in clutter,” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 53, no. 6, pp. 2846–2864, Dec. 2017.
- [44] R. Liu, M. Li, Q. Liu, and A. L. Swindlehurst, “Joint waveform and filter designs for STAP-SLP-based MIMO-DFRC systems,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 40, no. 6, pp. 1918–1931, Jun. 2022.
- [45] J. Qian, M. Lops, L. Zheng, and X. Wang, “Joint design for co existence of MIMO radar and MIMO communication system,” in Proc. 52nd Asilomar Conf. Signals Syst. Comput., 2017, pp. 568–572.
- [46] C. Xu, B. Clerckx, S. Chen, Y. Mao, and J. Zhang, “Rate-splitting multiple access for multi-antenna joint radar and communications,” IEEE J. Sel. Topics Signal Process., vol. 15, no. 6, pp. 1332–1347, Nov. 2021.
- [47] Z. Cheng, B. Liao, S. Shi, Z. He, and J. Li, “co-design for over laid MIMO radar and Downlink MISO communication systems via cramer–rao bound minimization,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 67, no. 24, pp. 6227–6240, Dec. 2019.
- [48] F. Liu, Y.-F. Liu, A. Li, C. Masouros, and Y. C. Eldar, “Cramer rao bound optimization for joint radar-communication beamforming,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 70, pp. 240–253, 2022.
- [49] X. Wang, Z. Fei, J. Huang, and H. Yu, “Joint waveform and discrete phase shift design for RIS-assisted integrated sensing and communication system under cramer–rao bound constraint,” IEE
- [50] Z. Zhang, Z. Du, and W. Yu, “Mutual-information-based OFDM waveform design for integrated radar-communication system in Gaussian mixture clutter,” IEEE Sens. Lett., vol. 4, no. 1, pp. 1–4, Jan. 2020.

- [51] X. Yuan et al., “Spatio-temporal power optimization for MIMO joint communication and radio sensing systems with training overhead,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, no. 1, pp. 514–528, Jan. 2021.
- [52] F. Liu, L. Zhou, C. Masouros, A. Li, W. Luo, and A. Petropulu, “Toward dual-functional radar-communication systems: Optimal waveform design,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 66, no. 16, pp. 4264–4279, Aug. 2018.
- [53] Z. Cheng, C. Han, B. Liao, Z. He, and J. Li, “Communication-aware waveform design for MIMO radar with good transmit beam pattern,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 66, no. 21, pp. 5549–5562, Nov. 2018.
- [54] F. Liu, C. Masouros, T. Ratnarajah and A. Petropulu, “On Range Sidelobe Reduction for Dual-Functional Radar-Communication Waveforms,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 9, pp. 1572–1576, Sep. 2020
- [55] X. Liu, T. Huang, N. Shlezinger, Y. Liu, J. Zhou, and Y. C. Eldar, “Joint transmit beamforming for multiuser MIMO communications and MIMO radar,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 68, pp. 3929–3944, 2020.
- [56] X. Yu, Q. Yang, Z. Xiao, H. Chen, V. Havaryimana, and Z. Han, “A precoding approach for dual-functional radar-communication system with one-bit DACs,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 40, no. 6, pp. 1965–1977, Jun. 2022.
- [57] M. Temiz, E. Alsusa, and M. W. Baidas, “Optimized precoders for massive MIMO OFDM dual radar-communication systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, no. 7, pp. 4781–4794, Jul. 2021
- [58] J. A. Zhang, X. Huang, Y. J. Guo, J. Yuan, and R. W. Heath, “Multibeam for joint communication and radar sensing using steerable analog antenna arrays,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 1, pp. 671–685, Jan. 2019.
- [59] Y. Luo, J. A. Zhang, X. Huang, W. Ni, and J. Pan, “Optimization and quantization of multibeam beamforming vector for joint communication and radio sensing,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 9, pp. 6468–6482, Sep. 2019.
- [60] Z.-Q. Luo, W.-K. Ma, A. M.-C. So, Y. Ye, and S. Zhang, “Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 27, no. 3, pp. 20–34, May 2010.
- [61] F. Liu and C. Masouros, “Hybrid beamforming with sub-arrayed MIMO radar: Enabling joint sensing and communication at mmWave band,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process. (ICASSP)*, 2019, pp. 7770–7774.

- [62] A. Kaushik, C. Masouros, and F. Liu, “Hardware efficient joint radar communications with hybrid precoding and RF chain optimization,” in Proc. IEEE Int. Conf. Commun., 2021, pp. 1–6.
- [63] Z. Cheng, Z. He, and B. Liao, “Hybrid beamforming design for OFDM dual-function radar-communication system,” IEEE J. Sel. Topics Signal Process., vol. 15, no. 6, pp. 1455–1467, Nov. 2021.
- [64] A. M. Elbir, K. V. Mishra, and S. Chatzinotas, “Terahertz-band joint ultra-massive MIMO radar-communications: Model-based and model-free hybrid beamforming,” IEEE J. Sel. Topics Signal Process., vol. 15, no. 6, pp. 1468–1483, Nov. 2021.
- [65] Liu, F., Masouros, C., & Petropulu, A. (2021). Integrated Sensing and Communications: Towards Dual-Functional Wireless Networks for 6G and Beyond. IEEE Wireless Communications, 28(2), 4-11.
- [66] Liu, F., Masouros, C., Petropulu, A., Clerckx, B., & Zhang, J. (2020). Joint Radar and Communication Design: Applications, State-of-the-Art, and the Road Ahead.
- [67] Ericsson (2024), *Integrated Sensing and Communication*. Available at: <https://www.ericsson.com/en/blog/2024/6/integrated-sensing-and-communication>
- [68] Tanenbaum, A. S. (2025). Constellation diagram. Στο Wikipedia, από https://en.wikipedia.org/wiki/Constellation_diagram
- [69] Akin, A., Altunbasak, Y. & Akin, M. (2016). A Preliminary Work on Predicting Travel Times and Optimal Routes Using Istanbul’s Real Traffic Data. ResearchGate
- [70] Martindale, A. (2024). *Smart Home Security Infographic*. Allen Martindale blog.
- [71] Abdul-Jabbar, Y. A. (2015). An implementation of peak to average power ratio reduction for multicarrier system (orthogonal frequency division multiplexing)
- [72] A. Hassanien, M. G. Amin, Y. D. Zhang, and F. Ahmad, "Integrated Sensing and Communication Waveform Design: A Survey", in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 24, no. 2, pp. 1126–1168, 2022.
- [73] T. Huang, N. Shlezinger, X. Xu, Y. Liu, and Y. C. Eldar, “MAJoRCom: A dual-function radar communication system using index modulation,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 68, pp. 3423–3438, 2020.

- [74] MathWorks. (2023a). Integrated Sensing and Communication: Radar-Centric Approach Using PMCW Waveform.
- [75] MathWorks. (2023b). Integrated Sensing and Communication: Communication-Centric Approach Using MIMO-OFDM.
- [76] MathWorks. (2023c). Joint Radar-Communication Using PMCW and OFDM Waveforms. Phased Array System Toolbox User Guide [Online].
- [77] M. Waqas, M. Khan, A. Zahid, M. Khan, H. Khalil, and B. Ai, "A Survey on Machine Learning Enhanced Integrated Sensing and Communication Systems," arXiv preprint arXiv:2311.09726, Nov. 2023. [Online].
- [78] J. Liu, W. Liu, X. Hou, and L. Chen, "Unified Chirp Sequence Generation for OFDM-based ISAC System with TDM/FDM/CDM Resource Multiplexing," in Proc. IEEE 2025 Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Oslo, Norway, June 2025.