



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
TECHNICAL UNIVERSITY
OF CRETE

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**



**ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΥΦΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»**

Μεταπτυχιακή Διατριβή

**«Υλοποίηση
Παθητικού Διστατικού Ραντάρ
με ανάπτυξη USRP σε SDR»**

**Υπό:
Χρόνη Γεωργίου
Α.Μ.:72950**

Επιβλέπουσα: Καθηγήτρια Ειρ. Καρανάσιου

Αθήνα, Μάιος 2025

Η Μεταπτυχιακή Διατριβή του Χρόνη Γεωργίου , εγκρίνεται:

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθηγήτρια Ειρήνη Καρανάσιου (Επιβλέπουσα),

Αν. Καθηγητής Μιχαήλ Γαργαλάκος,

Αν. Καθηγητής Ελευθέριος Δοϊτσίδης

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του σπουδαστή που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας εκχωρεί στη ΣΣΕ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας των συγγραφέων ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα. Ο συγγραφέας διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια μελέτης της λειτουργίας παθητικού ραντάρ με την βοήθεια λογισμικού ώστε να βελτιωθεί η επιτήρηση των συνόρων με ένα κινητό ραντάρ χαμηλού κόστους. Κατ' αρχήν γίνεται αναφορά στην υπάρχουσα κατάσταση των κινητών ραντάρ σε Ελλάδα και στην Τουρκία. Στην συνέχεια γίνεται μελέτη της λειτουργίας του παθητικού ραντάρ και συγκρίνεται με τα συμβατικά. Γίνεται ευρεία αναφορά στην λειτουργία και στα πλεονεκτήματα των παθητικών διστατικών ραντάρ(PBR) με χρήση σημάτων UMTS και DVB-T, στην κάλυψη από αυτά των προβλημάτων επιτήρησης που υφίστανται και στη συνέχεια μελετάται η λειτουργία τους με την βοήθεια λογισμικού(SDR). Αναφέρεται εκτενώς η λειτουργία PBR ως SDR με την χρήση λογισμικού με την μητρική πλακέτα USRP της NI, η υλοποίηση του με χρήση Doppler και το κόστος. Τέλος γίνεται αναφορά στην σύνδεση του με το διαβαθμισμένο Δίκτυο Δεδομένων Στρατού (ΔΙΔΕΣ) και στις δυνατότητες εξέλιξης του.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	9
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
2. ΚΙΝΗΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗΣ(RADAR)	12
2.1 BOR – A – 550	12
2.2 TRS 22XX	14
3.1. Ιστορική αναδρομή	16
3.1.1. Πρώιμη Ανάπτυξη (1935-1950)	16
3.1.2. Πρώτη Χρήση Παθητικών Ραντάρ (1960-1970)	16
3.1.3. Εξελίξεις και Βελτιώσεις (1980-1990)	16
3.1.4. Σύγχρονη Εποχή (2000-Σήμερα)	17
3.2. Σύγκριση παθητικού ραντάρ με τα συμβατικά ραντάρ	17
4. Το Παθητικό Διστατικό Radar (Passive Bistatic Radar-PBR)	19
4.1 Εισαγωγή	19
4.2 Παθητική επισκόπηση RADAR	20
4.3 Στρατιωτική εφαρμογή παθητικού ραντάρ	21
5. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	24
5.1 Τοποθέτηση κεραιών	24
5.2 Για τον υπολογισμό της θέσης του στόχου	24
5.3 Για τον υπολογισμό της ταχύτητας του στόχου	28
5.4 Το σήμα του πλευρικού λοβού	29
6. RADAR με χρήση Ραδιοεξοπλισμού Υλοποιούμενου με Λογισμικό (Software Defined Radio-SDR)	31
6.1 Το SDR οδηγεί στην Επιτυχή Υλοποίηση του PBR	31
6.2 Εφαρμογή SDR σε συστήματα Radar	33
6.3 Πλεονεκτήματα SDR	35
6.3.1 Πλεονεκτήματα του Software Defined Radio (SDR)	35
6.3.1.1 Ευελιξία και Προσαρμοστικότητα:	35
6.3.1.2 Μείωση Κόστους και Χώρου:	35
6.3.1.3 Πολλαπλές Εφαρμογές σε Ένα Σύστημα:	35
6.3.1.4 Διαχείριση Σήματος:	35
6.3.1.5 Χρήση και Διαχείριση Ασφαλών Επικοινωνιών:	35
6.3.1.6 Ανάπτυξη και Συντήρηση:	36
6.3.2 Μειονεκτήματα του Software Defined Radio (SDR)	36
6.3.2.1 Απαιτήσεις σε Υλικό και Ικανότητες Επεξεργασίας:	36
6.3.2.2 Ευπάθεια σε Λογισμικό και Επιθέσεις Κυβερνοασφάλειας:	36
6.3.2.3 Υψηλή Κατανάλωση Ενέργειας:	36
6.3.2.4 Χρονική Καθυστέρηση (Latency):	36
6.3.2.5 Σύγκριση απόδοσης με ειδικά συστήματα hardware:	36
6.3.2.6 Περιορισμένο εύρος και απόδοση σε κάποιες συχνότητες:	37
7. ΤΟ PROJECT USRP	38
7.1 Οι Δυνατότητες Εφαρμογής του σε Ραντάρ	38
7.2 Απεικόνιση διαδρομής ανάπτυξης USRP σε SDR	40
7.3. Επιλογές εφαρμογής USRP	43
7.4. Η κάρτα USRP 2944-R	43
7.5 Εξοπλισμοί Υλικού-Κόστος	46
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	49
9. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ	50

10. ΕΠΙΛΟΓΟΣ	52
11. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	53

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

ADC - Analog to Digital Converter
CPU - Central Processing Unit
DAC - Digital to Analog Converter
DDC - Digital Down Converter
DMA - Direct Memory Access
DoD - Direction Of Departure
DoA - Direction Of Arrival
DVB-T - Digital Video Broadcasting - Terrestrial
DUC - Digital Up Converter
EW - Electronic Warfare
ECM - Electronic CounterMeasures
ECCM - Electronic Counter-CounterMeasures
FFT - Fast Fourier Transform
FMCW - Frequency Modulated Continuous Wave
FPGA - Field Programmable Gate Array
GIS - Geographic Information Systems
GPS - Global Positioning System
GSM - Group Special Mobile
GSR - Ground Surveillance Reconnaissance
LFM - Linear Frequency Modulation
LNA - Low Noise Amplifier
LO - Local Oscillator
LTE - Long Term Evolution
ML - Machine Learning

NI - National Instruments

OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OS - Operating System

PC - Personal Computer

PHD - Probability Hypothesis Density

PLL - Phased Locked Loop

RADAR - RADio Detection And Ranging

RAM - Random Access Memory

RF - Radio Frequency

RCS - Radar cross section

SNR - Signal to Noise Ratio

SDR - Software Defined Radio

VCO - Voltage Controlled Oscillator

UMTS - Universal Mobile Telecommunications System

UAS - Unmanned Aerial Systems

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Κινητό Σύστημα Ραντάρ ΕΣ BOR-A-550 [1].....	12
Εικόνα 2: Κινητό Σύστημα Ραντάρ BOR-A-550 με κάλυψη παραλλαγής [2] ..	13
Εικόνα 3: Κινητό Σύστημα Ραντάρ ΤΣ TRS22XX [3].....	14
Εικόνα 4: Γεωμετρία πειράματος DVB-T [11].....	20
Εικόνα 5: Ρύθμιση πειράματος UMTS [33].....	20
Εικόνα 6: Χάρτης Ραδιοκάλυψης Σταθμών FM Β.Α. Αιγαίου	22
Εικόνα 7: Επιτήρηση αεροδιαδρόμων εισβολής χερσονήσου Τσεσμέ	23
Εικόνα 8: Σχεδιάγραμμα τοποθέτησης Κεραιών PBR [19].....	24
Εικόνα 9: Σχεδιάγραμμα υπολογισμού απόστασης θέσης στόχου [19].....	25
Εικόνα 10: Σχεδιάγραμμα υπολογισμού θέσης στόχου ως τομή ελλείψεων	26
Εικόνα 11: Επιτήρηση με δέσμη κεραιών [17].....	27
Εικόνα 12: Σχεδιάγραμμα υπολογισμού θέσης στόχου με σάρωση	27
Εικόνα 13: Σχεδιάγραμμα υπολογισμού ταχύτητας στόχου [19].....	28
Εικόνα 14: Σχεδιάγραμμα δημιουργίας πλευρικού λοβού σε PBR [19].....	29
Εικόνα 15: Σύστημα επιτήρησης με θόρυβο [17].....	29
Εικόνα 16: Υλοποίηση αρχιτεκτονικής Ραντάρ FMCW με SDR	31
Εικόνα 17: Διάγραμμα υλοποίησης SDR Ραντάρ με χρήση USRP[23].....	31
Εικόνα 18: Πείραμα ανίχνευσης στόχου με SDR Ραντάρ [38].....	32
Εικόνα 19: Ανίχνευση οχήματος με σήματα UMTS και χρήση Doppler [33]...33	
Εικόνα 20: Ανίχνευση πλοίου με σήματα DVB-T και χρήση Doppler [11].....	33
Εικόνα 21: Αρχική συσκευή USRP και motherboard	37
Εικόνα 22: Εικόνα και προδιαγραφές USRP – Σειρά B [32].....	38
Εικόνα 23: Μοντέλο Simulink για πομπό και δέκτη [25].....	39
Εικόνα 24: Οθόνη διεπαφής SDR της USRP [25].....	40

Εικόνα 25: Πείραμα SDR με χρήση 1 ^{ης} γενιάς συσκευής USRP [25].....	41
Εικόνα 26: Υλοποίηση SDR με χρήση USRP σε εσωτερικό χώρο [25].....	41
Εικόνα 27: Συσκευή USRP 294x και η motherboard	42
Εικόνα 28: Διάγραμμα κάρτας USRP 2944-R [24].....	44
Εικόνα 29: Σχηματική αναπαράσταση συστήματος SDR [24].....	45
Εικόνα 30: Οθόνη LABView για USRP [31].....	46
Εικόνα 31: Διάταξη συστήματος SDR με χρήση συσκευής USRP [24].....	47

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα Ολοκληρωμένο Σύστημα Αυτοπροστασίας (Integrated Countermeasure System) και οι τεχνολογίες Χαμηλής Παρατηρησιμότητας (Low Observable ή Stealth) είναι κρίσιμες τεχνολογίες για την αποτελεσματική λειτουργία των πολεμικών σκαφών και μεταβάλουν συχνά τα δεδομένα στις πολεμικές επιχειρήσεις. Για να αντιμετωπιστούν οι απειλές όταν διατίθενται αυτές οι δυνατότητες προτείνεται η λύση των Συστημάτων Παθητικού Ραντάρ (Passive Radar), που εκμεταλλεύονται και παρακολουθούν τις μικρομεταβολές στις εκπομπές (π.χ. GSM, FM, TV) με σκοπό να εντοπιστούν πιθανοί στόχοι. Ένα σύστημα Παθητικού Ραντάρ δεν εκπέμπει, όμως μπορεί να ανιχνεύσει τις μεταβολές που προκαλούνται στην ηλεκτρομαγνητική δραστηριότητα της περιοχής από έναν στόχο, καθώς αυτός κινείται στην περιοχή αυτή.

2. ΚΙΝΗΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗΣ(RADAR)

Η Ελλάδα, αλλά και η Τουρκία χρησιμοποιούν για την καλύτερη επιτήρηση των συνόρων τους και κινητά συστήματα επιτήρησης-αναγνώρισης στις παράκτιες συνήθως περιοχές, για να καλύψουν τα κενά που δημιουργούνται από το παράκτιο χερσαίο ανάγλυφο τους, στα σταθερά κύρια συστήματα επιτήρησης. Η Ελλάδα χρησιμοποιεί το BOR-A-550 (Thales). Ένα ελαφρύ, φορητό ραντάρ επιτήρησης εδάφους ιδανικό για παράκτιες θέσεις και περιπολίες συνεπικουρούμενο από ένα δίκτυο 35 επίγειων και 27 θερμικών σταθμών της Ακτοφυλακής για επιτήρηση του θαλάσσιου χώρου του Αιγαίου. Η Τουρκία επικεντρώνεται τελευταία σε νέα AESA(Active Electronically Scanned Array) συστήματα, αλλά χρησιμοποιεί κυρίως το Kalkan II(Aselsan) και το μεγαλύτερης εμβέλειας TRS-22XX

2.1 BOR – A – 550

Γενικά



Εικόνα 1.

Ο Ελληνικός Στρατός το 2002, αναδιοργανώνοντας τις Μονάδες Επιτήρησης, εντάσσει σε αυτές, για να επιτηρεί το πεδίο μάχης, συστήματα από ραδιοεντοπιστές , τύπου BOR-A-550, από την εταιρεία THALES. Τα συστήματα αυτά εντάσσονται στις Μονάδες Διαβίβασεων που έχουν και την ευθύνη για την διεξαγωγή επιχειρήσεων όπως η ηλεκτρονική επιτήρηση και αναγνώριση. Το RADAR(RADio Detection And Ranging) τύπου BOR-A-550 (Εικόνες 1&2) είναι ένας Ραδιοεντοπιστής για Χερσαία και Παράκτια Επιτήρηση (GSR-Ground Surveillance Reconnaissance), που χρησιμοποιείται σε στρατιωτικές επιχειρήσεις για την επιτήρηση των χερσαίων συνόρων και των ακτών.

Συνδυάζοντας την επιτήρηση θάλασσας, εδάφους, και χαμηλά ιπτάμενων στόχων τους ταξινομεί αυτόματα κάτω από οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες, ημέρα και νύχτα [1].

Χαρακτηριστικά

Το BOR-A-550 είναι ραντάρ συνεχούς παλμού Doppler 2D με ενδείξεις για κινούμενους στόχους, το οποίο μπορεί να λειτουργήσει σε δύσκολες περιβαλλοντικές, καιρικές και επιχειρησιακές συνθήκες.

Χρησιμοποιείται σε ιστό, στο έδαφος, ή ενσωματώνεται και σε οχήματα.

Παρέχει δυνατότητα αυτόματου συναγερμού.

Επιτηρεί σε ακτίνα άνω των 40km .

Κάνει αυτόματη ταξινόμηση.

Παρακολουθήση κατά τη Σάρωση (Track While Scan-TWS) για πάνω από 40 στόχους.

Χρησιμοποιεί Windows NT και υποστηρίζει περιβάλλον GIS (Geographic Information Systems), TV image on-screen.

Τηλεχειρίζεται από Η/Υ (μέσω δικτύου Ethernet).

Είναι ένα αυτοδύναμο ολοκληρωμένο σύστημα επιτήρησης.

Είναι εύκολο στη μεταφορά και χρήση.



Εικόνα 2.

Μόλις εντοπιστεί κάποιος στόχος εμφανίζεται πάνω σε ηλεκτρονικό χάρτη με περιγραφή του. Ο Ελληνικός Στρατός διαθέτει 40 μονάδες πάνω σε Humvee για επιτήρηση των συνόρων.

Βασικές δυνατότητες

Τυπική σάρωση 8°/s

Δυνατότητες εντοπισμού:

Πεζός: 16km

Όχημα: 33km

Άρμα: 42km

Ελικόπτερο: 31km

Βάρκα: 19km

Σκάφος: 60km

Οι ραδιοεντοπιστές BOR-A-550 χρησιμοποιούνται για:

- Επιτήρηση – Αναγνώριση
- Συλλογή και Μετάδοση Πληροφοριών
- Υποστήριξη Πυρών Εκτίμηση Καταστροφών
- Υποστήριξη Επιχειρήσεων Έρευνας και Διάσωσης

Οι ραδιοεντοπιστές BOR-A-550 αποτελούνται από τα παρακάτω στοιχεία:

- Μονάδα Χειριστή.
- Μονάδα Επεξεργασίας Σήματος (SPU-Signal Processing Unit)
- Μονάδα Ραδιοσυχνότητας (RFU-Radio Frequency Unit) [1],[2].

2.2 TRS 22XX

Γενικά

Το TRS 22XX είναι ένα ραντάρ NATO Class I που διατίθεται σε σταθερή ή στατική διαμόρφωση και αναπτύχθηκε από την γαλλική Thompson και κατασκευάζεται στην Τουρκία. Πρόκειται για ένα σχετικά σύγχρονο (1997) 3D κινητό ραντάρ. Ο αριθμός των ραντάρ TRS-22XX(Εικόνα 3) που διαθέτει η Τουρκία είναι 14. Έχει μια ελαφρώς ενισχυμένη και βελτιωμένη ικανότητα ECCM ενάντια στην εχθρική ECM.

Ένα ηλεκτρονικό αντίμετρο (Electronic Countermeasures-ECM) είναι μια ηλεκτρική ή ηλεκτρονική συσκευή που έχει σχεδιαστεί για να ξεγελάσει ή να εξαπατά τα ραντάρ, το ηχοσύστημα ή άλλα συστήματα ανίχνευσης, όπως τα υπέρυθρα (IR) ή τα λέιζερ. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο προσβλητικά όσο και αμυντικά για να στερήσει από τον εχθρό πληροφορίες στόχευσης.

Ένα ηλεκτρονικό αντι-αντίμετρο (Electronic Counter-Countermeasures-ECCM) είναι η μέθοδος με την οποία προσπαθείτε να καταπολεμήσετε τα συστήματα ECM του εχθρού, είτε κάνοντας τον εξοπλισμό σας ανθεκτικό στην ECM είτε χρησιμοποιώντας τεχνικές για να ακυρώσετε τα συστήματα εμπλοκής ή/και αποτυχίας του. Είναι ένας εξαιρετικά ευαίσθητος τομέας στο μέτρο που κάθε αποκάλυψη των μέτρων ECCM που έχουν σχεδιαστεί σε ένα σύστημα είναι πιθανό να ενημερώσει τον εχθρό για την ευπάθεια του στην ECM.

Κινητά ραντάρ TRS-22XX στα παράλια της Μ. Ασίας (με κατεύθυνση B-N):

- Τιμβρος.
- Edremit.
- Karaburun.
- Σμύρνη.
- Gazemir.
- Datca.
- Προφήτης Ηλίας (Κύπρος).
- Υπάρχουν κι άλλα 3 κινητά ραντάρ, αλλά βρίσκονται πιο ανατολικά από τα παράλια της Μ.Ασίας. (Cukurkoy, Eregit, Karaman).



Εικόνα 3.

Πρέπει να σημειωθεί ότι σε μια Ελληνοτουρκική σύγκρουση, όλα τα TRS-22XX μπορούν να προωθηθούν στα παράλια της Μ. Ασίας, για να συμπληρώσουν ή και να αντικαταστήσουν τα ήδη εκεί υπάρχοντα.

Χαρακτηριστικά TRS 22XX:

Antenna dimensions	6x4.5m
Range	on 2 sq m target 459km
Ceiling (max height)	30,000 m
Frequency	E/F-Band
Bandwidth	15%
Rotation rate	6 rpm
Azimuth aperture	1.2°
Elevation aperture	1.6°
Peak power	700 kW
Mean power	20 kW
Elevation coverage	20°

[3]

3. ΤΟ ΠΑΘΗΤΙΚΟ PANTAP (PASSIVE RADAR)

3.1. Ιστορική αναδρομή

Η ανάπτυξη των παθητικών ραντάρ έχει εξελιχθεί από μια στρατηγική ανάγκη για τη διάσωση της ανωνυμίας στη στρατιωτική ανίχνευση σε έναν ευρύ τομέα εφαρμογών σε πολιτικές, εμπορικές και ερευνητικές περιοχές. Καθώς η τεχνολογία συνεχώς εξελίσσεται, η χρήση αυτών των συστημάτων αναμένεται να αυξηθεί και να γίνει ακόμη πιο ενσωματωμένη με άλλες σύγχρονες τεχνολογίες.

3.1.1. Πρώιμη Ανάπτυξη (1935-1950)

Οι πρώτες προσπάθειες στον τομέα των παθητικών συστημάτων ανίχνευσης ξεκίνησαν τη δεκαετία του 1940, κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, με τα ενεργά ραντάρ να χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση αεροσκαφών και πλοίων [4],[5]. Η ανάγκη για συστήματα που δεν θα εντόπιζαν εύκολα τον χρήστη τους ώθησε στην ανάπτυξη της παθητικής τεχνολογίας. Η ιστορία των παθητικών ραντάρ με στόχο να εντοπίζει αεροσκάφη αρχίζει το 1935, από τους Arnold Wikings και Sir Robert Watson Watt οι οποίοι πραγματοποίησαν στο Ηνωμένο Βασίλειο το πείραμα του Daventry , για την ανίχνευση ενός βομβαρδιστικού τύπου Handley Page Heyford, σε 8km απόσταση, με τη χρήση εκπομπών από ένα σταθμό βραχέων κυμάτων του BBC που βρισκόταν σε απόσταση 6 μιλίων. Το Heyford πετούσε στη διαδρομή από το Weedon προς το σταθμό του BBC στο Daventry. [6],[27].

Στην αρχή, τα παθητικά ραντάρ δεν ήταν σε θέση να προσφέρουν πλήρη ανίχνευση των στόχων με τον τρόπο που τα ενεργά ραντάρ το κάνουν, καθώς είχαν εξάρτηση από τις εκπομπές άλλων πηγών και είχαν περιορισμένη ακρίβεια. Οι έρευνες όμως συνεχίστηκαν και οι δυνατότητες να «ακούν», χωρίς την εκπομπή σημάτων έγιναν κατανοητές. Από το 1950 και μετά τα διστατικά ραντάρ άρχισαν να επανεξετάζονται, με την ανακάλυψη κάποιων ενδιαφερουσών ιδιοτήτων της σκεδαζόμενης ενέργειας στα ραντάρ [7]. Από τον Siegel πρώτη φορά, το 1955, χρησιμοποιήθηκε ο όρος διστατικό σε μια από τις αναφορές του όπου περιγράφονταν αυτές οι ιδιότητες .

3.1.2. Πρώτη Χρήση Παθητικών Ραντάρ (1960-1970)

Κατά τη διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου, οι στρατιωτικοί επιθυμούσαν να βρουν νέους τρόπους για ανίχνευση των αεροσκαφών χωρίς να γίνεται εκπομπή σημάτων, ώστε να αποφεύγεται η ανίχνευση από τα εχθρικά ραντάρ.

Από τα πολυπλοκότερα και μεγαλύτερα συστήματα παθητικών ραντάρ ήταν το RX12874, που ονομάστηκε Winkle από τους Βρετανούς και αναπτύχθηκε από τις αρχές του 1960, για να αντισταθμιστεί η λειτουργία του Carcinotron, ενός πανίσχυρου ραντάρ παρασίτων που φαινόταν να αχρηστεύει όλα τα ραντάρ μεγάλου εύρους.

Σε αυτό το πλαίσιο, αναπτύχθηκαν τα πρώτα συστήματα παθητικού ραντάρ που χρησιμοποίησαν ραδιοφωνικούς σταθμούς ή τηλεοπτικούς πομπούς ως πηγές για εκπομπή. Αυτά τα συστήματα είχαν περιορισμένη απόδοση λόγω του θορύβου και των περιορισμένων συχνοτήτων, αλλά άνοιξαν το δρόμο για περαιτέρω έρευνα [27].

3.1.3. Εξελίξεις και Βελτιώσεις (1980-1990)

Η δεκαετία του 1980 έφερε μεγαλύτερη ανάπτυξη των παθητικών ραντάρ, ιδιαίτερα λόγω των βελτιώσεων στην ψηφιακή επεξεργασία σήματος. Οι τεχνολογίες όπως η επεξεργασία σήματος, η ανάλυση φάσματος και οι αλγόριθμοι για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών από το θόρυβο, επέτρεψαν την ανίχνευση στόχων σε μεγαλύτερες αποστάσεις και με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Το 1980, η ανάπτυξη της φθηνής υπολογιστικής ισχύος και της ψηφιακής τεχνολογίας στους δέκτες, οδήγησε στην αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος για την τεχνολογία των παθητικών ραντάρ.

Επιπλέον, η πρόοδος στη χρήση διαφορετικών συχνοτήτων και η δυνατότητα αξιοποίησης νέων πηγών εκπομπής, όπως οι κινητές τηλεπικοινωνιακές υποδομές, συνέβαλαν στην ανάπτυξη πιο αξιόπιστων συστημάτων παθητικού ραντάρ.

Στην αρχή της δεκαετίας του 1990, έχουμε εκ νέου αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος για τα παθητικά ραντάρ, λόγω της πρόσβασης σε φθηνούς μετατροπείς σημάτων από αναλογικά σε ψηφιακά, με υψηλό ρυθμό δειγματοληψίας και δυναμικό εύρος ανάλυσης για την μετατοπισμένη ανάκλαση Doppler των οπτικοακουστικών φερόντων των σημάτων αναλογικής τηλεόρασης [6].

3.1.4. Σύγχρονη Εποχή (2000-Σήμερα)

Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία των παθητικών ραντάρ έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο, κυρίως λόγω των εξελίξεων στην ψηφιακή τεχνολογία, την επεξεργασία σήματος και την ενσωμάτωση των παθητικών συστημάτων σε νέες στρατηγικές και εφαρμογές.

Αξιοσημείωτα παραδείγματα παθητικών ραντάρ είναι το ιταλικό AULOS Passive Covert Location Radar της Leonardo [8] που παρουσιάστηκε το 2012, καθώς και το αντίστοιχο γερμανικό της Cassidian του ομίλου EADS, τα οποία μπορούν να εκμεταλλευτούν τις εκπομπές της ραδιοφωνίας (FM και DAB - Digital Audio Broadcasting) και της τηλεόρασης (DVB-T Digital Video Broadcasting-Terrestrial) με εμβέλεια 360km [9]. Άξιο αναφοράς είναι και το ελληνικό HEMPAS (Hellenic Multitarget Passive System) που παρουσιάζεται το 2006, με δυνατότητες για αποκάλυψη ιπτάμενου στόχου (Ελικοπτέρων και αεροσκαφών Stealth από τη στιγμή της απογείωσης σε απόσταση 400km), παρόλο που η προσπάθεια αυτή δεν προχώρησε [6],[18],[27].

3.2. Σύγκριση παθητικού ραντάρ με τα συμβατικά ραντάρ

Τα πλεονεκτήματα ενός παθητικού ραντάρ όταν συγκρίνεται με τα συμβατικά (μονοστατικά, ενεργητικά, σε συνηθισμένες μπάντες) ραντάρ είναι τα εξής: [37]

- Αποκαλύπτει με μεγάλες πιθανότητες στόχους Stealth, καθώς είναι βασισμένο σε εκπομπές με χαμηλές συχνότητες (σε σχέση με τα συνηθισμένα ραντάρ αεράμυνας), ενώ είναι και πολυστατικό. Επισημαίνουμε ότι τα αεροσκάφη τύπου Stealth είναι σχεδιασμένα με στόχο να αποκρύπτονται από ένα συμβατικό μονοστατικό ραντάρ, το οποίο λειτουργεί σε X-Band (8–12GHz) [27].

- Παρέχει συγκεκριμένη παρακολούθηση και ανίχνευση.

- Μπορεί να δεχτεί πολύ δύσκολα παρεμβολές.

- Έχει πολύ χαμηλό κόστος λειτουργίας και προμήθειας, καθώς δεν έχει πομπό, που καταναλώνει μεγάλη ισχύ, ενώ είναι συνήθως βασισμένο σε μια μικροκυματική Λυχνία Οδεύοντος Κύματος (TWT-Traveling Wave Tube), με μεγάλο κόστος για την αντικατάστασή της.

- Παρέχεται η δυνατότητα για τοποθέτηση του χωρίς περιορισμούς και χωρίς να απαιτείται άδεια λειτουργίας (πολύ σημαντικό για περιοχές κορεσμένες, όπως τα πολιτικά αεροδρόμια, στα οποία έχουμε μεγάλο πλήθος διαφορετικών εκπομπών).

- Δεν απειλείται από όπλα αντιραντάρ (Anti-Radiation Missile),

όπως το μη επανδρωμένο επιθετικό όχημα HARPY της IAI (Israel Aerospace Industries) ή ο πύραυλος AGM-88 HARM της Raytheon. Επιπλέον επειδή δεν έχει πομπό, ο οποίος λόγω των στοιχείων ισχύος (είτε τρανζίστορ, είτε λυχνίας) παράγει θερμότητα, έχει χαμηλό θερμικό ίχνος, οπότε είναι δύσκολη η στοχοποίηση του και με ηλεκτροπτικά μέσα.

Η κατασκευή ενός παθητικού ραντάρ αναμφισβήτητα έχει πολλές δυσκολίες, αφού γίνεται προσπάθεια για εκμετάλλευση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μη συνεργαζόμενες πηγές, που οι εκπομπές τους είναι άγνωστες και δύσκολα μπορούν να εκμεταλλευτούν. Είναι μια προσπάθεια για την επίλυση πολλών επιμέρους προβλημάτων που προέρχονται από την ανυπαρξία συνεργαζόμενου πομπού μέσα στο ίδιο σύστημα.

Τα παθητικά ραντάρ παρουσιάζουν και τους ακόλουθους περιορισμούς – μειονεκτήματα:[10]

- Παρέχει επόπτευση περιορισμένου ύψους, καθώς σε μεγάλο ύψος δεν υπάρχει αρκετή ακτινοβολία .
- Τα προβλήματα συγχρονισμού στους δέκτες του.
- Η γεωμετρία του χώρου και οι υφιστάμενες εκπομπές καθορίζουν την αποτελεσματικότητά του.
- Εξαρτάται από εκπομπό μη συνεργαζόμενο.
- Παρουσιάζονται ιδιαίτερες δυσκολίες στη μέτρηση του ύψους του στόχου.
- Παρουσιάζει πολύ μεγάλη πολυπλοκότητα στους αλγορίθμους του, οπότε απαιτείται μεγάλη επεξεργαστική ισχύς.

Επιπλέον έχει Λειτουργικά Πλεονεκτήματα που μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα:[10]

Το κυριότερο στοιχείο στα σκάφη Stealth είναι ο κατάλληλος σχεδιασμός, ώστε όταν ένα ραντάρ τα «φωτίζει», η ακτινοβολία που προσπίπτει να ανακλάται σε διαφορετικές κατευθύνσεις κυρίως και όχι προς τα πίσω. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται στα συνηθισμένα μονοστατικά ραντάρ, όπου η κεραία λήψης συμπίπτει με την κεραία εκπομπής. Στα πολυστατικά παθητικά ραντάρ, όπου οι κεραίες για εκπομπή και λήψη είναι σε διαφορετικές θέσεις, επιτυγχάνεται υπό συνθήκες η κατάλληλη γεωμετρία που ευνοεί την ανίχνευση ενός στόχου.

Επιπρόσθετα, καθώς οι συχνότητες που εκμεταλλεύεται το υπόψιν ραντάρ είναι αρκετά χαμηλές, τα αντίστοιχα μήκη κύματος συγκρίνονται με τα διάφορα τμήματα του στόχου, οπότε εμφανίζεται το φαινόμενο του συντονισμού, και ενεργοποιούνται τρόποι σκέδασης της ακτινοβολίας αυξάνοντας το ίχνος ραντάρ για το στόχο.

Τα υλικά επίστρωσης για την απορρόφηση της ακτινοβολίας (Radar Absorbent Materials – RAM) στις χαμηλές συχνότητες, είναι πολύ λιγότερο αποτελεσματικά. Διαπιστώνουμε, επομένως, ότι είναι πολύ δύσκολη η απόκρυψη ενός στόχου από ένα παθητικό ραντάρ .

Παράλληλα, ένα σύγχρονο σύστημα για αυτοπροστασία μπορεί να ανιχνεύσει κάθε είδους εκπομπή ραντάρ στη μεγάλη μπάνα συχνοτήτων, οπότε και προειδοποιεί καταρχήν τον χειριστή για πιθανολογούμενη παρακολούθηση από τα εχθρικά ραντάρ, ενώ προτείνει και την εφαρμογή κατάλληλων τεχνικών παραπλάνησης (decoy) ή παρεμβολής (jamming) .

Επιπρόσθετα, απειλείται από όπλα αντιραντάρ (Anti-Radiation Missile), τα οποία εγκλωβίζουν τις πηγές ακτινοβολίας και κατευθύνονται εναντίον τους.

4. Το Παθητικό Διστατικό Radar (Passive Bistatic Radar-PBR)

4.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία Παθητικού Διστατικού RADAR (PBR) είναι ενδιαφέρουσα για πολλούς κλάδους και οργανισμούς, καθώς προσφέρει με χαμηλότερη ανάγκη ισχύος, πιο συγκαλυμμένη ικανότητα παρακολούθησης σε σύγκριση με την ενεργή τεχνολογία RADAR. Το παθητικό RADAR επιτρέπει στους χειριστές να εντοπίζουν, να μετρούν και να παρακολουθούν στόχους χωρίς να μεταδίδουν ένα πρωτεύον σήμα. Το παθητικό ραντάρ δεν αναμεταδίδει. Αντιθέτως, χρησιμοποιεί άλλα σήματα, κυρίως ραδιοτηλεοπτικά, τα οποία συνήθως ονομάζονται «πομποί ευκαιρίας» (IoO-Illuminators of Opportunity). Το ενδιαφέρον για το παθητικό ραντάρ αυξήθηκε πρόσφατα καθώς ο αριθμός των πομπών αυξάνεται, ο αριθμός των τύπων ψηφιακών σημάτων αυξάνεται και υπάρχει πίεση για βελτιστοποίηση του κόστους των συστημάτων RADAR. Καθιερώθηκε ως στόχος, η δημιουργία οικονομικά προσιτής και ευέλικτης επίδειξης PBR και μιας δοκιμαστικής πλατφόρμας η οποία αρχικά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την επίδειξη της τεχνολογίας PBR με DVB-T - Digital Video Broadcasting - Terrestrial και UMTS-Universal Mobile Telecommunication System[11].

Μια παθητική αρχιτεκτονική RADAR εγγυάται συνεχή επιτήρηση χωρίς τη χρήση πομπών, ελαχιστοποιώντας έτσι το κόστος και την κατανάλωση ενέργειας. Η εφαρμογή ενός PBR που έχει καθοριστεί από το λογισμικό επιτρέπει υψηλό επίπεδο ευελιξίας και επιτρέπει στην ομάδα να προσαρμόζεται σε μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα και απαιτήσεις. Τα πλεονεκτήματα αυτού του συστήματος υποδεικνύουν τη δυνατότητα χρήσης παθητικών ραντάρ σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως η εθνική ασφάλεια, η επίγεια παρακολούθηση και το σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης για την ανίχνευση οχημάτων.

4.2 Παθητική επισκόπηση RADAR



Εικόνα 4.

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται μια **Γεωμετρία σεναρίου πειράματος DVB-T**. Ο δέκτης βρίσκεται στο Ινστιτούτο CSSN-ITE G. Vallauri, ο εκμεταλλευόμενος πομπός DVB-T είναι τοποθετημένος στο "Monte Serra" (περίπου 32km μακριά από τον δέκτη) και η κεραία επιτήρησης κατευθύνεται προς την περιοχή της θάλασσας μπροστά από τη θέση του δέκτη.



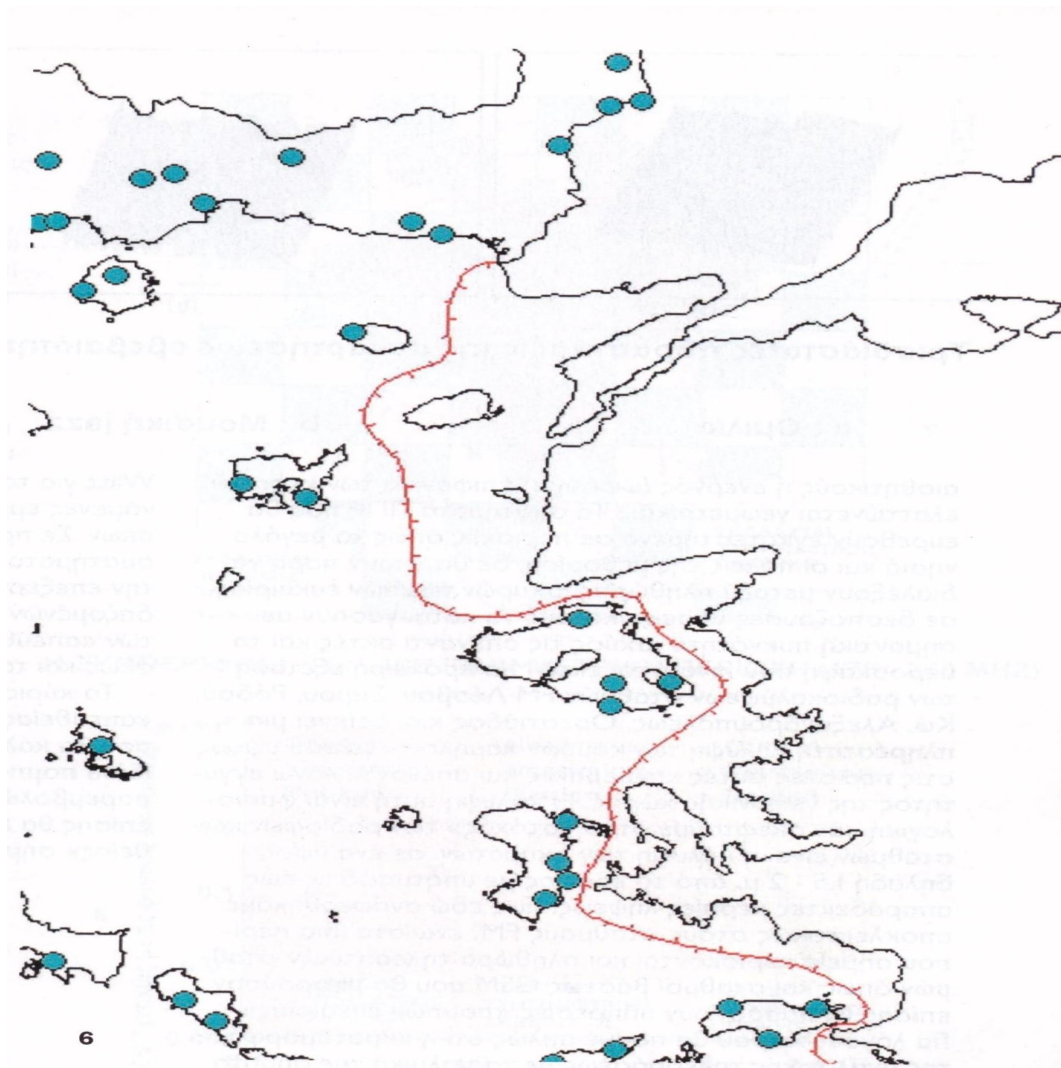
Εικόνα 5.

Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται μια πειραματική διάταξη χρησιμοποιώντας **UMTS**. Ο δέκτης τοποθετήθηκε στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής του Πανεπιστημίου της Pisa. Το μήκος γραμμής βάσης (απόσταση μεταδότη-δέκτη) είναι περίπου 114m. Το κανάλι κατερχόμενη ζεύξης UMTS λειτουργεί στα 2.1GHz. Τα αυτοκίνητα και τα φορτηγά που ταξιδεύουν σε δρόμο κοντά στο Τμήμα (περίπου 250m από τον παραλήπτη) θεωρήθηκαν στόχοι ενδιαφέροντος.

Ένας δέκτης PBR χρησιμοποιεί γενικά δύο κανάλια λήψης που δηλώνονται ως κανάλι αναφοράς και κανάλι παρακολούθησης-στόχου. Το κανάλι αναφοράς χρησιμοποιείται για τη λήψη του άμεσου σήματος από τον πομπό και παρέχει ένα σήμα αναφοράς για σύγκριση με την επιστροφή από τον στόχο. Τα PBR βασισμένα σε αναλογικά σήματα εμφανίζουν απόδοση ανίχνευσης που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το περιεχόμενο του σήματος. Με άλλα λόγια οι φασματικές ιδιότητες των σημάτων, καθώς και οι μεταδιδόμενες δυνάμεις, συνδέονται σε μεγάλο βαθμό με τον τύπο της μεταδιδόμενης πληροφορίας. Αντίθετα, οι ψηφιακές κυματομορφές, χάρη στην ειδική κωδικοποίηση σήματος, έχουν φασματικές ιδιότητες ανεξάρτητες από το περιεχόμενο του σήματος. Μεταξύ των ψηφιακών IoO, θα επικεντρωθούμε σε σήματα UMTS επιτρέπουν τη μετάδοση ήχου και εικόνας σε πραγματικό χρόνο με πολύ υψηλή ταχύτητα) και DVB-T(είναι το πρότυπο μετάδοσης που καθορίζει τη δομή των πακέτων, την κωδικοποίηση του καναλιού και τη διαμόρφωση του ψηφιακού σήματος), τα οποία παρουσιάζουν ευρύ εύρος ζώνης και παρέχουν καλή χωρική ανάλυση [11].

4.3 Στρατιωτική εφαρμογή παθητικού ραντάρ

Οι εκπομπές που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν από ένα παθητικό ραντάρ («πομποί ευκαιρίας» - IoO) αφθονούν στον τόπο μας και ιδιαίτερα η λεγόμενη «ελεύθερη ραδιοφωνία» και οι πανταχού παρόντες υψηλής ισχύος και κατάλληλου μήκους κύματος (~3m) πομποί FM. Στην Ελλάδα οι εκπομπές ραδιοφωνίας FM γίνονται στη ζώνη 87.5-108MHz. Η διαμόρφωση είναι FM(Frequency Modulation) ευρείας ζώνης(+75KHz σε αντίθεση με την Narrow Band FM των επικοινωνιών VHF-UHF στενής ζώνης +2.5, +6 ή +7.5KHz). Στην Ελλάδα οι πομποί είναι τοποθετημένοι σε ψηλά σημεία για να υπερκεράζεται το έντονο ανάγλυφο και η εκπομπή στο οριζόντιο επίπεδο είναι παγκατευθυντική(omni). Η Ενεργός Ακτινοβολούμενη Ισχύς(ERP-Effective Radiated Power) μπορεί να φτάσει τα 50KW ή παραπάνω ειδικά για πομπούς που εξυπηρετούν μεγάλες πόλεις και ειδικά για την άναρχη κατάσταση που επικρατεί στην ραδιοφωνία-τηλεόραση στην χώρα μας. Αυτό οφείλεται εν μέρει στην πυκνή δόμηση και την ισχυρή απόσβεση σημάτων, στην ανυπαρξία διαχείρισης φάσματος και την επικάλυψη-παρεμβολή σταθμών, αλλά και στις περιορισμένες επιδόσεις των δεκτών FM ειδικά για τα αυτοκίνητα όπου για λόγους αισθητικούς η ωφέλιμη επιφάνεια των κεραιών ελαττώνεται γεωμετρικά. Τα PBR που θα βρεθούν εγκατεστημένα στα μεγάλα νησιά και στις πόλεις της παραμεθορίου θα έχουν να διαλέξουν από μια πληθώρα ισχυρών «πομπών ευκαιρίας» σε δεσπόζουσες θέσεις ικανούς να καταυγάσουν με σημαντική πυκνότητα ισχύος τις απέναντι ακτές και τα σκάφη που κινούνται εκεί.



Εικόνα 6.

Μια πρόχειρη εξέταση των ραδιοκαλύψεων σταθμών FM Λέσβου, Σάμου, Ρόδου, Κω, Αλεξανδρούπολης, Ορεστιάδας, κ.α. (Εικόνα 6) δείχνει την πληρέστατη κάλυψη των τομέων χαμηλού-μέσου ύψους στις περιοχές αυτές και βέβαια και απέναντι, λόγω εγγύτητας της γειτονικής χώρας. Η κάλυψη αυτή είναι φυσιολογική αν σκεφτούμε ότι ο «στόχος» των ραδιοφωνικών σταθμών είναι τα οχήματα με ύψος 1.5-2m από το έδαφος, με υποτυπώδεις μέχρι απαράδεκτες κεραίες λήψεως. Η κυματομορφή της αναλογικής τηλεόρασης δεν προσφέρεται για επεξεργασία στο PBR, αντίθετα το ψηφιακό τηλεοπτικό σήμα DVB-T και οι σταθμοί βάσης GSM προσφέρονται από άποψη κυματομορφής, αλλά πρέπει να λυθεί με ενίσχυση στην επεξεργασία του, η χαμηλή του ισχύς ERP που περιορίζει την εμβέλεια του ραντάρ. Το κύριο πρόβλημα της απόρριψης στον δέκτη του «απευθείας» σήματος του πομπού ευκαιρίας που θα κάλυπτε το επιθυμητό ανακλώμενο σήμα του ίδιου πομπού, μπορεί να λυθεί με την χωροταξική μέθοδο απομονώσεως. Αυτή υλοποιείται με την τοποθέτηση του δέκτη ανάμεσα στον πομπό και στην επιτηρούμενη περιοχή, έτσι ώστε ο πομπός να «βλέπει» την περιοχή αυτή «πάνω από τον ώμο» του δέκτη. Για παράδειγμα με «πομπό ευκαιρίας» στον Όλυμπο της Λέσβου, οι δέκτες θα μπορούσαν να εγκατασταθούν σε θέσεις όπως του Πλωμάρι, η Αγριλιά, η Συκαμιά όπου δεν υπάρχει οπτική επαφή με τον πομπό, αλλά εξασφαλίζεται ικανή οπτική επαφή με τις περιοχές ενδιαφέροντος ανατολικά.

Το PBR διαθέτει μετρήσεις συγκρίσιμες με τα συμβατικά ραντάρ. Η ανάλυση σε απόσταση και αζιμούθιο είναι 10 φορές χειρότερη από τα συμβατικά όμως το Doppler είναι

2-3 φορές καλύτερο [12].



Εικόνα 7.

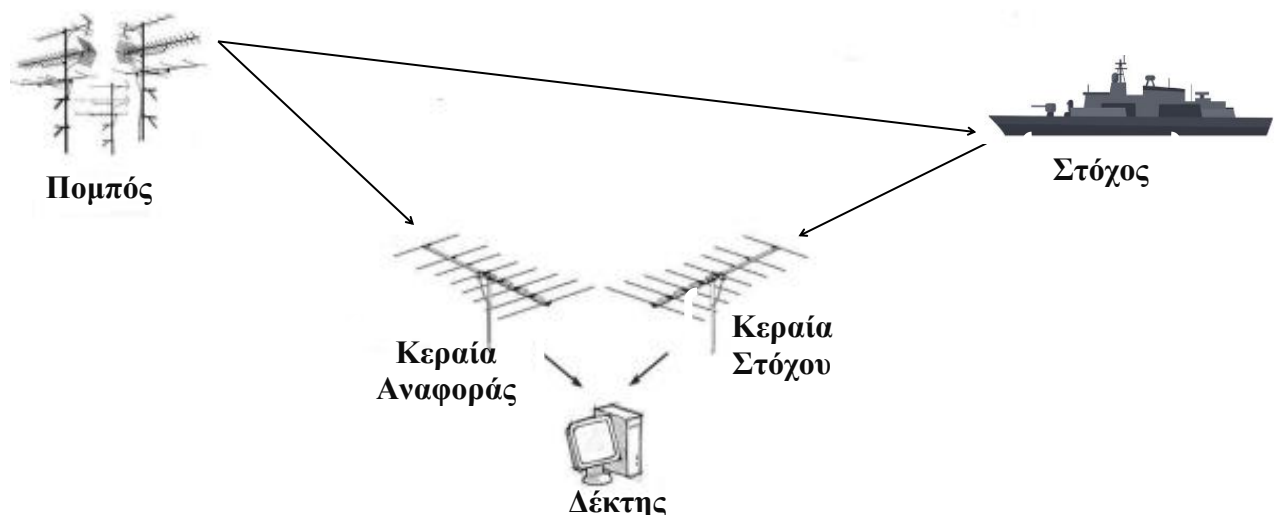
Η εξαιρετική αυτή επίδοση ενός pulse Doppler επιτρέπει διακριτική ικανότητα(ανάλυση) ανάλογη με τα συμβατικά ραντάρ και αν χρησιμοποιηθεί δίκτυο PBR ξεπερνά και την προσδοκώμενη από τα συμβατικά. Έτσι το ραδιοεντοπιζόμενο αποτύπωμα (Radar Cross Section - RCS) των Stealth στόχων μεγέθους συγκρίσιμο με μια μπάλα του baseball για διστατικές γωνίες των PBR μεγαλύτερες των 90° δίνει στο ραντάρ ενεργό διατομή ικανή να αποκαλύψει τον Stealth στόχο. Στον τομέα αυτό η γεωγραφία του Αρχιπελάγους είναι αμείλικτη για την Τουρκία. Ο εναέριος και θαλάσσιος χώρος της «εγκλωβίζεται» από μια πλειάδα νησιών και για κάθε πιθανή κατεύθυνση εισβολής υπάρχει και η αντίστοιχη διστατική γωνία με πλήθος «ευκαιριακών» πομπών. Έτσι δημιουργείται ένα Stealth τείχος εγκαίρου προειδοποίησης που «σιωπηλό» περιμένει τους εισβολείς, ένας «ηλεκτρονικός φράκτης» που χωρίς να υποκαθιστά συμπληρώνει το σύστημα Ηλεκτρονικού Πολέμου (Electronic Warfare-EW) της χώρας. Εξάλλου τα βουνά της χερσονήσου του Τσεσμέ δημιουργούν σοβαρό πρόβλημα στην επιτήρηση από τα συμβατικά ραντάρ Λέσβου και Σάμου, πράγμα που δίνει μεγαλύτερη αξία στον φράκτη των PBR (Εικόνα 7).

5. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Η κατασκευή ενός συστήματος παθητικού ραντάρ έχει δυσκολίες, αφού γίνεται προσπάθεια για εκμετάλλευση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας η οποία προέρχεται από πηγές μη συνεργαζόμενες, με άγνωστες εκπομπές που είναι εκμεταλλεύσιμες δύσκολα. Το γεγονός ότι δεν υπάρχει συνεργαζόμενος πομπός στο ίδιο σύστημα, απαιτεί μεγάλη προσπάθεια για την επίλυση πολλών επιμέρους προβλημάτων που προέρχονται από αυτό. Στην εργασία αυτή θα επιχειρήσουμε να μελετήσουμε πως θα επιλυθούν τα προβλήματα αυτά.

5.1 Τοποθέτηση κεραιών

Ας υποθέσουμε ότι υπάρχουν δύο τουλάχιστον κεραιές, από τις οποίες η μια στρέφεται προς



Εικόνα 8.

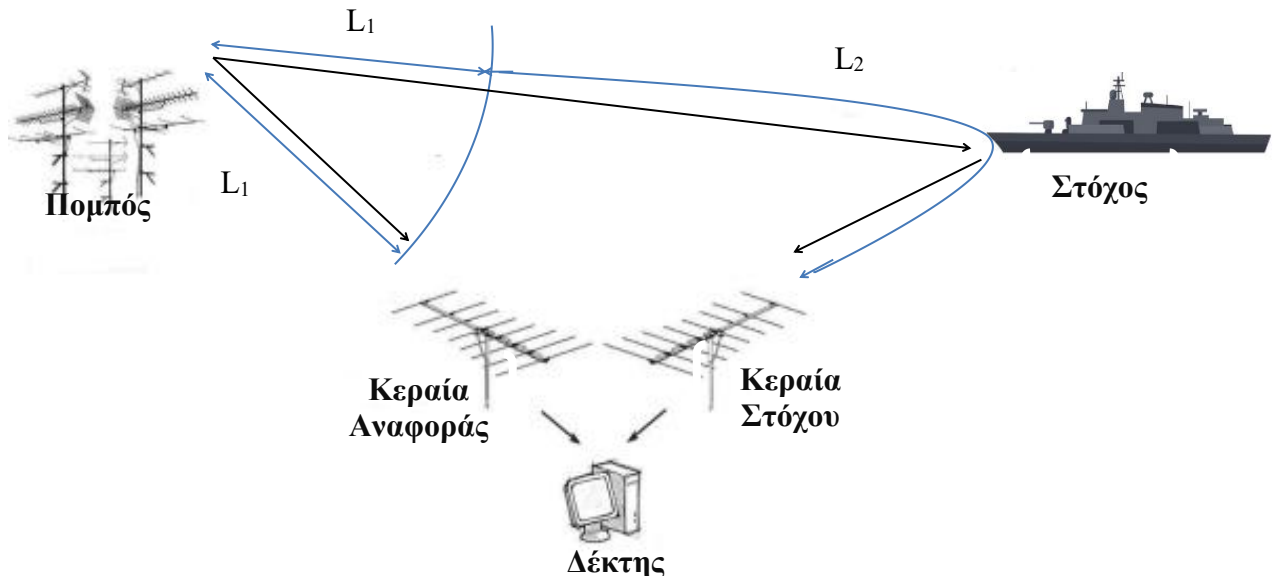
την πηγή της ακτινοβολίας, ενώ η άλλη στρέφεται προς την περιοχή που είναι πιθανό να εμφανιστεί ένας στόχος (αρχικά δεν εξετάζουμε την σάρωση). Από την πρώτη κεραία λαμβάνεται η ακτινοβολία που εκπέμπεται σταθερά στον χώρο και έχει προορισμό τις μη συνεργαζόμενες με το ραντάρ εφαρμογές, π.χ. το σήμα FM του ραδιοφώνου. Η κεραία αυτή τοποθετείται σε τέτοια θέση, ώστε να λαμβάνεται η ακτινοβολία από την κεραία που την εκπέμπει άμεσα. Αυτό το σήμα θα αποτελεί το σήμα αναφοράς και εφεξής η πρώτη κεραία θα ονομάζεται *κεραία αναφοράς*, ενώ η δεύτερη θα ονομάζεται *κεραία στόχου* [13],[28].

Η λειτουργία της κεραίας στόχου, είναι να λαμβάνει τα σήματα που προέρχονται από την αλληλεπίδραση του στόχου με την ακτινοβολία που παρακολουθεί η κεραία αναφοράς, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 8. Δεν χρησιμοποιείται απαραίτητα μόνο μία κεραία στόχου, αντίθετα το σύστημα έχει μεγαλύτερη ακρίβεια όταν χρησιμοποιούνται περισσότερες. Εν συνεχεία γίνεται επεξεργασία και σύγκριση στις λήψεις από όλες τις κεραιές με στόχο την εξαχθούν πληροφορίες για πιθανό στόχο [14].

5.2 Για τον υπολογισμό της θέσης του στόχου

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να ανιχνευτεί και να υπολογιστεί η θέση του στόχου εξαρτώνται κυρίως από τη γεωμορφολογία του περιβάλλοντος και τη γεωμετρία του

συστήματος. Αξιοποιούνται συνήθως η *χρονική απόκλιση* που θα παρατηρηθεί μεταξύ των σημάτων που λαμβάνονται από τους δέκτες του διστατικού παθητικού ραντάρ. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι το σήμα που λαμβάνει ο κάθε δέκτης διανύει διαφορετική απόσταση μέχρι να το λάβει, οι υπολογισμοί για την χρονική καθυστέρηση ανάμεσα στα ληφθέντα σήματα μπορούν να αξιοποιηθούν για να



Εικόνα 9.

εκτιμηθεί η θέση του στόχου. Ο δέκτης του παθητικού ραντάρ τοποθετείται σε γεωγραφικό σημείο με γνωστή απόσταση από τον πομπό της ακτινοβολίας που αξιοποιούμε. Αν η απόσταση της κεραίας

αναφοράς από την πηγή ακτινοβολίας είναι L_1 και από την επεξεργασία των σημάτων που λαμβάνονται προκύπτει χρονική διαφορά που αντιστοιχεί στην απόσταση L_2 , τότε το άθροισμα $L_1 + L_2$ είναι ίσο με την απόσταση που διανύει το σήμα του στόχου συνολικά (όπως φαίνεται και στην Εικόνα 9). Από αυτή την πληροφορία συμπεραίνουμε ότι ο στόχος βρίσκεται σε ένα σημείο μιας έλλειψης, που είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων του επιπέδου για τα οποία το άθροισμα των αποστάσεων τους από δύο σταθερά σημεία (εστίες) είναι σταθερό. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι το άθροισμα των αποστάσεων της πηγής της ακτινοβολίας και της κεραίας στόχου από τον στόχο είναι γνωστή και ίση με $L_1 + L_2$.

Επομένως, είναι γνωστό ότι το σημείο που βρίσκεται ο στόχος είναι το σημείο μιας έλλειψης, που έχει εστίες την κεραία στόχου και την πηγή της ακτινοβολίας [15].

Χρησιμοποιούμε την μέτρηση για τη χρονική διαφοροποίηση του στόχου και των σημάτων αναφοράς που αντιστοιχεί στη διαφορά της απόστασης και την πληροφορία αυτή στη συνέχεια την συνδυάζουμε με τον γεωμετρικό τόπο της έλλειψης.

Όταν χρησιμοποιούμε πολλές κεραίες στόχου, προκύπτει για τη n -στή κεραία, ότι ο στόχος που θα εντοπίσει είναι το σημείο μιας καμπύλης που έχει την παρακάτω εξίσωση [16]

$$\frac{[x \cdot \cos \varphi + y \sin \varphi - (-\gamma_1 + \gamma_n)]^2}{\left(\frac{L_1 + c \cdot \Delta t_n}{2}\right)^2} + \frac{(-x \cdot \sin \varphi + y \cdot \cos \varphi)^2}{\left(\frac{L_1 + c \cdot \Delta t_n}{2}\right)^2 - \left(\frac{\gamma_n}{2}\right)^2} = 1$$

όπου:

r_1 : η απόσταση της πηγής ακτινοβολίας από την πρώτη κεραία στόχου,

r_n : η απόσταση της πηγής ακτινοβολίας από την n -στή κεραία στόχου,

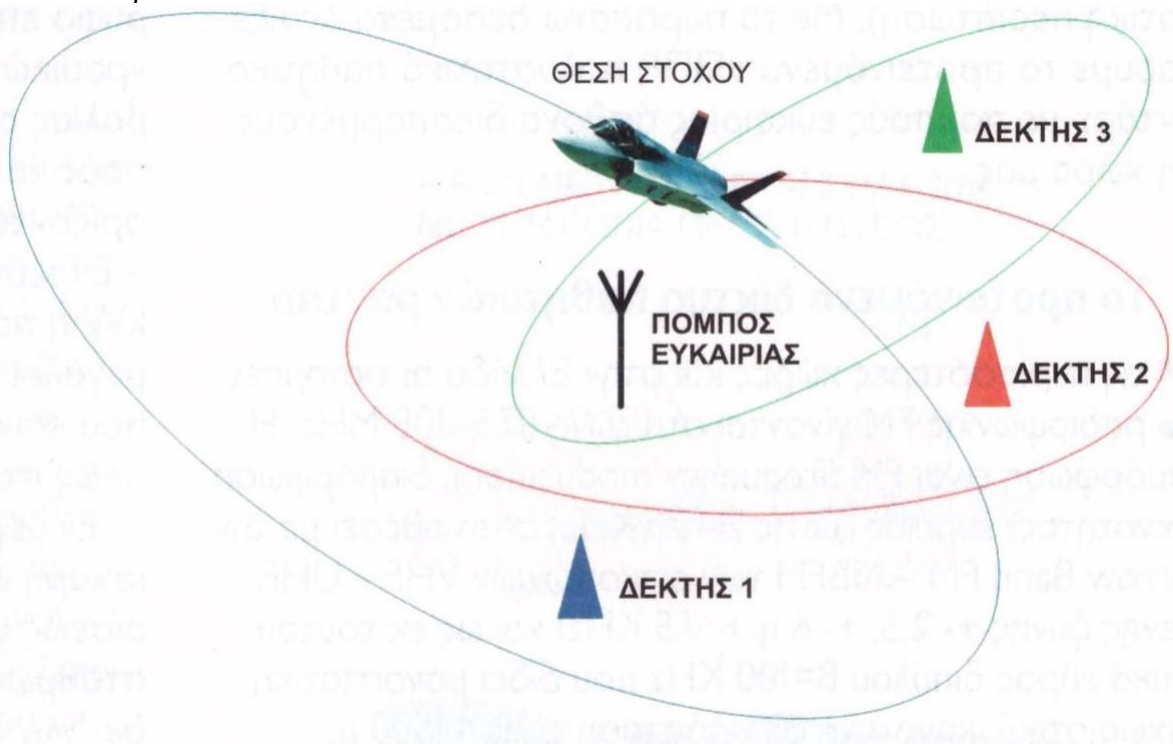
L_1 : η απόσταση της πηγής ακτινοβολίας που αξιοποιούμε από την κεραία αναφοράς

φ : η γωνία υπό την οποία «φαίνεται» η πρώτη και η n -στή κεραία στόχου από την πηγή της ακτινοβολίας.

Δt_n : η χρονική καθυστέρηση που έχει το n -στό σήμα στόχου από το σήμα αναφοράς.

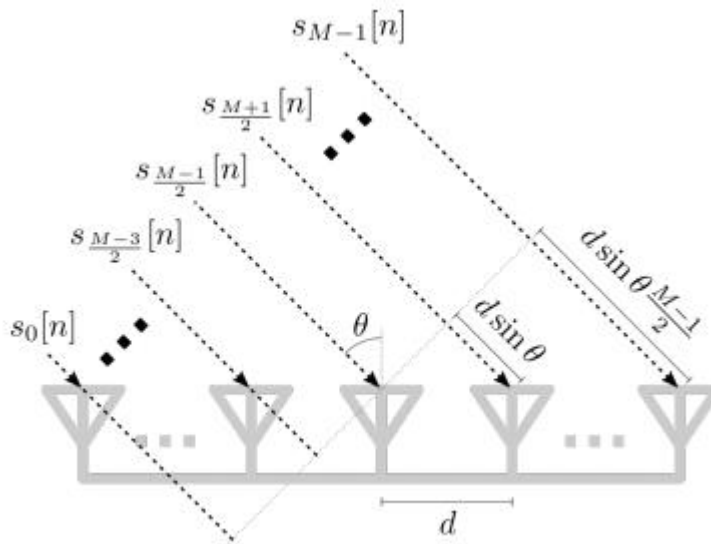
Έχουμε υπολογίσει μέχρι τώρα την καμπύλη στην οποία ανήκει το σημείο του στόχου. Για να υπολογίσουμε την ακριβή θέση του μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και άλλες μεθόδους. Μία άλλη τεχνική είναι να βρεθεί το σημείο τομής των καμπυλών που θα προκύψουν με εστίες από διαφορετικούς δέκτες (είναι το σημείο συναλθεύουν οι εξισώσεις) [15].

Για να εντοπιστεί ένας στόχος μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλαπλά ζεύγη πομπού-δέκτη για το σημείο τομής των ελλειψοειδών, αν χρησιμοποιήσουμε έναν πομπό και πολλούς δέκτες ή αν χρησιμοποιήσουμε πολλούς πομπούς και έναν δέκτη (Εικόνα 10)[20]. Στην πρώτη περίπτωση, η Κατεύθυνση Αφίξης (DoA-Direction of Arrival) μπορεί να εκτιμηθεί με τη χρήση μιας συστοιχίας κεραιών στον δέκτη για το κανάλι επιτήρησης. Αν οι κεραίες είναι τοποθετημένες σε κατάλληλη απόσταση, μπορούμε να δημιουργήσουμε μια διαδικασία με οδηγίες υπολογισμού μέσα από την συνολική επεξεργασία των σημάτων που λαμβάνουμε από κάθε κεραία.



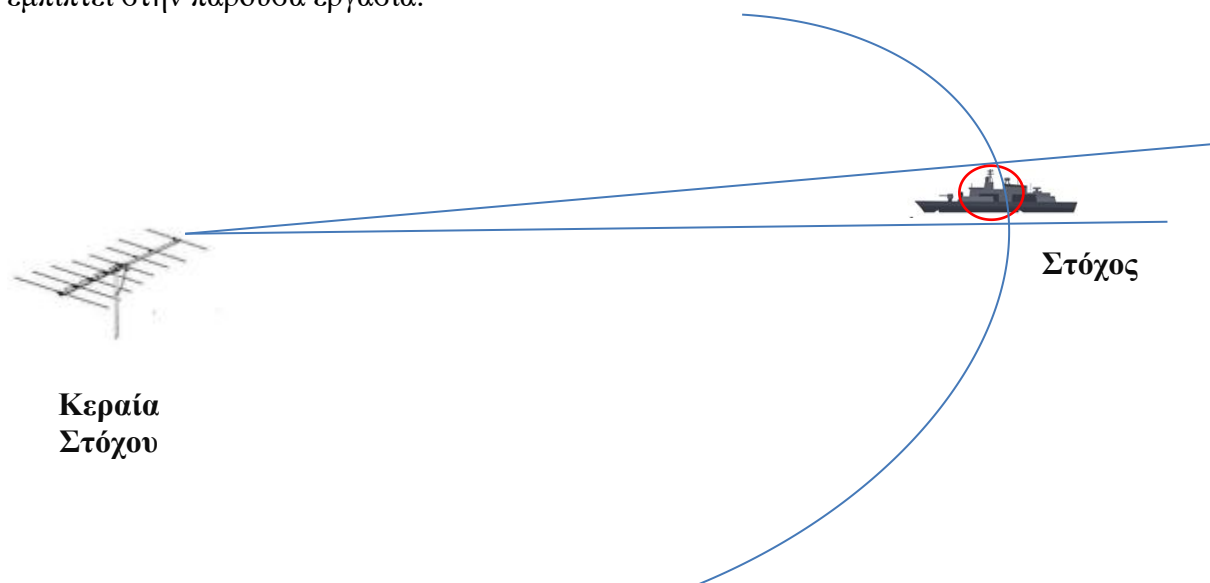
Εικόνα 10.

Αυτή η λειτουργία για την εκτίμηση της DoA έχει το πλεονέκτημα να βελτιώνει το λόγο του σήματος προς το θόρυβο (SNR-Signal to Noise Ratio) [17] συνδυάζοντας την ενέργεια εκπομπής από τις πολλές κεραίες (beamforming), οπότε η δέσμη που δημιουργείται θα κατευθυνθεί ηλεκτρονικά προς κάθε κατεύθυνση ή μπορεί και να δημιουργηθεί ένα σύνολο από κατευθυντικές δέσμες που να καλύπτει όλη την Περιοχή Ενδιαφέροντος (AoI-Area of Interest) συνολικά, στον εναέριο χώρο [14].



Εικόνα 11.

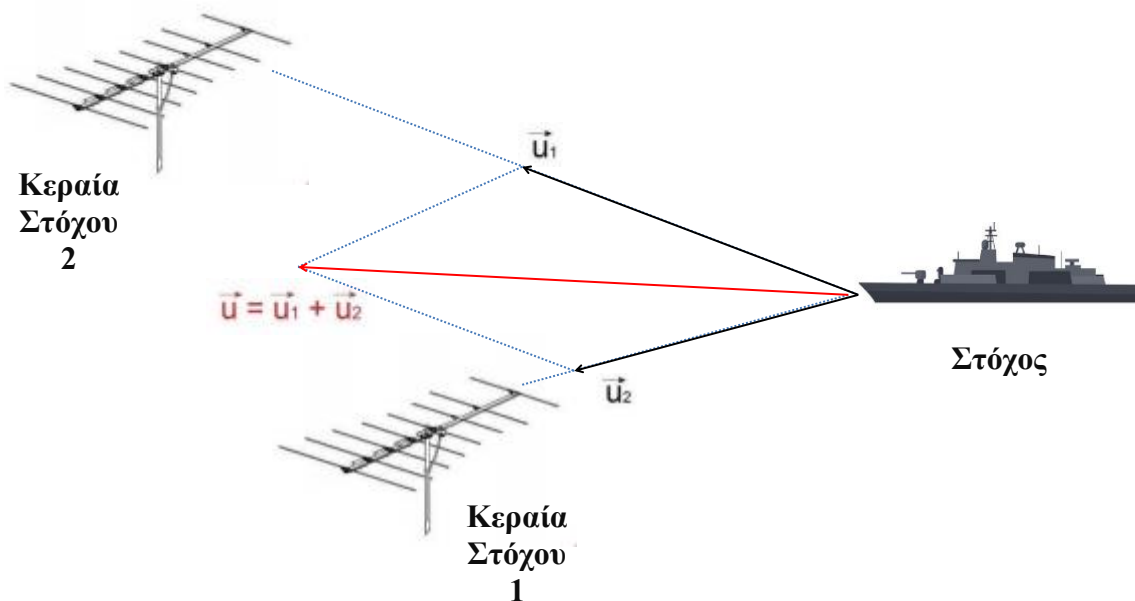
Μια άλλη τεχνική είναι η σάρωση δέσμης όπου για να βρεθεί το σημείο του στόχου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κεραίες με επάρκεια κατευθυντικότητας (directivity), που μπορούν να σαρώσουν στοιχειώδεις γωνίες στο χώρο (Εικόνα 11) και να αξιοποιήσουν την καμπύλη της έλλειψης μόνο για να υπολογιστεί η απόστασή τους από τον στόχο [19]. Η κατευθυντικότητα είναι ένα μέτρο του πόσο στενή ή εκτεταμένη είναι η περιοχή της ακτινοβολίας της κεραίας. Μια κεραία με υψηλή κατευθυντικότητα συγκεντρώνει την ενέργειά της σε μια μικρότερη περιοχή του χώρου (δηλαδή έχει πιο στενή δέσμη ακτινοβολίας), ενώ μια κεραία με χαμηλή κατευθυντικότητα διαχέει την ενέργεια σε μεγαλύτερη περιοχή (έχει πιο ευρεία δέσμη). Έχουν διερευνηθεί αρκετές διαδικασίες για να ληφθούν πληροφορίες DoA, π.χ. οι μέθοδοι υπερανάλυσης [20],[21]. Όμως εδώ υποτίθεται ότι είναι γνωστή η γωνιακή κατεύθυνση του στόχου όπως και στη μέθοδο σάρωσης (Εικόνα 12), αλλά και αυτή η μέθοδος εκτίμησης δεν εμπίπτει στην παρούσα εργασία.



Εικόνα 12.

5.3 Για τον υπολογισμό της ταχύτητας του στόχου

Ο υπολογισμός της ταχύτητας του στόχου αποτελεί ένα πρόβλημα που δεν έχει ένα μόνο τρόπο για να λυθεί. Μια από τις απλές τεχνικές, που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε σε πολλές περιπτώσεις, είναι να συγκρίνουμε τις διαφορετικές θέσεις που εντοπίσαμε τον στόχο σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Εν ολίγοις, αξιοποιούμε τις πληροφορίες οι οποίες προκύπτουν από τις διαδικασίες για τον υπολογισμό της θέσης του στόχου, οπότε θα εκτιμήσουμε την απόσταση που έχει διανυθεί από αυτόν τον στόχο, από την χρονική στιγμή του προηγούμενου υπολογισμού, στο χρόνο μιας δειγματοληπτικής περιόδου [19].



Εικόνα 13.

Πρέπει να τονίσουμε βέβαια, ότι η προηγούμενη μέθοδος έχει ως προϋπόθεση πως η ακτινοβολία που θα λάβουμε με βεβαιότητα θα προέλθει από ένα συγκεκριμένο και πραγματικό στόχο.

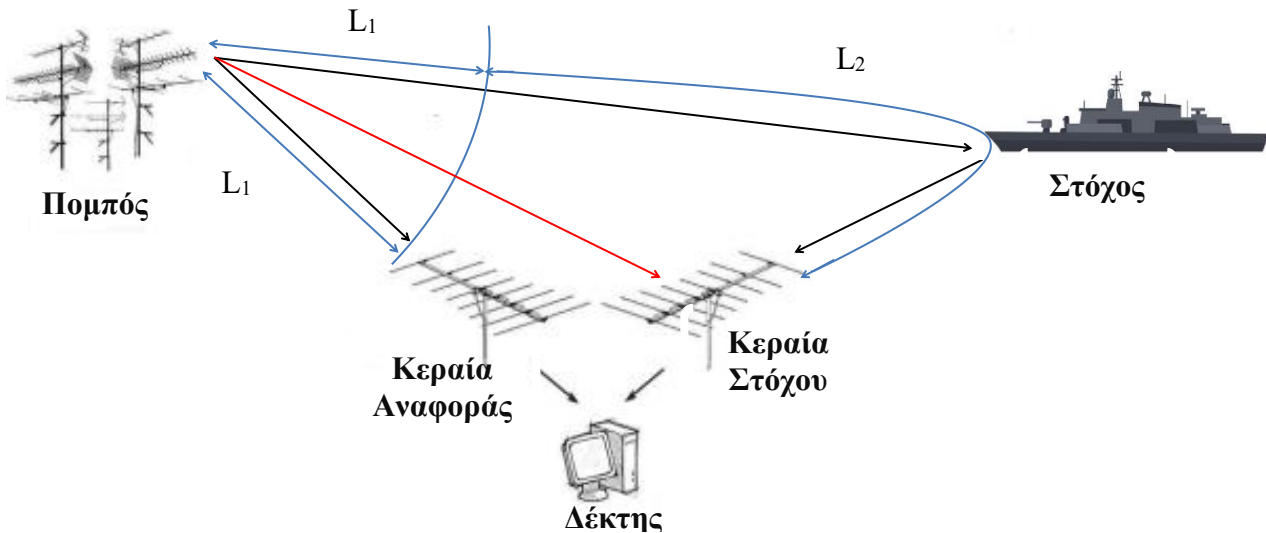
Όταν η βεβαιότητα αυτή δεν υπάρχει, ενδείκνυται να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι που εξασφαλίζουν ότι η ανάκλαση που λαμβάνεται από το ραντάρ δεν θα προέρχεται από διάφορα εμπόδια, αλλά από τον στόχο. Μία μέθοδος σαν κι αυτή είναι βασισμένη στο φαινόμενο Doppler. Υπενθυμίζουμε ότι σε ένα στόχο που κινείται και στον οποίο μια ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προσπίπτει, αντανakλάται η ακτινοβολία αυτή και μεταβάλλεται παράλληλα και η συχνότητά της. Αυτή η μεταβολή της συχνότητας είναι ανάλογη με τη συνιστώσα της ταχύτητας του στόχου με κατεύθυνση προς το δέκτη. Άρα, ο υπολογισμός της απόκλισης της συχνότητας των σημάτων του στόχου αφού συγκριθεί με το σήμα αναφοράς μας δίνει πληροφορίες για αυτή τη συνιστώσα της ταχύτητας του στόχου με κατεύθυνση προς κάθε δέκτη.

Για να υπολογίσουμε το διάνυσμα της ταχύτητας του στόχου μπορούμε να αξιοποιήσουμε μία δεύτερη κεραία στόχου (ή και πιο πολλές κεραίες, για πιο μεγάλη ακρίβεια) οπότε στη συνέχεια να διασταυρώνονται τα αποτελέσματα με την μέθοδο του παραλληλογράμμου (βλ. Εικόνα 13). Μπορούμε εναλλακτικά να συνδυάσουμε τα αποτελέσματα από αυτή την τεχνική με τα αποτελέσματα από την προηγούμενη τεχνική, με την οποία αξιοποιούνται οι διαδοχικές θέσεις του στόχου.

Από τη χρήση του φαινομένου Doppler, για να υπολογίσουμε την ταχύτητα του στόχου, το μεγαλύτερο πλεονέκτημα είναι ότι με αυτόν τον τρόπο το αποτέλεσμα φιλτράρεται σύμφωνα

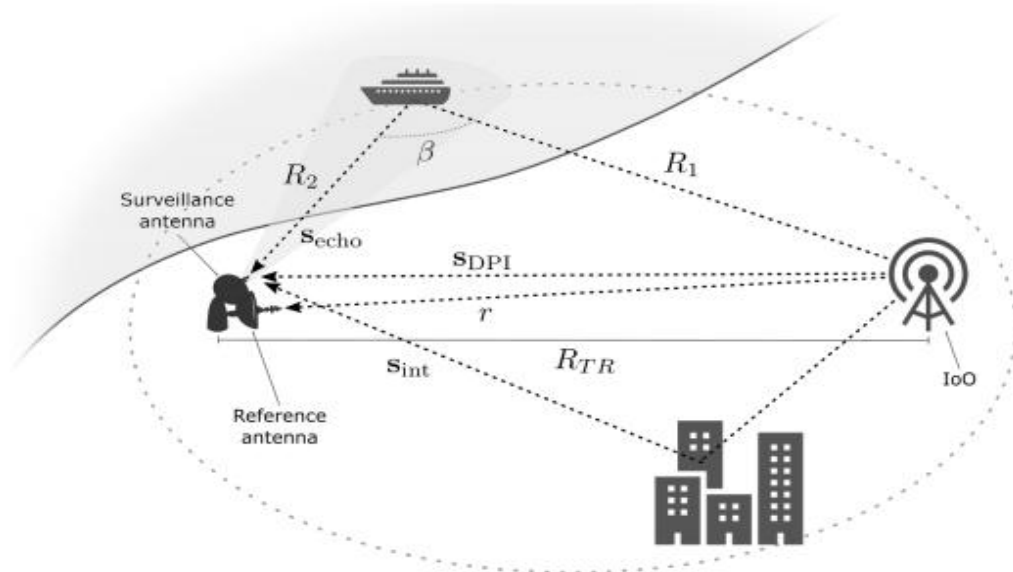
με την απόκλιση συχνότητας, οπότε δεν θα εμφανιστούν οι στόχοι που είναι ακίνητοι ή και σχεδόν ακίνητοι, που στις περισσότερες περιπτώσεις έχουν προέλθει από θόρυβο και εμπόδια.

5.4 Το σήμα του πλευρικού λοβού



Εικόνα 14.

Οι κεραίες συνήθως έχουν έναν κύριο λοβό για λήψη και εκπομπή, όμως αναπόφευκτα έχουν και πλευρικούς λοβούς (side lobes). Όταν εξετάζουμε ένα ρεαλιστικό μοντέλο, πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν ότι η κεραία στόχου θα λάβει το σήμα αναφοράς και από κάποιο πλευρικό λοβό. Αυτό το σήμα θα προστεθεί στη λήψη από τον κύριο λοβό και θα αποτελέσει ένα θόρυβο πολύ ισχυρό, σε σχέση με το σήμα που θα λάβει μετά από την ανάκλαση στον στόχο το οποίο θα είναι εξασθενημένο, οπότε πρέπει να το αφαιρέσουμε (Εικόνα 14)[19].



Εικόνα 15.

Στο σήμα επιτήρησης που λαμβάνεται, περιλαμβάνεται το Σήμα της Παρεμβολής στην Άμεση Διαδρομή (S_{DPI} -Signal of Direct Path Interference) από το IoO, η ανάκλαση από τον στόχο S_{echo} και οι επιπλέον ανακλάσεις που προέρχονται από πιθανά εμπόδια, πολλαπλές διαδρομές και επιπλέον στόχους S_{int} [9].

Οι αποδόσεις στο σύστημα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 15, επηρεάζονται πολύ από το S_{DPI} , που καταγράφει το κανάλι επιτήρησης όταν φτάσει από τον IoO [17]. Η παρεμβολή αυτή έχει άμεση σχέση με το σήμα αναφοράς και μπορεί να είναι σε ένα σημαντικά υψηλότερο επίπεδο από το επίπεδο των ανακλάσεων από τον στόχο.

Η ισχύς για το σήμα αναφοράς που θα ληφθεί από τον πλευρικό λοβό της κεραίας στόχου σαν θόρυβος, προκύπτει από τον τύπο [19]

$$P_{side} = \left(G_t \frac{A_e}{4\pi L^2} \right) = aP_t$$

όπου:

L : η απόσταση της πηγής ακτινοβολίας από την κεραία στόχου .

A_e : το ενεργό διάφραγμα της κεραίας στόχου για τον υπόψιν πλευρικό λοβό

G_t : το κέρδος για την κεραία του πομπού

a : η αναλογία για τα σήματα αναφοράς λήψης και εκπομπής

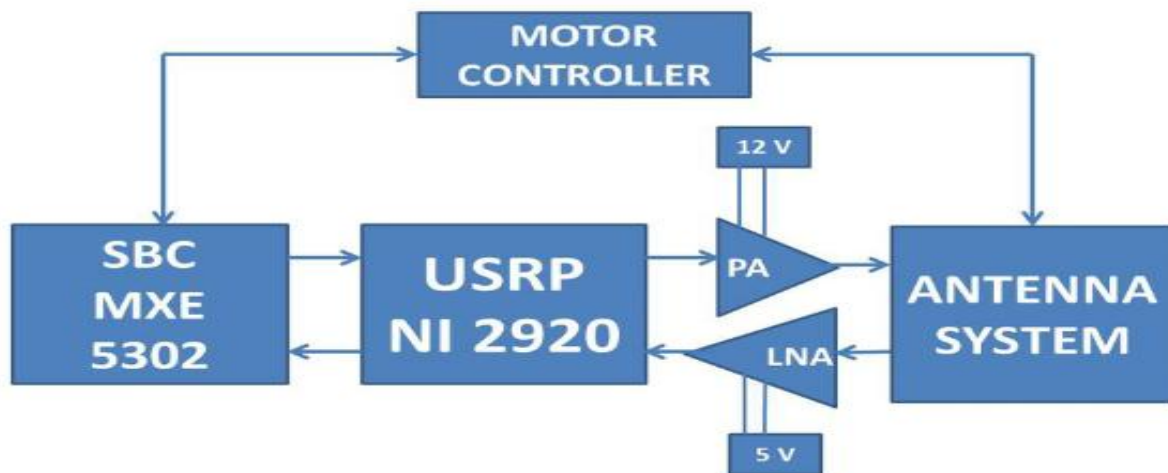
Για να αφαιρέσουμε το αναφερόμενο παρασιτικό σήμα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα φίλτρο Doppler, με το οποίο θα απορρίψουμε, ανεξάρτητα από τις τιμές του σήματος, τις αποκρίσεις με μετατόπιση Doppler πολύ κοντά στο μηδέν.

Μπορούμε παράλληλα, να χρησιμοποιήσουμε και μια από τις τεχνικές για την καταστολή των πλευρικών λοβών (canceling ή side lobe suppression).

6. RADAR με χρήση Ραδιοεξοπλισμού Υλοποιούμενου με Λογισμικό (Software Defined Radio-SDR)

6.1 Το SDR οδηγεί στην Επιτυχή Υλοποίηση του PBR

Το ραντάρ που καθορίζεται με χρήση Ραδιοεξοπλισμού υλοποιούμενου με λογισμικό (Software Defined Radio -SDR) αντιπροσωπεύει μια νέα πρόκληση στην τεχνολογία ραντάρ, λόγω της δυνατότητας εκτέλεσης των περισσότερων βασικών λειτουργιών (δηλαδή μείξη, φιλτράρισμα, διαμόρφωση) χρησιμοποιώντας απλές μονάδες λογισμικού, παρέχοντας έτσι ισχυρή ευελιξία όρους παραγωγής και επεξεργασίας σημάτων [28]. Πολλοί επιστήμονες και ερευνητές επικεντρώνουν την προσοχή τους στα συστήματα SDR και έχουν αναπτυχθεί πολλές δοκιμές και εφαρμογές, θεωρώντας τη μητρική πλακέτα Universal Software Radio Peripheral-USRP ως βασικό υλικό. Συγκεκριμένα, ο H. Zhang et al πρότειναν ένα σύστημα μέτρησης για εφαρμογές αυτοκινήτων βασισμένο σε SDR, ενώ η ικανότητα της τεχνολογίας USRP αποδεικνύεται στην πραγματοποίηση ενός παθητικού ραντάρ με το σχεδιασμό ενός χαμηλού κόστους λογισμικού DVB-T που καθορίζεται για την ανίχνευση πλοίων [35]. Η M. Fernandez-Ruiz et al πρότειναν ένα σύστημά SDR ικανό να μεταδίδει και να λαμβάνει κυματομορφές chirp (Το chirp είναι ένα σήμα στο οποίο, με την πάροδο του χρόνου, η συχνότητα μειώνεται ή αυξάνεται) χρησιμοποιώντας τα MATLAB και Simulink για να υλοποιήσει τα λογικά μπλοκ, να επεξεργαστεί τα λαμβανόμενα δεδομένα και να υπολογίσει το εύρος των στόχων [36].



Εικόνα 16.

Στις υπάρχουσες λύσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, εκτελούνται κυρίως εργαστηριακά πειράματα, χρησιμοποιώντας τυποποιημένα όργανα για την προσομοίωση της πλατφόρμας SDR. Σε αυτό το πλαίσιο παρουσιάστηκε μια δοκιμαστική πλατφόρμα μέτρησης για το ραντάρ OFDM. Η Ορθογωνική Πολυπλεξία με Διαίρεση Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing-OFDM) είναι μια τεχνική μετάδοσης μεγάλων ποσοτήτων ψηφιακών δεδομένων μέσω ραδιοκυμάτων σε ένα κανάλι επικοινωνίας. Τα ψηφιακά δεδομένα μεταδίδονται επαρκώς και με αξιοπιστία χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο αριθμό καναλιών μικρού εύρους ζώνης. Τα κανάλια αυτά χωρίζονται σε τακτά διαστήματα συχνότητας σχηματίζοντας το φάσμα του μεταδιδόμενου σήματος. Η συχνοτική απόσταση των φερουσών επιλέγεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι ορθογωνικές μεταξύ τους και να μην παρεμβάλλεται το περιεχόμενο της μιας επάνω στην άλλη. Μια αρχιτεκτονική ραντάρ FMCW-Frequency Modulated Continuous Wave που έχει βελτιωθεί τόσο από πλευράς

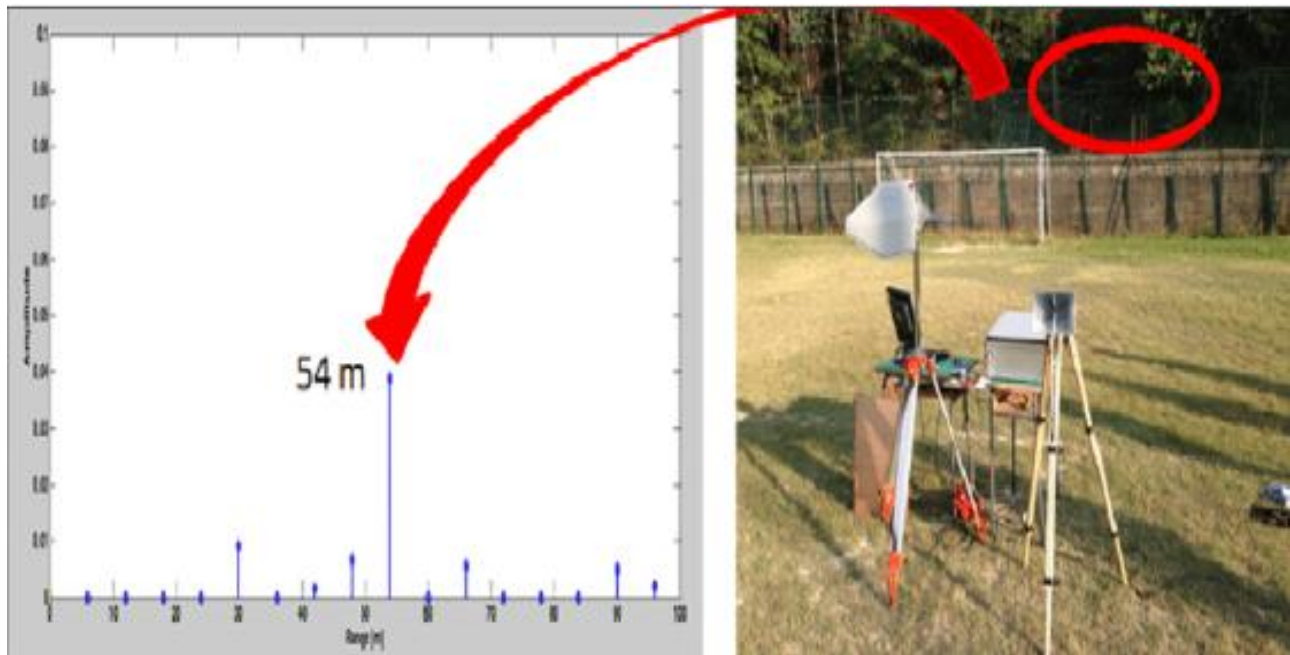
συμπαγούς συσκευής όσο και κόστους, ώστε να προσφέρει μια νέα λύση για ανίχνευση στόχων με κατάλληλη ανάλυση είναι η προτεινόμενη αρχιτεκτονική που περιγράφεται στην Εικόνα 16 [20],[21],[22].



Εικόνα 17.

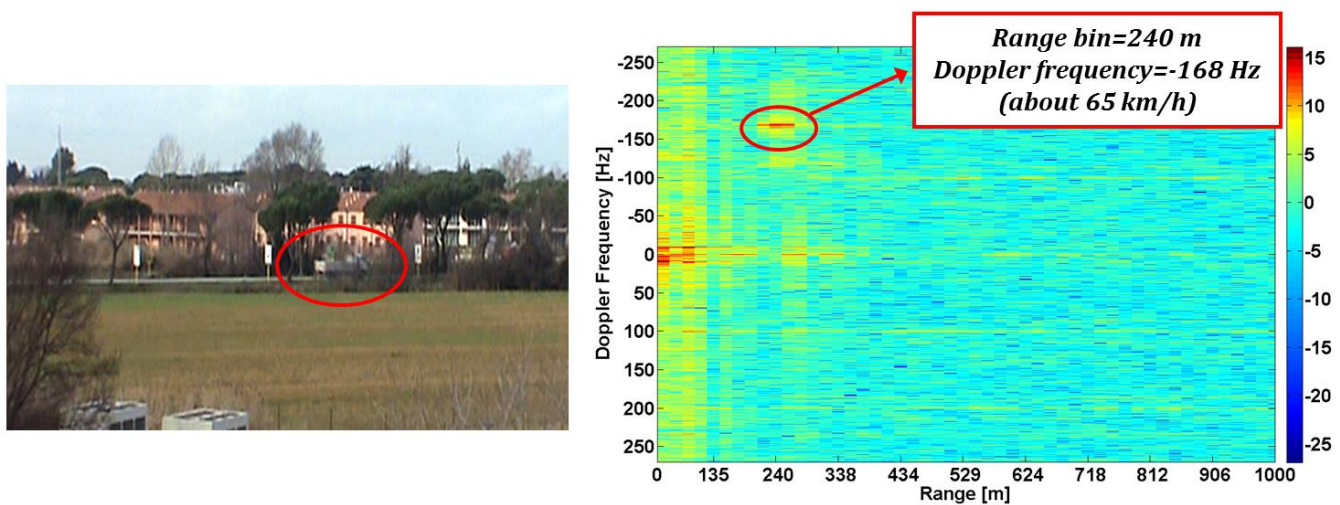
Η βασική ιδέα είναι να υιοθετηθεί ένας πομποδέκτης USRP-Universal Software Radio Peripheral (π.χ. USRP-NI2920), ο οποίος θα οδηγήσει στην υλοποίηση από το λογισμικό όλων των απαιτούμενων ενοτήτων ραντάρ, δηλαδή της παραγωγής σήματος, διαμόρφωσης / αποδιαμόρφωσης, ανάμειξης, μετατροπής A/D και D/A και επεξεργασίας σημάτων. Η πλατφόρμα USRP συνδέεται με μια γραμμική συστοιχία κεραίας microstrip 8x4 στη διαδρομή λήψης, σχεδιασμένη ad hoc για αυτό το είδος εφαρμογής, ενώ υιοθετείται μια πρότυπη κεραία στη διαδρομή μετάδοσης. Ένας Ενισχυτής Ισχύος (PA) και ένας Ενισχυτής Χαμηλού Θορύβου (LNA) συνδέονται στις κεραίες, προκειμένου να αυξηθεί η ισχύς σήματος κατά μήκος τόσο της διαδρομής μετάδοσης όσο και της διαδρομής λήψης. Ένας κώδικας LabView που ελέγχει τη λειτουργία USRP υλοποιείται σε ένα συμπαγή υπολογιστή (MXE 5302) για να δώσει την τελική διαμόρφωση που απεικονίζεται στην Εικόνα 17 [21]. Αυτή η διαμόρφωση είναι ικανή όχι μόνο να εκτελεί την επεξεργασία σήματος, χρήσιμη για τον χαρακτηρισμό της περιοχής υπό ανάλυση, αλλά επίσης έχει σχεδιαστεί για να ελέγχει ένα σύστημα κίνησης που οδηγεί στην περιστροφή της κεραίας, δίνοντας έτσι ένα χαρακτηριστικό σάρωσης χρήσιμο για μια ακριβή επιφανειακή παρακολούθηση [20], [21].

Διάφορες πειραματικές δοκιμές έχουν πραγματοποιηθεί για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων ανίχνευσης απόστασης του αναπτυγμένου SDRadar, το οποίο είναι επί του παρόντος ικανό να παρέχει χωρική διακριτική ικανότητα ίση με 6m (λόγω του διαθέσιμου εύρους ζώνης των 25MHz). Ωστόσο, αυτό μπορεί εύκολα να βελτιωθεί με την χρήση τμημάτων μεγαλύτερου εύρους ζώνης. Ένα παράδειγμα ακριβούς ανίχνευσης στόχου παρουσιάζεται από το Πανεπιστήμιο της Καλαβρίας στην Εικόνα 18., όπου μια μεταλλική πλάκα δοκιμής, τοποθετημένη σε απόσταση 54m από το σύστημα SDRadar και καλυμμένη από βλάστηση, εντοπίζεται σωστά. Συγκεκριμένα, η μέγιστη κορυφή πλάτους του σήματος εμφανίζεται στο σωστό αντίστοιχο διάστημα απόστασης (54m - 60m, με την διαθέσιμη χωρική διακριτική ικανότητα των 6m), ενώ οι χαμηλότερες κορυφές σήματος, των οποίων το πλάτος είναι αμελητέο σε σχέση με το σχετικό με το στόχο, αντιστοιχούν σε ανεπιθύμητα εμπόδια εντός της υπό δοκιμή περιοχής [38].



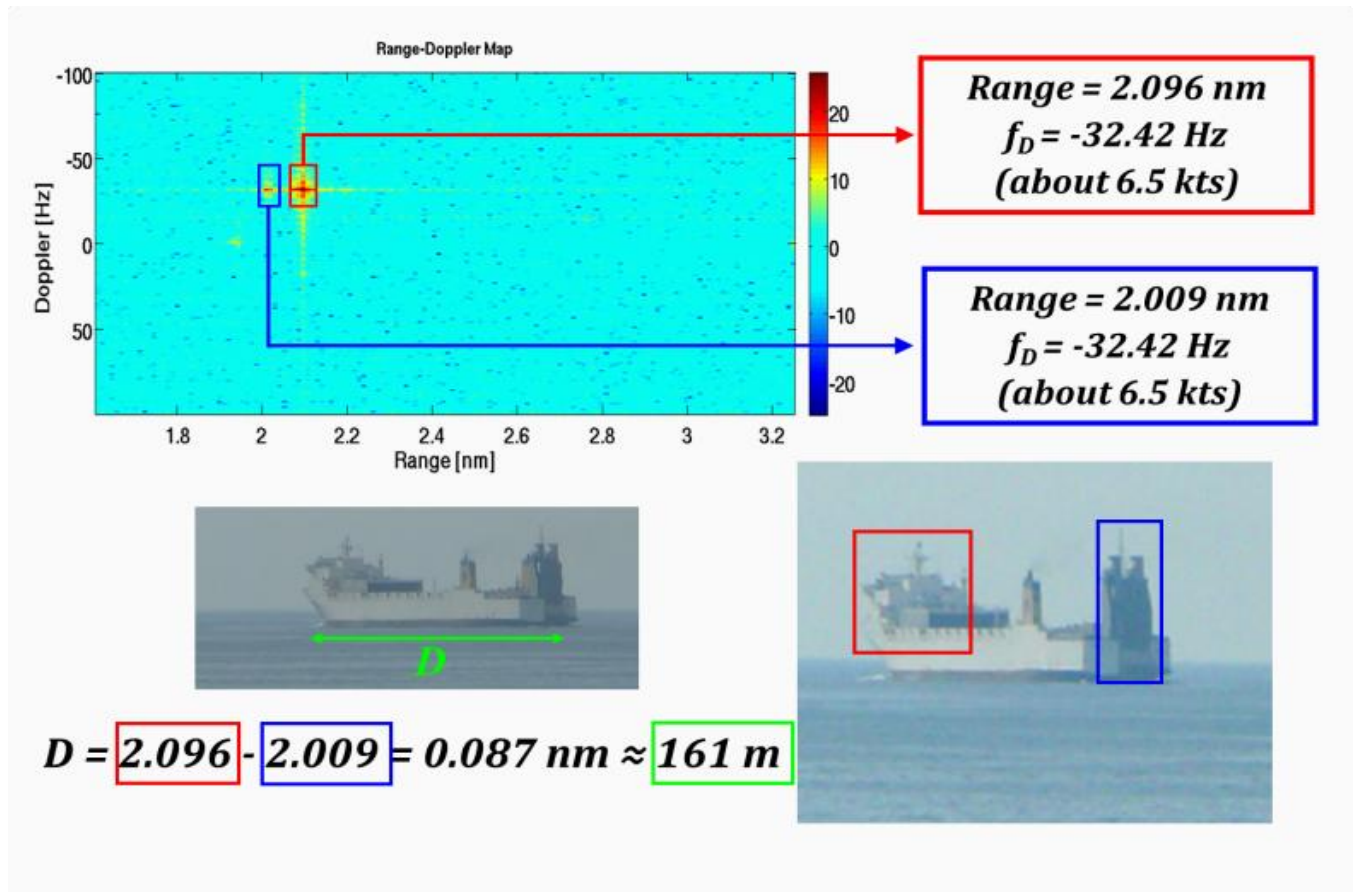
Εικόνα 18.

6.2 Εφαρμογή SDR σε συστήματα Radar



Εικόνα 19

Στην Εικόνα 19 παρουσιάζεται ένας **Χάρτης UMTS Range-Doppler σε σχέση με ανίχνευση οχήματος**. Η ανάκλαση στόχου αναγνωρίζεται εύκολα στον τομέα εμβέλειας που αντιστοιχεί στα 240 m (απόσταση δέκτη-στόχου) με συχνότητα Doppler ίση με 168Hz (δηλαδή περίπου 65km/h).



Εικόνα 20

Στην Εικόνα 20 παρουσιάζεται ένας Χάρτης DVB-T Range-Doppler σε σχέση με ανίχνευση πλοίου σε απόσταση περίπου 2.1 ναυτικών μιλίων (nm) από το κέντρο λήψης. Η δομή στόχου παρουσιάζει δύο κύριες δομές σκέδασης, ένα τεράστιο στο τόξο της πλώρης και ένα άλλο μεγάλο στην πρύμνη.

Η ιδέα του SDR αποδείχτηκε επιτυχημένη ως μια εφαρμογή πολυζωνικού παθητικού διστατικού RADAR. Συγκεκριμένα, αυτή η λύση χαμηλού κόστους χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση ενός πολυζωνικού PBR ικανού να εκμεταλλευτεί τόσο τα σήματα DVB-T όσο και τα UMTS. Τα πειραματικά αποτελέσματα απέδειξαν τη σκοπιμότητα ενός συστήματος PBR βασισμένου σε DVB-T/UMTS χρησιμοποιώντας αρχιτεκτονική που ορίζεται από λογισμικό. Οι προκαταρκτικές μετρήσεις που επικεντρώνονται στη λειτουργία αμφισήμιας, δείχνουν την καταλληλότητα και των δύο σημάτων για εφαρμογές ραντάρ. Η λειτουργικότητα των ραντάρ δοκιμάστηκε σε ένα παράκτιο περιβάλλον για την ανίχνευση πλοίων και επίσης σε μια αστική περιοχή με κινούμενους στόχους όπως τα αυτοκίνητα και τα φορτηγά [11],[33].

Τα USRP SDRs είναι επίσης κατάλληλα για εφαρμογές όπως η φασματική παρακολούθηση και η εύρεση κατεύθυνσης λόγω του μεγάλου εύρους ζώνης και των ευέλικτων RF frontends(σε ένα κύκλωμα ραδιοφωνικού δέκτη, το RF frontend είναι ένας γενικός όρος για όλα τα κυκλώματα μεταξύ της εισόδου της κεραίας του δέκτη μέχρι και της βαθμίδας του μείκτη. Αποτελείται από όλα τα εξαρτήματα του δέκτη που επεξεργάζονται το σήμα στην αρχική εισερχόμενη ραδιοσυχνότητα-RF, προτού μετατραπεί σε χαμηλότερη ενδιάμεση συχνότητα -IF). Σε επιλεγμένα μοντέλα, ο ενσωματωμένος επεξεργαστής x86 δημιουργεί ένα πολύπλοκο αλλά ισχυρό USRP που μπορείτε να χρησιμοποιήσετε ως αυτόνομο ραδιόφωνο [30].

6.3 Πλεονεκτήματα SDR

Το **Software Defined Radio (SDR)** είναι μια τεχνολογία η οποία επιτρέπει να εκτελούνται οι λειτουργίες ενός ραδιοσυστήματος μέσω λογισμικού αντί εξειδικευμένου hardware. Παρόλα τα πολλά πλεονεκτήματα της, έχει και τα μειονεκτήματά της. Ακολουθεί μια αναλυτική παρουσίαση για τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του SDR:

6.3.1 Πλεονεκτήματα του Software Defined Radio (SDR)

6.3.1.1 Ευελιξία και Προσαρμοστικότητα:

- ◆ Προσαρμογή σε διαφορετικές συχνότητες και πρωτόκολλα: Το SDR μπορεί να αλλάξει τη λειτουργία του και να υποστηρίξει διαφορετικά πρωτόκολλα και συχνότητες μέσω λογισμικού. Επομένως είναι ιδανικό για χρήση σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από ραδιοεπικοινωνίες έως τηλεπικοινωνίες και στρατιωτικά συστήματα.
- ◆ Αναβάθμιση χωρίς αλλαγές στο hardware: Η αναβάθμιση του μπορεί να γίνει μέσω λογισμικού, χωρίς τροποποίηση του υλικού. Αυτό επιτρέπει την πιο οικονομική και ευκολότερη προσαρμογή σε νέες τεχνολογίες.

6.3.1.2 Μείωση Κόστους και Χώρου:

- ◆ Εξοικονόμηση κόστους: Χρησιμοποιείται γενικής χρήσης hardware (όπως επεξεργαστές, FPGA) αντί για ειδικά κυκλώματα, οπότε μειώνεται το κόστος παραγωγής, ιδιαίτερα όταν απαιτούνται πολλές λειτουργίες ή προσαρμογές.
- ◆ Μείωση του όγκου και του βάρους: Το SDR έχει μικρότερο όγκο και βάρος, αφού το μεγαλύτερο μέρος της λειτουργικότητας γίνεται μέσω λογισμικού. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για εφαρμογές που απαιτούν φορητότητα ή περιορισμένο χώρο, όπως στα στρατιωτικά και διαστημικά συστήματα.

6.3.1.3 Πολλαπλές Εφαρμογές σε ένα Σύστημα:

- ◆ Διαλειτουργικότητα και υποστήριξη για διαφορετικά πρωτόκολλα: Το SDR υποστηρίζει πολλά διαφορετικά πρωτόκολλα και τεχνολογίες επικοινωνίας (π.χ. 4G, 5G, WiFi, Bluetooth, GPS, κ.λ.π.), χωρίς να απαιτούνται ξεχωριστά συστήματα για κάθε εφαρμογή.
- ◆ Δυνατότητα αλλαγής λειτουργιών: Επειδή οι δυνατότητες του SDR βασίζονται στο λογισμικό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλές εφαρμογές χωρίς την ανάγκη αλλαγής του hardware.

6.3.1.4 Διαχείριση Σήματος:

- ◆ Αντιμετώπιση παρεμβολών και θορύβου: Το SDR μπορεί να προσαρμόσει παραμέτρους όπως η διαμόρφωση, η ισχύς ή η συχνότητα για να εξασφαλιστεί καλύτερη ποιότητα σήματος και να μειωθούν οι παρεμβολές.
- ◆ Φιλτράρισμα και επεξεργασία σήματος: Το SDR επιτρέπει την ενσωμάτωση εξελιγμένων αλγορίθμων για επεξεργασία σήματος, εξαλείφοντας παρεμβολές και βελτιώνοντας την ποιότητα του σήματος.

6.3.1.5 Χρήση και Διαχείριση Ασφαλών Επικοινωνιών:

◆ Ασφάλεια και κρυπτογράφηση: Το SDR μπορεί να ενσωματώσει αλγορίθμους για κρυπτογράφηση και ασφαλή επικοινωνία μέσω λογισμικού, προσφέροντας προστασία από παρεμβολές και επιθέσεις.

6.3.1.6 Ανάπτυξη και Συντήρηση:

◆ Γρήγορη ανάπτυξη εφαρμογών: Το λογισμικό του SDR μπορεί να αναπτυχθεί και να αναβαθμιστεί γρήγορα, προσφέροντας μεγαλύτερη ταχύτητα και ευχέρεια κατά την ανάπτυξη νέων εφαρμογών ή τη βελτίωση των υπαρχουσών.

◆ Συντήρηση και αναβάθμιση: Η αναβάθμιση του συστήματος γίνεται μέσω λογισμικού, χωρίς την ανάγκη για φυσική συντήρηση ή αντικατάσταση του hardware.

6.3.2 Μειονεκτήματα του Software Defined Radio (SDR)

6.3.2.1 Απαιτήσεις σε Υλικό και Ικανότητες Επεξεργασίας:

◆ Μεγάλες ανάγκες επεξεργασίας: Το SDR απαιτεί ισχυρούς επεξεργαστές, όπως DSPs (Digital Signal Processors) ή FPGA (Field Programmable Gate Arrays), οι οποίοι είναι πιο ακριβοί και καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια από τα παραδοσιακά ραδιοσυστήματα.

◆ Απαιτήσεις σε επεξεργαστική ισχύ: Επειδή το μεγαλύτερο μέρος της επεξεργασίας γίνεται λογισμικά, η απόδοση του συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ισχύ των επεξεργαστών, αυτό δε οδηγεί σε καθυστερήσεις αν δεν είναι κατάλληλο το hardware [29].

6.3.2.2 Ευπάθεια σε Λογισμικό και Επιθέσεις Κυβερνοασφάλειας:

◆ Επιθέσεις στον κώδικα: Επειδή το SDR εξαρτάται από το λογισμικό, είναι ευάλωτο σε επιθέσεις κυβερνοασφάλειας, όπως malware ή hacking, ειδικά αν δεν υπάρχει κατάλληλη ασφάλεια και κρυπτογράφηση του λογισμικού.

◆ Επικινδυνότητα από σφάλματα λογισμικού: Η ύπαρξη σφαλμάτων στον κώδικα μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργικότητα του συστήματος ή να οδηγήσει σε αποτυχία της επικοινωνίας.

6.3.2.3 Υψηλή Κατανάλωση Ενέργειας:

Η επεξεργασία σήματος μέσω επεξεργαστών υψηλής απόδοσης μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, κάτι που μπορεί να είναι πρόβλημα σε φορητές εφαρμογές ή συσκευές με περιορισμένο ενεργειακό προγραμματισμό.

6.3.2.4 Χρονική Καθυστέρηση (Latency):

Η επεξεργασία σήματος μέσω λογισμικού μπορεί να προκαλέσει καθυστέρηση, κάτι που μπορεί να είναι προβληματικό σε εφαρμογές που απαιτούν πραγματικό χρόνο, όπως η ραδιοεπικοινωνία σε στρατιωτικά συστήματα ή κρίσιμες καταστάσεις.

6.3.2.5 Σύγκριση απόδοσης με ειδικά συστήματα hardware:

Σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ραδιοσυστήματα που χρησιμοποιούν εξειδικευμένα κυκλώματα, το SDR μπορεί να είναι λιγότερο αποδοτικό όσον αφορά την ταχύτητα και την ποιότητα του σήματος, εξαιτίας των περιορισμένων επιδόσεων του hardware ή των απαιτήσεων επεξεργασίας.

6.3.2.6 Περιορισμένο εύρος και απόδοση σε κάποιες συχνότητες:

Αν και το SDR καλύπτει μεγάλο εύρος συχνοτήτων, ορισμένα συστήματα SDR μπορεί να αντιμετωπίσουν περιορισμούς σε σχέση με τις ακριβείς απαιτήσεις εκπομπής ή λήψης σε πολύ υψηλές ή πολύ χαμηλές συχνότητες [29].

7. TO PROJECT USRP

Η σύνδεση ενός παθητικού ραντάρ με SDR (Software Defined Radio) και USRP (Universal Software Radio Peripheral) είναι μια ενδιαφέρουσα και τεχνικά απαιτητική διαδικασία, που περιλαμβάνει την ανίχνευση και επεξεργασία σημάτων χωρίς τη χρήση ενεργού εκπομπού. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, ένα παθητικό ραντάρ βασίζεται σε υπάρχουσες πηγές RF (π.χ. ραδιοφωνικούς σταθμούς FM, ψηφιακή τηλεόραση DVB-T, κ.λπ.) και δεν εκπέμπει δικά του σήματα.

7.1 Οι Δυνατότητες Εφαρμογής του σε Ραντάρ



Εικόνα 21.

Το USRP είναι ένα έργο ανοιχτού κώδικα που σχετίζεται με ένα ηλεκτρονικό σύστημα για τη δημιουργία εφαρμογών SDR Radar. Το USRP είναι η πρώτη συσκευή που μπορεί να διασυνδέεται με έναν Η/Υ μέσω ενός εργαλείου ανάπτυξης λογισμικού όπως το GNU Radio (Το GNU Radio είναι ένα Εργαλείο Ελεύθερου & Ανοιχτού Κώδικα για την Ραδιοεπικοινωνία Λογισμικού) ή το Simulink, καθιστώντας έτσι δυνατή τη δημιουργία διαφόρων εφαρμογών SDR Radar. Η πρώτη μητρική πλακέτα USRP σχεδιάστηκε από τον Matt Ettus στο «National Science Foundation» το 2006.

Το σύστημα SDR Radar είναι ένα ειδικό είδος πολύπλευρου ραντάρ, στο οποίο αναπτύσσονται λειτουργίες και εξαρτήματα, αρχικά υλοποιούμενα με τη χρήση ειδικού υλικού (δηλ. Μείκτες, φίλτρα, διαμορφωτές και αποδιαμορφωτές) από πλευράς μονάδων λογισμικού [29].

Αυτό προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα όπως:

- ικανότητα δημιουργίας "ραντάρ πολλαπλών χρήσεων"

- δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης υλικού
- εύκολη εφαρμογή επεξεργασίας σημάτων
- σημαντική μείωση του κόστους παραγωγής

Το απλής διαμορφωμένης συχνότητας σε πραγματικό χρόνο, ραντάρ συνεχούς κύματος συνεχίζει να βασίζεται στο λογισμικό USRP N294x της ραδιοεπικοινωνίας λογισμικού (είναι ένα σύστημα ραδιοεπικοινωνίας όπου τα εξαρτήματα που έχουν εφαρμοστεί συνήθως στο υλικό π.χ. μείκτες, φίλτρα, ενισχυτές, διαμορφωτές / αποδιαμορφωτές, ανιχνευτές κλπ. εφαρμόζονται αντί αυτού μέσω λογισμικού σε προσωπικό υπολογιστή ή ενσωματωμένο σύστημα). Η επεξεργασία και ανίχνευση σημάτων γίνεται μέσω PC και είναι βασισμένη κυρίως στην εφαρμογή GNU Radio σε PC και την C++. Κύριος σκοπός αυτού του σχεδιασμού είναι να δημιουργήσει αξιόπιστο τρόπο διασύνδεσης με το USRP και να το χρησιμοποιεί με ιδιόκτητες εφαρμογές για λογισμικό ραντάρ σε πραγματικό χρόνο. Ένας άλλος λόγος ήταν ο σχεδιασμός λογισμικού για επεξεργασία σήματος ραντάρ, το οποίο θα μπορούσε εύκολα να επεκταθεί με νέα χαρακτηριστικά.

USRP B-Series Overview

Specs

- Low Cost integrated RF solution
- Based on Analog Devices AD9361 RFIC
- RF Frequency Range: 70MHz – 6GHz
- Configurable clocking 1.92 MHz – 61.44 MHz
- USB 3.0 interface
- USRP B200
 - 1 TX / 1 RX Half or Full Duplex
 - Up to 56MHz single channel bandwidth
- USRP B210
 - 2 TX / 2 RX Half or Full Duplex, Coherent
 - Up to 56 MHz single channel bandwidth
 - Up to 30.72 MHz dual channel bandwidth
 - MICTOR, JTAG, and GPIO connectors

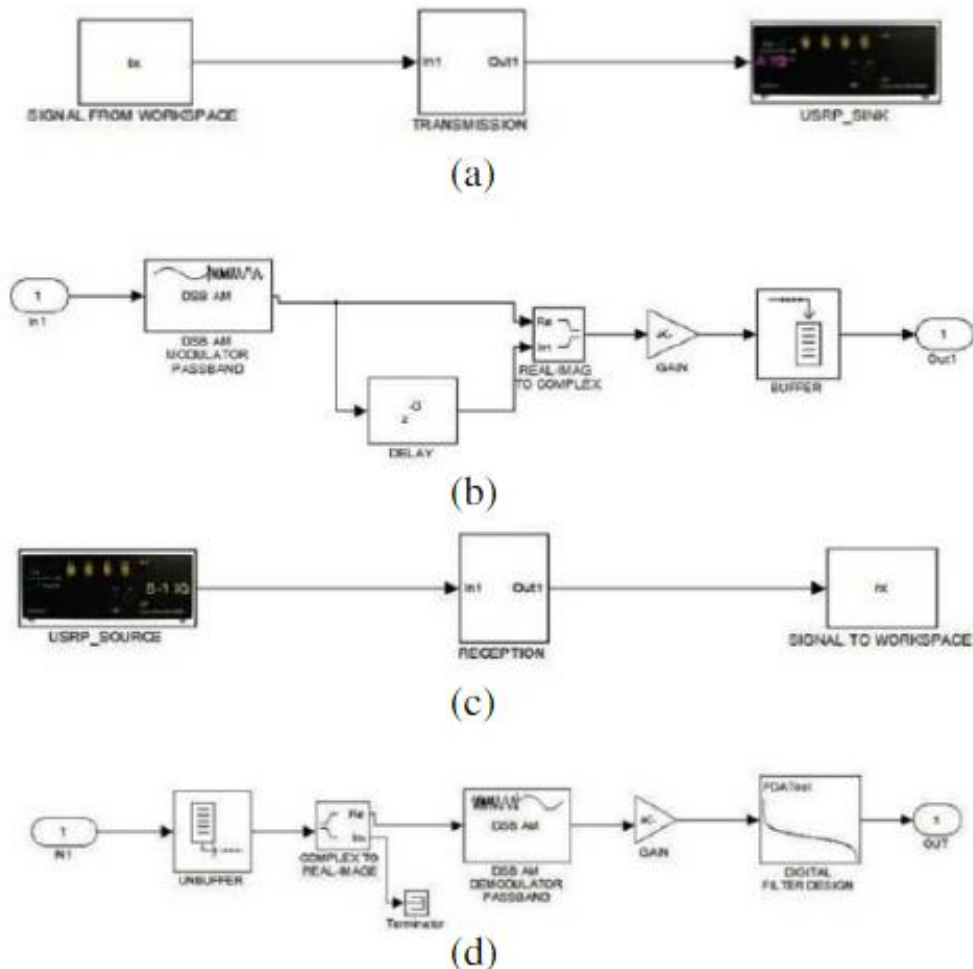


Εικόνα 22.

Το Ραντάρ Λογισμικού είναι η τελευταία τάση στην ανάπτυξη ραδιοεπικοινωνιών. Για να χειριστούν τις βελτιωμένες τεχνικές επεξεργασίας σήματος ραντάρ, τα προηγμένα ραντάρ πρέπει να είναι σε θέση να παράγουν διάφορους τύπους κυματομορφών, όπως διαμόρφωση συχνότητας ή κωδικοποιημένη σε φάση, και να επιτελούν πολλαπλές λειτουργίες. Η υιοθέτηση ενός ραδιοσυστήματος που έχει οριστεί μέσω λογισμικού διευκολύνει όλες αυτές τις δυνατότητες και επιπλέον γίνεται λόγος για την εφαρμογή ενός συστήματος ραντάρ λογισμικού που έχει οριστεί για την παρακολούθηση στόχου με χρήση της πλατφόρμας USRP.

7.2 Απεικόνιση διαδρομής ανάπτυξης USRP σε SDR

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι συγκεκριμένες ρυθμίσεις μετάδοσης και λήψης για την διασύνδεση των πλατφορμών USRP με ένα PC. Απεικονίζεται το μοντέλο Simulink που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της εφαρμογής SDR στην πρώτη γενιά USRP.

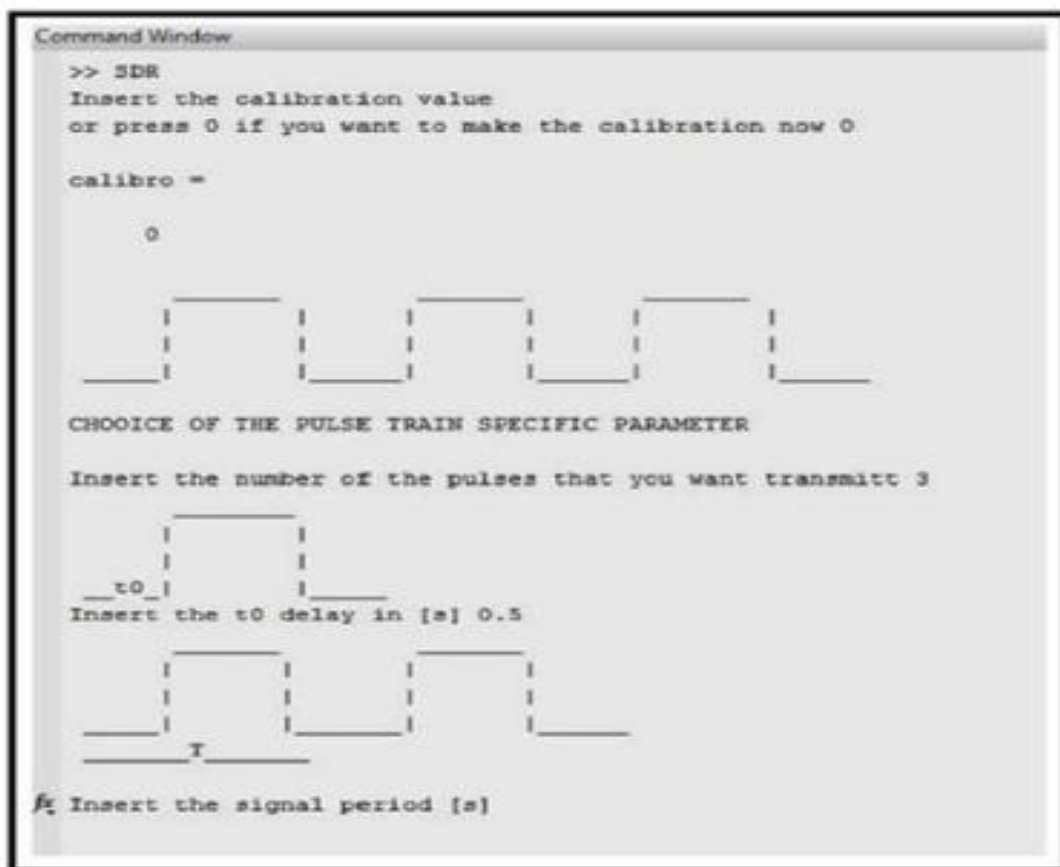


Εικόνα 23.

Οι Εικόνες 23 (a)-(b), και συγκεκριμένα (a) μοντέλο Simulink για τον πομπό και (b) υποσύστημα μετάδοσης, δείχνουν τα δομικά στοιχεία μετάδοσης που αποτελούνται από την παραγωγή σήματος και την αποστολή δεδομένων στην USRP. Για την λήψη, οι Εικόνες 23 (c)-(d), και συγκεκριμένα (c) μοντέλο Simulink για τον δέκτη και (d) υποσύστημα παραλαβής, δείχνουν το μοντέλο Simulink που σχετίζεται με τον δέκτη και το σχετικό υποσύστημα για αποδιαμόρφωση σήματος, και ψηφιακή αποθήκευση δεδομένων. Προκειμένου να ελεγχθεί ολόκληρο το σύστημα, εφαρμόζεται μια εφαρμογή SDR η οποία επιτρέπει τον έλεγχο του USRP. Το πρόγραμμα οδήγησης λογισμικού επιλέγει τις χαρακτηριστικές παραμέτρους της ακολουθίας παλμών που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά. Συνδέεται με τα μοντέλα Simulink, εκκινεί τη μετάδοση και τη λήψη μέσω του USRP και, τελικά, εκτελεί απλές λειτουργίες επεξεργασίας σημάτων. Ειδικότερα, το λογισμικό επιτρέπει:

- να επιλέξετε το ρυθμό δειγματοληψίας του σήματος στη μετάδοση
- να επιλέξετε το εύρος της παλμοσειράς
- να επιλέξετε τον αριθμό παλμών στη μετάδοση

- να καθορίσετε την περίοδο της κυματομορφής
- να καθορίσετε τη διάρκεια του παλμού,
- εμφάνιση του μεταδιδόμενου και του ληφθέντος σήματος,
- μέτρηση της καθυστέρησης που εισάγεται από το σύστημα κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης
- μέτρηση της καθυστέρησης μεταξύ του μεταδιδόμενου και του λαμβανόμενου κύματος σύμφωνα με τις συντεταγμένες του πρώτου σημαντικού δείγματος του πρώτου ληφθέντος παλμού (υποχρεωτική λειτουργία για τη μέτρηση της απόστασης ενός στόχου),
- μέτρηση της διάρκειας του λαμβανόμενου παλμού για να κάνετε μια σύγκριση με το μεταδιδόμενο (υποχρεωτική λειτουργία για την επαλήθευση του συγχρονισμού).

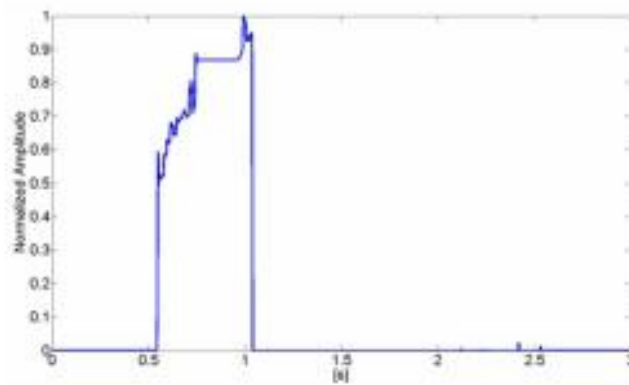


Εικόνα 24.

Η αρχική διεπαφή οθόνης της αναπτυχθείσας εφαρμογής SDR στην USRP παρουσιάζεται στην Εικόνα 24.

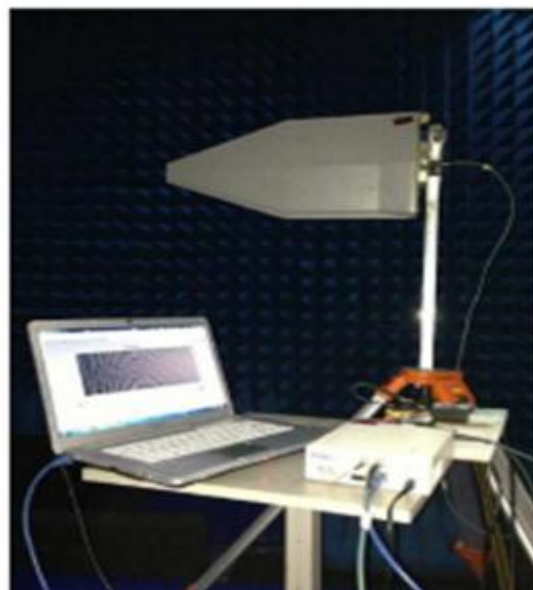


(a) SDR with first generation USRP and (b) reference target.



Received pulse with the first generation USRP for a target distance equal to 108 m.

Εικόνα 25.



Εικόνα 26.

7.3. Επιλογές εφαρμογής USRP



Εικόνα 27.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται πειραματικά για τα παθητικά διστατικά ραντάρ αποτελείται από εμπορικές κεραίες τηλεόρασης χαμηλού κόστους (υποδοχή DVB-T) ή παραβολικές κεραίες πλέγματος (UMTS λήψη) μαζί με δύο συγχρονισμένες κάρτες USRP εξοπλισμένες με DBSRX daughterboard(Εικόνα 27). Το βασικό χαρακτηριστικό αυτής της διαμόρφωσης είναι η δυνατότητα ρύθμισης μέσω λογισμικού στα 800MHz ή στα 2,1GHz [30]. Η διαχείριση του συστήματος και ο έλεγχος υλοποιήθηκαν σε περιβάλλον C++ χρησιμοποιώντας το UHD Api(USRP Hardware Device). Οι κύριες λειτουργίες σχετίζονται με τον συντονισμό, το φιλτράρισμα, την ενίσχυση, τη δειγματοληψία, τη αποδεσμοποίηση και τη μεταφορά δεδομένων. Τέλος, όλοι οι αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος ραντάρ υλοποιήθηκαν σε σταθμό εργασίας που εκμεταλλεύεται από κοινού CPU/GPU [20].

7.4. Η κάρτα USRP 2944-R

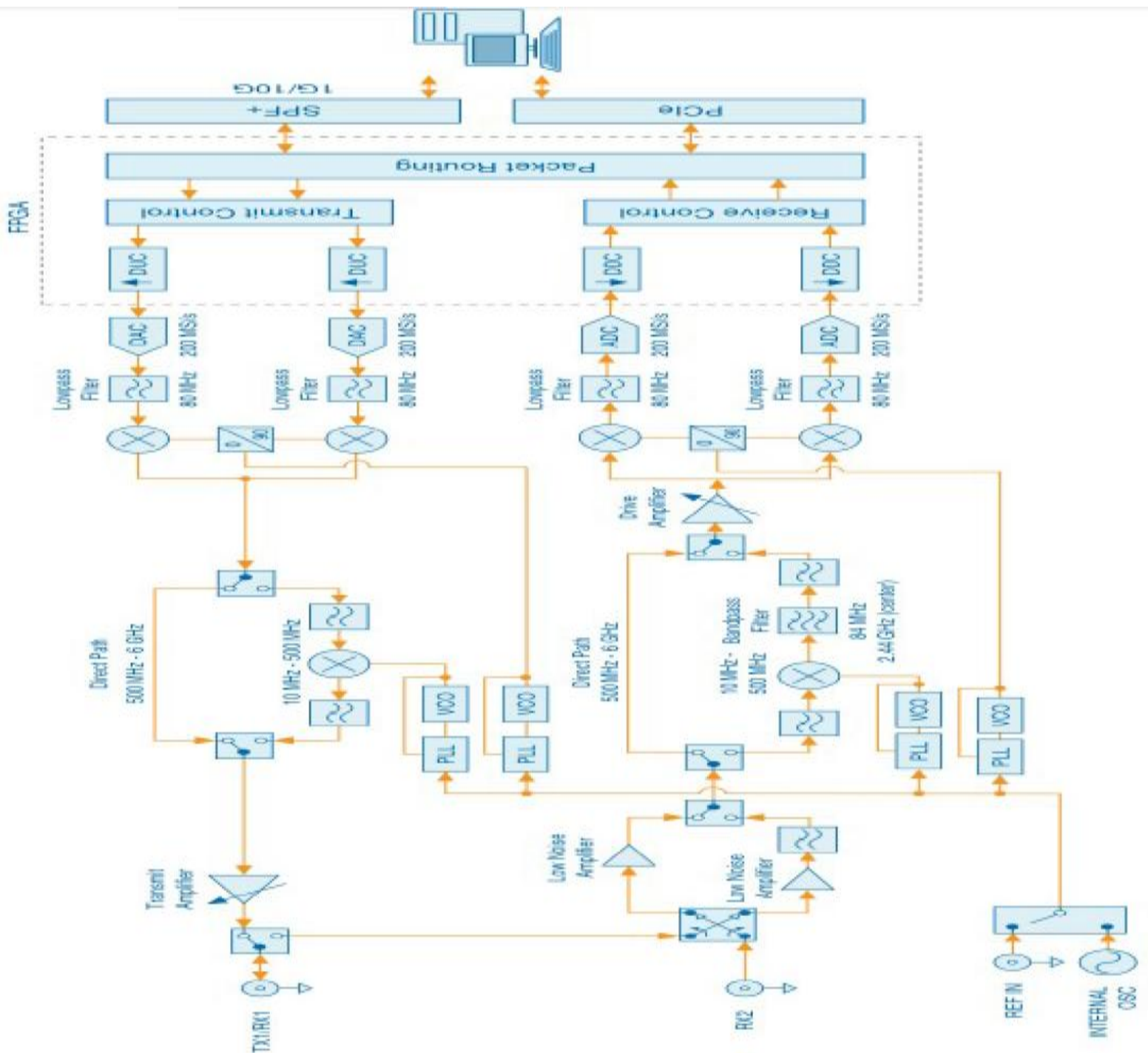
Στην Εικόνα 28, αρχίζοντας από τα δεξιά προς τα αριστερά στη διαδρομή μετάδοσης, ο H/Y συνθέτει σήματα I και Q και τα μεταδίδει μέσω σύνδεσης PCIe στη συσκευή USRP 2944-R. Στο FPGA(Field Programmable Gate Array) τα πακέτα δρομολογούνται και ελέγχονται πριν το DUC(Digital Up Converter) αναμιξεί, φιλτράρει και παρεμβάλλει το σήμα στα 400MS/s. Μετά το DUC, το σήμα περνά στη μονάδα RF(Radio Frequency) όπου ένα DAC(Digital to Analog Converter) μετατρέπει το σήμα σε αναλογικό με ρυθμό δειγματοληψίας 200MS/s. Το φίλτρο χαμηλής διέλευσης μειώνει τα στοιχεία θορύβου και υψηλής συχνότητας στο σήμα.

Μετά από αυτό, ο μίκτης ανοίγει το σήμα σε μια συχνότητα φορέα ραδιοσυχνοτήτων που ελέγχεται από το πάνελ λογισμικού. Τα μπλοκ PLL(Phased Locked Loop) και VCO(Voltage Controlled Oscillator) βεβαιώνουν ότι τα ρολόγια της συσκευής και το LO(Local Oscillator) είναι κλειδωμένα σε συχνότητα, σε ένα σήμα αναφοράς το οποίο στην περίπτωση μας παράγεται εσωτερικά στα 10MHz, αλλά μπορεί να είναι και εξωτερικό, για παράδειγμα μια κεραία GPS. Στο τέλος της διαδρομής μετάδοσης το σήμα ενισχύεται ώστε να είναι έτοιμο για αποστολή στο βύσμα μετάδοσης.

Μετά τη μετάδοση, ξεκινώντας από αριστερά προς τα δεξιά στη διαδρομή λήψης, το σήμα λαμβάνεται. Ανάλογα με τη συχνότητα, είτε ενισχύεται από ένα LNA (Low Noise Amplifier) ή από τον συνδυασμό LNA και ενός βαθυπερατού φίλτρου. Ανάλογα με τη συχνότητα, το σήμα μετακινείται στη διαδρομή μετατροπής ενώ το PLL και το VCO έχουν την ίδια λειτουργία, για την αλυσίδα λήψης αυτή τη φορά. Το σήμα ενισχύεται και πάλι από ένα ενισχυτή πριν ο μίκτης τετραγωνικής διαμόρφωσης μετατρέψει το σήμα σε σήματα βασικής ζώνης I και Q. Το φίλτρο χαμηλής διέλευσης μειώνει τα στοιχεία θορύβου και υψηλής συχνότητας στο σήμα.

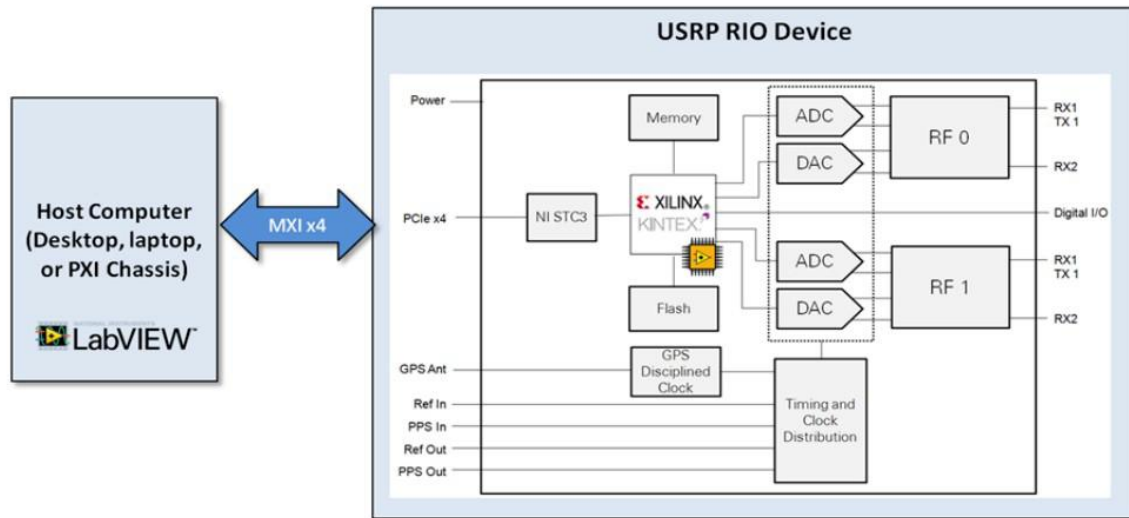
Αφού το ADC (Analog to Digital Converter) μετατρέψει το σήμα για να επιτρέψει την χρήση του σε ψηφιακή μορφή το DDC (Digital Down Converter) κάνει μίξη, φιλτράρει και κωδικοποιεί το σήμα και στη συνέχεια τα δείγματα περνούν μέσω μιας σύνδεσης PCIe στον κεντρικό υπολογιστή [24].

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τον προγραμματισμό της συσκευής ήταν το LabView Communications Design Suite 2.0 της NI (National Instruments). Χρησιμοποιεί μια γραφική γλώσσα προγραμματισμού που ονομάζεται "G" και η οποία σχεδιάστηκε για να επισημάνει τη ροή δεδομένων στα προγράμματα. Ο τύπος των αρχείων που δημιουργούνται έχει όνομα επέκτασης ".gvi".



Εικόνα 28.

7.5 Εξοπλισμός-Κόστος



Εικόνα 29.

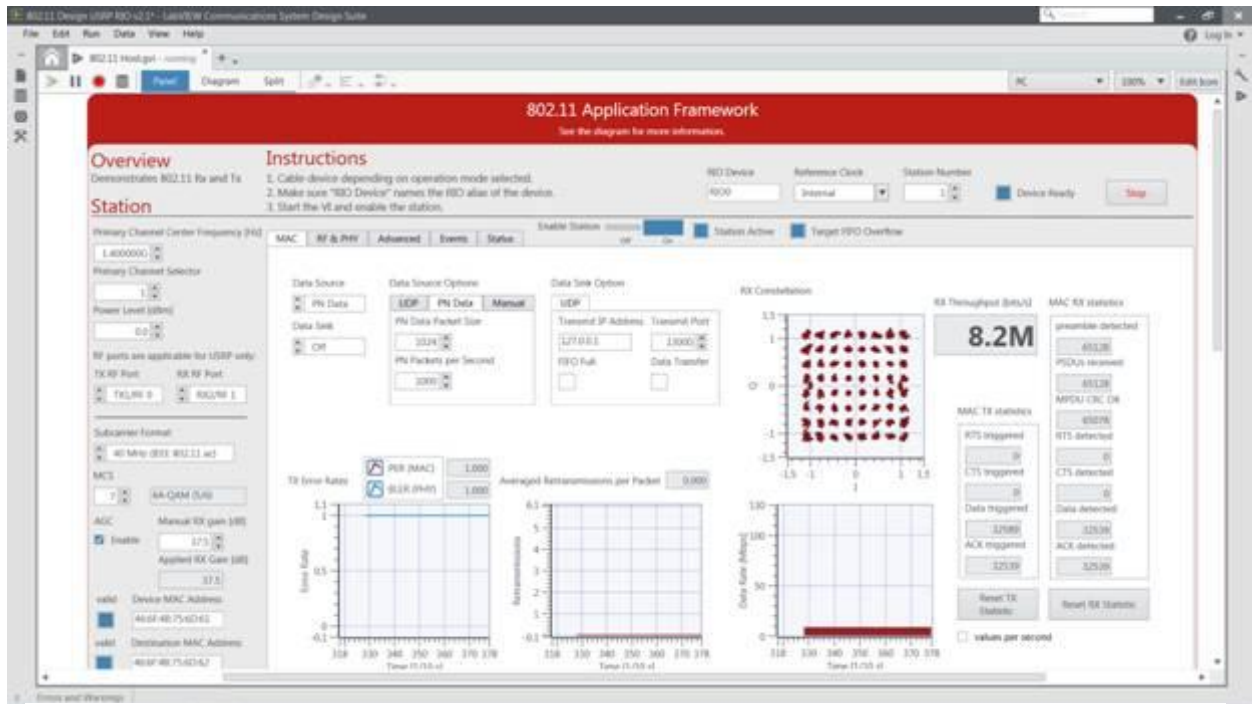
Ένα σύστημα, όπως αναπτύχθηκε από το Τμήμα Ηλεκτρονικής και Τηλεπικοινωνιών του Πολυτεχνείου του Τορίνο, αποτελείται από μια συσκευή USRP-2944Rio, μία υποδοχή για μετάδοση και μία για λήψη, έναν υπολογιστή (ο κεντρικός υπολογιστής) και μια υποδοχή σύνδεσης PCIe express x4 μεταξύ του USRP και του κεντρικού υπολογιστή. Χρησιμοποιήθηκε επίσης ένας ψηφιακός παλμογράφος που λειτουργεί μέχρι 60MHz και 1 GS/s για απεικόνιση σήματος. Μια σχηματική αναπαράσταση της ρύθμισης του συστήματος φαίνεται στην Εικόνα 29 [24].

Το NI USRP 2944-R ενσωματώνει το Xilinx Kintex-7 FPGA για τοπική επεξεργασία σήματος σε πραγματικό χρόνο. Το Kintex-7 FPGA υλοποιεί ένα επαναδιαμορφώσιμο LabVIEW FPGA που ενσωματώνει την συνεπεξεργασία DSP48 για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης [29].

Η συσκευή USRP 2944-R έχει συχνότητα από 10MHz έως 6GHz και εύρος ζώνης 160MHz σε συχνότητες φορέα, με δύο κανάλια πλήρους αμφίδρομης επικοινωνίας. Στο παραπάνω σύστημα, η συσκευή συνδέθηκε σε H/Y με θύρα PCIe express x4, η οποία επιτρέπει μέχρι 800Mb/s δεδομένα ροής. Οι προδιαγραφές της συσκευής USRP-2944R μαζί με την συσκευή σύνδεσης στον κεντρικό υπολογιστή είναι:[24]

Προδιαγραφές USRP NI-2944R

- ▶ Εύρος συχνοτήτων 10MHz έως 6GHz
- ▶ Το LabView Communications Design Suite 2.0
- ▶ Kintex-7 FPGA
- ▶ Μέχρι 800 MS/s PCI Express x4 σύνδεση με τον κεντρικό υπολογιστή
- ▶ Εύρος ζώνης πραγματικού χρόνου έως 160MHz σε Tx και Rx Κεραίες [10].



Εικόνα 30.

Απαιτήσεις υπολογιστή

Η εφαρμογή λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για το πρωτότυπο του ραντάρ στην πλατφόρμα ραδιοεπικοινωνιών NI USRP 2944-R ήταν η LabVIEW Communications System Design Suite 2.0. Αυτή η εφαρμογή λογισμικού παρέχεται από την NI, και είναι συμβατή με το μεγαλύτερο μέρος του υλικού NI που έχει καθοριστεί από το λογισμικό. Το μέγεθος του αρχείου είναι περίπου 8Gb και ο υπολογιστής στον οποίο θα εγκατασταθεί πρέπει να πληροί κάποιες απαιτήσεις. Το λειτουργικό σύστημα πρέπει να είναι Windows 8.1 64-bit ή Windows 7 64-bit και το λογισμικό απαιτεί τουλάχιστον 8GB μνήμης RAM. Ο κεντρικός υπολογιστής που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία

με τη συσκευή SDR πρέπει να πληροί ορισμένες προϋποθέσεις για να είναι κατάλληλος για αυτή. Εκτός από τις απαιτήσεις για εφαρμογή λογισμικού, πρέπει να συμμορφώνεται και με κάποιες άλλες για να επικοινωνήσει με το USRP-2944R.

Ο υπολογιστής που χρησιμοποιήθηκε για αυτό το έργο είχε τις εξής ιδιότητες:

- Εγκατεστημένη RAM 24GB
- Intel (R) Core (TM) 940 i7 CPU 2,93GHz διπλού πυρήνα
- Windows 8.1 Enterprise 64-bit OS

Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο H/Y είναι πολύ κρίσιμος για τη συνεχιζόμενη ροή εργασιών του έργου [24].



Εικόνα 31.

Η Εικόνα 31 δείχνει τις πραγματικές συσκευές υλικού που χρησιμοποιήθηκαν για το παραπάνω σύστημα. Το κόστος της συσκευής USRP 2944-R είναι περίπου 8000 €, όπως και το κόστος των USRP της σειράς X. Συγκεντρώνοντας τις τιμές όλων των άλλων υλικών εξοπλισμού ραντάρ, το συνολικό κόστος ανέρχεται σε 9000 €. Μπορεί το κόστος να φτάσει και τις 26000 € χρησιμοποιώντας USRP της σειράς NI [24],[20].

Το USRP, το GNU Radio και η θυγατρική πλακέτα TVRx μπορούν να αποτελέσουν ένα δυναμικό περιβάλλον για το δέκτη και την ανάπτυξη του. Το σύστημα φιλοδοξεί να ανταποκριθεί σε ένα χαμηλό κόστος, λίγο περισσότερο από 1000€ για μια μεμονωμένη θυγατρική πλακέτα και για τη μητρική πλακέτα USRP. Επιπρόσθετα, έχει καλή απόδοση, αφού εμφανίζει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά, το frontend του δέκτη παρέχει εύρος ρυθμισμού μεταξύ 50MHz και 800MHz και εύρος ζώνης 6MHz, με το μέγεθος του βήματος συντονισμού να είναι ως και 31,25kHz. Το δυναμικό του εύρος είναι 62dB, ο θόρυβος του δέκτη είναι NF 10dB και η ευαισθησία του είναι στα -105dB [30].

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάπτυξη και χρήση εξελιγμένων τεχνολογιών ραντάρ συνδεδεμένων μέσω του ΔΙΔΕΣ(Δίκτυο Δεδομένων Στρατού) για έγκυρη και ασφαλή λήψη των πληροφοριών, είναι ζωτικής σημασίας προτεραιότητα για έναν σύγχρονο Στρατό με σκοπό την αντιμετώπιση απειλών χαμηλής παρατηρησιμότητας (Stealth) καθώς και των εξελιγμένων συστημάτων αυτοπροστασίας των σύγχρονων σκαφών. Μία από τις πλέον υποσχόμενες τεχνικές anti-Stealth είναι τα συστήματα παθητικών ραντάρ, τα οποία συνδυάζουν τόσο τα πλεονεκτήματα χαμηλών συχνοτήτων και γεωμετρίας (ακυρώνοντας εν πολλοίς τις ικανότητες των σκαφών Stealth, τα οποία είναι βελτιστοποιημένα εναντίον συμβατικών μονοστατικών ραντάρ, στις συνήθεις μπάντες συχνοτήτων), όσο και τα πλεονεκτήματα της μη εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (εκμηδενίζοντας τις δυνατότητες των συστημάτων αυτοπροστασίας).

Στην παρούσα εργασία επιχειρήθηκε η μελέτη συστήματος παθητικού ραντάρ έστω περιορισμένων δυνατοτήτων. Μελετήθηκαν και προτάθηκαν συστήματα που προσομοιώνουν τη λήψη και επεξεργασία ηλεκτρομαγνητικών σημάτων με σκοπό τον εντοπισμό στόχων και τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών θέσης και ταχύτητας αυτών, με βάση την Βιβλιογραφία. Έχει αναπτυχθεί και παρουσιαστεί ήδη ένα πρωτότυπο το οποίο έχει αξιολογηθεί μέσα από πραγματικά πειράματα σε εξωτερικούς χώρους, αποδεικνύοντας την ακρίβειά του στον εντοπισμό και την παρακολούθηση ενός παραπλανητικού UAS στην περιοχή ενδιαφέροντος [34]. Σε κάθε περίπτωση, το συμπέρασμα είναι πως η κατασκευή παθητικού ραντάρ είναι εφικτή, ενώ το κόστος ανάπτυξης και λειτουργίας ενός πλήρως επιχειρησιακού συστήματος θα κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα.

Είναι παραπάνω από προφανή τα πλεονεκτήματα και οι λύσεις που μπορεί να προσφέρουν τα παθητικά ραντάρ στην ανίχνευση στόχων και στην συμπλήρωση της ραδιοεπιτήρησης των συνόρων. Ο συνδυασμός τους δε με SDR, αυξάνει κατακόρυφα την απόδοση τους και την ανάγκη χρήσης τους.

Τα συστήματα SDR έχουν ορισμένα προτερήματα που τα καθιστούν μοναδικά, ενώ το κόστος τους είναι χαμηλό. Εν ολίγοις, στα συστήματα SDR το σήμα διατηρείται σε ψηφιακή μορφή όσο το δυνατόν περισσότερο στην αλυσίδα επεξεργασίας, χρησιμοποιώντας το αναλογικό σήμα μόνο για τη λήψη ή την εκπομπή. Με τον τρόπο αυτόν επιτρέπεται στις ψηφιακές τεχνικές να εκτελέσουν λειτουργίες που σε παλαιότερες τεχνολογίες επιτελούνταν από αναλογικά στοιχεία, καθώς και επιπρόσθετες λειτουργίες που δεν είναι δυνατές στην αναλογική τεχνολογία. Τέλος, τα SDR έχουν την ικανότητα να τροποποιούνται, να εξελίσσονται και να αναβαθμίζονται χωρίς να απαιτείται καμία φυσική αλλαγή στο υλικό τους, δεδομένου ότι η λειτουργία τους καθορίζεται κυρίως από λογισμικό [30].

Η χρήση τόσο του περιβάλλοντος GNU Radio όσο και του MATLAB είναι αρκετά διαδεδομένη για παρόμοιες εφαρμογές.

Προφανές συμπέρασμα είναι ότι ένα πλήρες σύστημα ραντάρ που έχει καθοριστεί από το λογισμικό, μπορεί να εφαρμοστεί στη συσκευή NI USRP 2944-R χρησιμοποιώντας το LabVIEW Communications System Design Suite 2.0, παρά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του. Όλες οι σύνθετες μέθοδοι επεξεργασίας ραντάρ θα μπορούσαν να εφαρμοστούν μέσω του λογισμικού LabVIEW Communications System Design Suite 2.0. Το κύριο πλεονέκτημα της χρήσης αυτού του λογισμικού είναι ότι παρέχει ένα πολύ φιλικό προς το χρήστη πλαίσιο για τη ρύθμιση των παραμέτρων του συστήματος.

9. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ

Οι επόμενες ενέργειες επικεντρώνονται στην κατασκευή πλήρους πραγματικού συστήματος με χρήση πραγματικών κεραιών και της παραπάνω έκδοσης ή βελτιωμένης έκδοσης αυτού. Βέβαια, για να υλοποιηθεί κάτι τέτοιο, απαιτείται μελέτη για την επιλογή των καταλληλότερων παραμέτρων λειτουργίας, όπως της τιμής της συχνότητας δειγματοληψίας, ανάλογα με της ανάγκες και τις απαιτήσεις της επιδιωκόμενης εφαρμογής. Σε κάθε περίπτωση, το κόστος εκτιμάται ότι θα κυμανθεί σε πολύ χαμηλά επίπεδα, όπως φαίνεται από την πληθώρα ανάλογων εφαρμογών που έχουν παρουσιασθεί τα τελευταία έτη στο Διαδίκτυο [25][26].

Το επόμενο βήμα θα ήταν η μελέτη για την τοποθέτηση ενός ειδικού πομπού με χαρακτηριστικά παρόμοια, π.χ. με σήματα FM ή TV, ο οποίος όμως θα είχε κατάλληλα χαρακτηριστικά, ώστε να διευκολύνει τον ή τους δέκτες. Με τη χρήση υψηλής ισχύος εκπομπής μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη εμβέλεια. Με τον τρόπο αυτό το ραντάρ γίνεται ενεργητικό πολυστατικό, με καλύτερη εμβέλεια και χαρακτηριστικά, διατηρώντας όμως τη δυνατότητα να μεταπέσει σε πλήρως παθητική λειτουργία, εάν απαιτηθεί (π.χ. σε περίπτωση δολιοφθοράς στον συνεργαζόμενο πομπό)[26].

Οι αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning-ML) στην επεξεργασία σήματος ραντάρ είναι από τα πιο ενδιαφέροντα θέματα αιχμής σήμερα – ειδικά όταν συνδυάζονται με pulse-Doppler ή stealth detection. Η επεξεργασία σήματος ραντάρ παραδοσιακά βασιζόταν σε προκαθορισμένα φίλτρα (π.χ. FFT, matched filters, Kalman), αλλά πλέον με τη Μηχανική Μάθηση έχουμε: i)Ανίχνευση στόχων με χαμηλό SNR, ii)Βελτιωμένο clutter rejection(π.χ. δένδρα, θάλασσα), iii)Αναγνώριση μοτίβων (π.χ. UAV vs πουλί), iv)Ανίχνευση stealth στόχων από Doppler ή RF signatures. Δημοφιλείς τύποι ML για ραντάρ:

Κατηγορία	Περιγραφή	Παραδείγματα
Supervised learning	Μαθαίνει με βάση ετικέτες (π.χ. "στόχος", "θόρυβος")	SVM, Random Forest, CNN
Unsupervised learning	Ομαδοποιεί σήματα χωρίς ετικέτες	K-Means, DBSCAN, Autoencoders
Deep Learning	Αυτόματη εξαγωγή χαρακτηριστικών	CNN, RNN, Transformers
Reinforcement Learning	Λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο (π.χ. adaptive beamforming)	Q-learning, DQN

Εφαρμογές ML στην Επεξεργασία Σήματος:

1. Target Detection / Classification

- ◆ Ανίχνευση μικρών ή stealth στόχων σε χαμηλό SNR
- ◆ Χρήση CNN ή LSTM για ανάλυση spectrogram (χρονική εξέλιξη Doppler)

2. Clutter Suppression

- ◆ Unsupervised ML για να μάθει τα χαρακτηριστικά του clutter (π.χ. έδαφος, θάλασσα)
- ◆ Adaptive filtering με reinforcement learning

3. Micro-Doppler Analysis

- ◆ Ανίχνευση χαρακτηριστικών κίνησης (π.χ. βάδισμα ανθρώπου, περιστροφή έλικα)
- ◆ RNN για ανάλυση χρονικών ακολουθιών

4. RF Fingerprinting

- Αναγνώριση συγκεκριμένων στόχων (UAVs, stealth jets) από μοναδικά χαρακτηριστικά του σήματος
- Deep learning για αναγνώριση παλμοσειρών ή μεταβολών φάσης

Με την χρήση του Internet of Things (IoT) θα ήταν δυνατή η αναγνώριση των μοντέλων των στόχων που ανιχνεύθηκαν εκμεταλλευόμενοι την υψηλή ανάλυση που προσφέρει το SDR σε συνδυασμό με τα σήματα DVB-T και το Doppler.

Μπορούν επίσης τα παθητικά ραντάρ να χρησιμοποιηθούν ως μέρος ενός συστήματος αντι-UAS(Unmanned Aerial Systems-Μη επανδρωμένα Εναέρια Συστήματα) για να αντιμετωπιστούν απειλές που θα δημιουργηθούν από τα παραπλανητικά UAS που πετούν πάνω από πολυσύχναστα περιβάλλοντα και κρίσιμες υποδομές [34].

Σε μια μελλοντική εργασία μπορεί να περιλαμβάνεται και η διερεύνηση τεχνικών για την συσχέτιση δεδομένων καθώς και η εφαρμογή μιας τεχνικής παρακολούθησης πολλών στόχων με βάση την εκτίμηση για την κατανομή των στόχων στο χρόνο και τον χώρο, χωρίς να είναι αναγκαία η παρακολούθηση ξεχωριστά κάθε στόχου ξεχωριστά, γνωστή ως φίλτρο Πυκνότητας Υπόθεσης Πιθανότητας (Probability Hypothesis Density-PHD). Το PHD filter χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η πυκνότητα πιθανότητας των στόχων και εφαρμόζεται συνήθως σε περιβάλλοντα στα οποία οι στόχοι εισέρχονται και εξέρχονται σε ένα σύστημα (π.χ., σε περιβάλλοντα με περιορισμένους αισθητήρες ή σε καταστάσεις υψηλής δυναμικής) ώστε να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της παρακολούθησης πολλών στόχων. Επιπρόσθετα, η διερεύνηση μιας τοπολογίας με πολλαπλά SDR επίσης θα βελτίωνε την ακρίβεια παρακολούθησης και την απόσταση ανίχνευσης [34].

Τέλος, ένα άλλο πεδίο έρευνας που να χρησιμοποιεί συσκευές SDR μπορεί να είναι το ευφύες ραντάρ. Φαίνεται να είναι η επόμενη γενιά ραντάρ με ιδιότητες προσαρμοστικότητας και διαφορετικότητας. Λαμβάνοντας υπόψη την ικανότητα ανασυγκρότησης και τον ορισμό του από το λογισμικό, το ραντάρ SDR θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την έρευνα σχετικά με την εφαρμογή και τον χαρακτηρισμό του ως πρώτου ευφυούς ραντάρ[19].

10. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Λαμβάνοντας υπόψη τη γεωπολιτική κατάσταση στην ευρύτερη περιοχή και κυρίως την απειλή εξ ανατολών, καθώς και τα μέσα που αυτή ήδη διαθέτει αλλά και αυτά που πρόκειται να παρατάξει στο εγγύς μέλλον, κρίνεται απαραίτητη η εξέταση δυνατότητας ανάπτυξης συστημάτων παθητικών ραντάρ ως τμήματος ενός ολοκληρωμένου συστήματος άμυνας της χώρας. Εκτιμάται ότι τα παθητικά ραντάρ καλύπτουν με μεγάλη αποτελεσματικότητα τα πολύ χαμηλά, τα χαμηλά, μέχρι και τα μεσαία ύψη, με ιδιαίτερη ικανότητα απέναντι σε στόχους Stealth, χωρίς να είναι δυνατόν να στοχοποιηθούν (καθότι δεν εκπέμπουν), ενώ παράλληλα το κόστος ανάπτυξης και λειτουργίας παραμένει σε πολύ χαμηλά επίπεδα (σε σχέση με τα συμβατικά ραντάρ). Κατόπιν τούτων, κρίνεται εφικτή, σκόπιμη αλλά και επωφελής η προσπάθεια εγχώριας ανάπτυξης παθητικών ραντάρ με τη βοήθεια της αμυντικής βιομηχανίας για σκοπούς εθνικής άμυνας καθώς και για ενδεχόμενες εξαγωγές σε τρίτες χώρες.

11. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. BOR A 550 - Army.gr.
2. BOR-A 550 - Radartutorial.
3. DEFENCEREVIEW.GR “Αποκλειστικό: Η διάταξη και οι δυνατότητες του Τουρκικού ΣΑΕ στο Αιγαίο” , Άρθρο
4. Griffiths, H. and Baker, C., «Passive Bistatic Radar», in Principles of Modern Radar: Radar Applications, Vol. 3 by W. L. Melvin and J. A. Scheer, Stevenage: SciTech, 2013.
5. Sisodia, M.L., Gupta, V.L., Agrawal J.P., «Microwave and Radar Engineering» Tunbridge Wells: Anshan, 2011.
6. https://en.wikipedia.org/wiki/Passive_radar
7. Stockman, H. Communication by means of reflected power. Proc. IRE 1948, 36, 1196–1204
8. AULOS, A Passive Covert Radar System | 2013-01-15 | Microwave Journal
9. Cassidian, “To see without being seen”, 2013.
[http://military-aircraft-airbusds.com/Portals/0/Images/Defence And Space Passive%20radar_To%20see%20without%20being%20seen.pdf](http://military-aircraft-airbusds.com/Portals/0/Images/Defence%20And%20Space%20Passive%20radar_To%20see%20without%20being%20seen.pdf)
10. F. Colone, P. Lombardo, and the RRSN Group – Dip. DIET, Univ. di Roma “La Sapienza” “Passive Coherent Location – Principles and on going activity at DIET”
11. Michele Conti Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Telecomunicazioni , Dario Petri Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Telecomunicazioni, Marco Martorella University of Birmingham, Fabrizio Berizzi Università di Pisa , “Ship Detection with DVB-T Software Defined Passive Radar” , October 2014.
12. Heiner Kuschel, Diego Cristallini, Fraunhofer, “Tutorial: Passive Radar Tutorial” Germany, February 2019
13. Rai, P.K.; Kumar, A.; Khan, M.Z.A.; Cenkeramaddi, L.R. LTE-based passive radars and applications: A review. Int. J. Remote Sens. 2021, 42, 7489–7518.
14. Peter Knott, Research Article “Design of a Printed Dipole Antenna Array for a Passive Radar System” , Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation Volume 2013, Article ID 179296, 6 pages
<http://dx.doi.org/10.1155/2013/179296>
15. William C. Barott, PhD & Brian Butka, PhD “A Passive Bistatic Radar for Detection of Aircraft Using Spaceborne Transmitters” Electrical, Computer, Software, and Systems Engineering Department, Embry-Riddle Aeronautical University, Daytona Beach, FL, 30th Digital Avionics Systems Conference October 18, 2011
16. Οικονόμου, Δ. και Νομικός, Π. «Παρουσίαση και Εξέταση Δυνατότητας Υλοποίησης Παθητικών Ραντάρ» Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ικάρων, 2014.
17. José M. Núñez-Ortuño , José P. González-Coma , Rubén Nocelo López , Francisco Troncoso-Pastoriza and María Álvarez-Hernández
“Beamforming Techniques for Passive Radar: An Overview” Defense University Center at the Spanish Naval Academy, 36920 Marín, Spain
18. Τσιμπουκής, Γ., «Παθητικοί Αισθητήρες Αεράμυνας: Η αδιαφορία της Πολιτείας για το ελληνικό σύστημα HEMPAS και το τουρκικό σύστημα PBAS/RF TAKIP», Viadiplomacy, 2 Φεβ. 2015.
<http://www.viadiplomacy.gr/pathitiki-esthitires-aeraminas-adiaforia-tis-politias-gia-elliniko-sisti-ma-hempas-ke-tourkiko-sistema-pbasrf-takip/>
19. Λιμναίος Γιώργος και Ζηκίδης Κωνσταντίνος “Παρουσίαση – Εξέταση Υλοποίησης Παθητικού Ραντάρ (PASSIVE RADAR)” , Αεροπορική Επιθεώρηση, τεύχος 107, Άρθρο , Αύγουστος 2016
20. <https://www.ettus.com/application/usrp-technology-for-multiband-passive-bi-static-radar/>
21. https://www.researchgate.net/figure/USRP-2920-block-diagram_fig1_236001015

22. Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh, and Rias Muhammed, “Fundamentals of WiMAX”, Understanding Broadband Wireless Networking, Prentice-Hall, 2007
23. https://www.researchgate.net/figure/L-Band-Software-Defined-Radar-System-block-diagram-a-and-prototype-configuration-b_fig2_308697183
24. <https://webthesis.biblio.polito.it/7630/1/tesi.pdf>
25. Costanzo S., Spadafora F., Di Massa G., Borgia A., Costanzo,A., Aloï G., Pace P., Loscri V. and Moreno H.O., «Potentialities of USRP-based Software Defined Radar Systems», Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 53, 2013, 417-435.
26. Vierinen, J., «Passive radar with \$16 dual coherent channel rtl sdr dongle receiver», Kaira, Sep. 26, 2013.
27. Willis, N.J., «Bistatic Radar», 2nd edition. Raleigh: SciTech, 2005.
28. Build a Passive Radar With Software-Defined Radio - IEEE Spectrum
29. Kaue Morceles, Independent Technical Writer, “How Software-Defined Radio is Advancing Radar Systems” | Microwaves & RF, Per Vices Corp., pervices.com
30. Volkwin, A., «Suitability of a Commercial Software Defined Radio System for Passive Coherent Location», Ph.D. dissertation, University of Cape Town, 2008.
31. Λογισμικό για ασύρματη ανάπτυξη|Busicom Post
32. Ettus Research USRP, Tom Tsou, 3rd OpenAirInterface Workshop April 28, 2017.
33. F. Berizzi, M. Martorella, D. Petri, M. Conti “USRP technology for multiband passive radar”, Department of Information Engineering, University of Pisa, Italy.
34. Άλλες πηγές: Παγκόσμιο Συνέδριο μη Επανδρωμένων Εναέριων Συστημάτων(ICUAS), Χανιά, 2024.
35. H. Zhang, L. Li, and K. Wu. “24GHz Software-Defined Radar System for Automotive Applications”. In: Proc. 10th Eur. Conf. Wireless Tech. (2007), pp. 138141.
36. María R. Fernández-Ruiz, Luis Costa and Hugo F. Martins “Distributed Acoustic Sensing Using Chirped-Pulse Phase-Sensitive OTDR Technology”, by 1.Department of Electronics, University of Alcalá, Alcalá de Henares, 28805 Madrid, Spain, 2.Instituto de Óptica, CSIC, 28006 Madrid, Spain
37. Διπλωματική Εργασία “Σχεδιασμός και Κατασκευή Παθητικού Ραντάρ με Χρήση SDR (Software Defined Radio)” Ρουμελιώτης Άγγελος , ΠΑ.Δ.Α. , Σχ. Μηχανικών , Τμήμα Ηλεκτρονικών & Ηλεκτρολόγων Μηχανικών , Φεβρουάριος 2025.
38. S. Costanzo, G. Di Massa, F. Spadafora, A. Raffo, A. Borgia, A. Costanzo, L. Morrone, “Radar Activity At University Of Calabria”, Conference Paper, Italy, September 2014

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία 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.