



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

«Σύγχρονες τεχνολογίες εντοπισμού θέσης»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Τρέμα Διονύσιου
321/2018/224

Επιβλέπων : Καθ. Δημοσθένης Βουγιούκας

Μέλη εξεταστικής επιτροπής : Καθ. Δημοσθένης Βουγιούκας, Επικ. Καθ. Κωνσταντίνος
Μαλιάτσος, Επικ. Καθ. Εμμανουήλ Καλλίγερος

Σάμος , Οκτώβριος 2023

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

Πρόλογος και ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του τμήματος Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Αιγαίου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας κύριο Δημοσθένη Βουγιούκα, αρχικά για την ευκαιρία αυτής της συνεργασίας, για την παραχώρηση εκπαιδευτικού υλικού, για την βοήθεια του, καθώς επίσης το χρόνο που αφιέρωσε, όπως και για τη δυνατότητα της συνεργασίας μου με την εταιρία ACTA Ltd . Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για το κουράγιο, τη στήριξη και τις συμβουλές που μου έδιναν τον καιρό αυτό.

© 2023

του

Τρέμα Διονύσιου

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πίνακας περιεχομένων

1	13
Εισαγωγή	13
1.1. Γενικά	13
1.2. Αντικείμενο διπλωματικής	14
1.3. Δομή της διπλωματικής	14
2	15
Γεωεντοπισμός θέσης	15
2.1. Γεωεντοπισμός και εύρεση κατεύθυνσης	16
2.2. Τυπικός Σχεδιασμός του Συστήματος εύρεσης κατεύθυνσης	17
2.2.1. Παράμετροι Απόδοσης	19
2.3. Γεωεντοπισμός και εκτίμηση κατεύθυνσης άφιξης	21
2.4. Κατηγορίες συστημάτων γεωεντοπισμού	24
2.5. Τεχνικές γεωεντοπισμού	26
2.6. Κεραίες και αισθητήρες στο γεωεντοπισμό	28
2.6.1. Κριτήρια επιλογής τοποθεσίας κεραιών	30
3	31
Τεχνικές Γεωεντοπισμού AoA, TDoA, Hybrid	31
3.1. Μέθοδος AoA - Angle of Arrival	31
3.1.1. Πλεονεκτήματα AoA τεχνικής	32
3.1.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων της τεχνικής AoA	34
3.1.3. Παραδείγματα AoA τεχνικής σήμερα	35
3.1.4. Χρήση κεραιών στην AoA	36
3.1.5. Βασικές εξισώσεις της μεθόδου AoA	37
3.2. Μέθοδος TDoA - Time Difference of Arrival	40
3.2.1. Πλεονεκτήματα TDoA τεχνικής	41
3.2.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων της τεχνικής TDoA	43
3.2.3. Παραδείγματα TDoA τεχνικής σήμερα	43
3.2.4. Χρήση κεραιών στην TDoA	44
3.2.5. Βασικές εξισώσεις της μεθόδου TDoA	44

3.3. Υβριδική μέθοδος (AoA -TDoA)	46
3.4. Σύγκριση επιδόσεων μεταξύ των τεχνικών AOA, TDOA και Hybrid	47
4	52
Μεθοδολογία υλοποίησης μετρήσεων γεωεντοπισμού AoA	52
4.1. Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε	52
4.1.1. ADFA κεραία	53
4.1.2. Walkie Talkie Motorola TLKR T92 H2O	54
4.1.3. FT-818ND	55
4.1.4. Decodio Localization software	55
4.1.5. SignalShark	56
4.1.5.1 Signal Shark λειτουργία – παραδείγματα real time	60
4.2. Η συμμετοχή σε αυτό το project, διαδικασία μετρήσεων και βαθμονόμησης	70
5	71
Υλοποίηση και αποτελέσματα μετρήσεων γεωεντοπισμού AoA	71
8.1. CV vs True angle	73
8.2. Error	74
8.3. MHz vs True angle	76
8.4. PWD vs True angle	78
8.5. Polar plots	80
8.5.1 Polar Plot PWD vs True angle	80
8.5.2 Polar Plot True angle vs Correction Value	82
6	91
Συμπεράσματα	91
7	93
Βιβλιογραφία	93

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 Τυπικός σχεδιασμός ενός συστήματος εύρεσης κατεύθυνσης.....	19
Εικόνα 2 Τα κυριότερα περιεχόμενα ενός συστήματος εύρεσης κατεύθυνσης	19
Εικόνα 3 Κατηγορίες συστημάτων γεωεντοπισμού	24
Εικόνα 4 Υπολογισμός απόστασης με τριγωνομετρία	27
Εικόνα 5 Ασύρματη μετάδοση μέσω κεραίων	28
Εικόνα 6 Απεικόνιση της AoA μεθόδου , τη στιγμή που έρχεται το σήμα στους δέκτες.....	32
Εικόνα 7 Απεικόνιση της κατεύθυνσης στην AoA μεθόδου, όσο κινείται ένας πομπός πιο μακριά τόσο μειώνεται η ακρίβεια της μεθόδου	34
Εικόνα 8 Παράδειγμα εφαρμογής της AoA στη διαχείριση κυκλοφορίας αεροπλάνων	35
Εικόνα 9 Γεωεντοπισμός με τον στόχο να γνωρίζει το προσανατολισμό του.....	38
Εικόνα 10 Γεωεντοπισμός με το στόχο να μη γνωρίζει το προσανατολισμό του	39
Εικόνα 11 Σχετικές AoA	39
Εικόνα 12 Πότε δύο σημεία ανήκουν στο ίδιο τόξο.....	39
Εικόνα 13 Αποτύπωση της TDoA μεθόδου όταν λαμβάνουν οι δέκτες το σήμα , το σημείο τομής είναι η cross – correlation.....	41
Εικόνα 14 Υπερβολικές καμπύλες που αναπαριστούν την διαφορά διαδρομής (D1-D2) από τις μετρήσεις δύο αισθητήρων TDoA (R1 και R2).	42
Εικόνα 15 Γεωεντοπισμός χρησιμοποιώντας τρεις αισθητήρες TDoA (τομή τριών υπερβολικών καμπυλών).	42
Εικόνα 16 Δύο σήματα εκπέμπουν ταυτόχρονα και φτάνουν μια διαφορά χρόνου Δt	45
Εικόνα 17 Γραφική παράσταση υπερβολής	45
Εικόνα 18 Απεικόνιση υβριδικής μεθόδου	47
Εικόνα 19 Απεικόνιση κεραίας ADFA με εφαρμογή στην οροφή αμαξίου και τα εσωτερικά της στοιχεία	54
Εικόνα 20 Walkie Talkie Motorola TLKR T92 H2O	54
Εικόνα 21 FT-818ND	55
Εικόνα 22 Setup του Decodio localizer/υβριδική μέθοδος.....	56
Εικόνα 23 Βήμα 1. Τοποθέτηση κεραίας ADFA στο πρώτο DF station	58
Εικόνα 24 Βήμα 2. Τοποθέτηση κεραίας ADFA στο δεύτερο DF station	58
Εικόνα 25 Εικονική λειτουργία του decodio software	59
Εικόνα 26 Οι 2 DF σταθμοί στο χάρτη	59
Εικόνα 27 Βήμα 3. Το heat map του signal shark όταν γίνεται μια άγνωστη εκπομπή	60
Εικόνα 28 Βήμα1 Signal Shark υλοποίηση, δημιουργία νέου task	60
Εικόνα 29 Οι τύποι των tasks	61
Εικόνα 30 Βήμα2 , ορίζουμε τη μορφή που θέλουμε για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων	62
Εικόνα 31 Βήμα3 ορίζουμε που θα βάλουμε το spectrogram.....	62

Εικόνα 32 Βλέπουμε την μορφή που θα έχει πριν βάλουμε τα αποτελέσματα	63
Εικόνα 33 Βήμα4 έχουμε τα αποτελέσματα και μπορούμε να μεγενθύνουμε ή να ελαχιστοποιήσουμε το σήμα	64
Εικόνα 34 Το μεγενθυμένο σήμα, παρατηρούμε τη διατήρηση της κεντρικής συχνότητας ..	64
Εικόνα 35 Βλέπουμε ότι το span έχει διπλασιαστεί.....	65
Εικόνα 36 Βελτιστοποίηση του πλάτους	65
Εικόνα 37 Βήμα5 Ενεργοποίηση του MxP, AnR για την εκτίμηση μέγιστων και ελαχίστων επιπέδων, για εξαγωγή συμπερασμάτων της ενδεχόμενης πηγής παρεμβολών	68
Εικόνα 38 παράδειγμα κυματομορφής παρεμβολών από ένα προβληματικό σύστημα, όπου βλέπουμε το περιορισμένο εύρος ζώνης του και τη συγκεκριμένη μορφή του.....	68
Εικόνα 39 Βήμα6 Εμφάνιση του τελικού αποτελέσματος, με τις ενδείξεις για το spectrum,bearing και το χάρτη. Βλέπουμε επίσης και μεγεθυμένη την RMS ισχύ του καναλιού	70
Εικόνα 40 Παράδειγμα από στιγμιότυπο φύλου excel για κατανόηση των στηλών στη πρώτη συχνότητα που μετρήθηκε. (Οι ίδιες στήλες και για τις υπόλοιπες συχνότητες).....	72

Κατάλογος διαγραμμάτων

Figure 1.Διάγραμμα Correction value - true angle 1η τοποθεσία	73
Figure 2.Διάγραμμα Correction value - true angle 2η τοποθεσία	74
Figure 3.Διάγραμμα Correction value - true angle 3η τοποθεσία	74
Figure 4.Διάγραμμα σφάλματος μέτρησης 1η τοποθεσία.....	75
Figure 5.Διάγραμμα σφάλματος μέτρησης 2η τοποθεσία.....	75
Figure 6.Διάγραμμα σφάλματος μέτρησης 3η τοποθεσία.....	76
Figure 7.Διάγραμμα MHz-true angle 1η τοποθεσία	77
Figure 8.Διάγραμμα MHz-true angle 2η τοποθεσία	77
Figure 9.Διάγραμμα MHz-true angle 3η τοποθεσία	78
Figure 10.Διάγραμμα pwd-true angle 1η τοποθεσία.....	79
Figure 11.Διάγραμμα pwd-true angle 2η τοποθεσία.....	79
Figure 12.Διάγραμμα pwd-true angle 3η τοποθεσία.....	80
Figure 13.Διάγραμμα Polar plot PWD 1η τοποθεσία.....	81
Figure 14.Διάγραμμα Polar plot PWD 2η τοποθεσία.....	82
Figure 15.Διάγραμμα Polar plot PWD 3η τοποθεσία.....	82
Figure 16.Διάγραμμα Polar plot CV 1ης τοποθεσίας	83
Figure 17.Διάγραμμα Polar plot CV 2ης τοποθεσίας	84
Figure 18.Διάγραμμα Polar plot CV 3ης τοποθεσίας	84
Figure 19.Διάγραμμα αρχική διόρθωση	85
Figure 20.Διάγραμμα διόρθωση χωρίς τις τιμές που προκαλούν μεγάλη τυπική απόκλιση	85
Figure 21.Διάγραμμα PWD (Μέση τιμή , Διάμεσος και τυπική απόκλιση).....	85

Figure 22.Διάγραμμα Μέση τιμή, Διάμεσος και τυπική απόκλιση για τη διόρθωση	86
Figure 23.Διάγραμμα Μέση τιμή, Διάμεσος και τυπική απόκλιση για την PWD.....	86
Figure 24.Διάγραμμα αρχική διόρθωση	87
Figure 25.Διάγραμμα τυπικής απόκλισης σε σχέση με true angle	87
Figure 26.Διάγραμμα μέσης τιμής σε σχέση με την true angle	88
Figure 27.Διάγραμμα Μέση τιμή , διάμεσος και τυπική απόκλιση για διόρθωση	88
Figure 28.Διάγραμμα Μέση τιμή , διάμεσος και τυπική απόκλιση για διόρθωση	89
Figure 29.Διάγραμμα Μέση τιμή , διάμεσος και τυπική απόκλιση για PWD	89
Figure 30.Διάγραμμα Μέση τιμή , διάμεσος και τυπική απόκλιση για PWD	90

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1 Σύγκριση των τριών μεθοδολογιών ανάλογα με τις επιδόσεις τους	50
---	----

Ακρωνύμια

AoA	Angle of Arrival
TDoA	Time Difference of Arrival
DF	Direction Finding
LoB	Line of Bearing
RF	Radio Frequency
DOA	Direction Of Arrival
RFID	Radio Frequency Identification
FPGA	Field Programmable Gate Arrays
ITU	International Telecommunication Union
HF	High Frequency
MUSIC	Multiple Signal Classification
ESPRIT	Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques
RSS	Received Signal Strength
FDOA	Frequency Difference of Arrival
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
ADFA	Automatic Direction Finding Antenna
EIBM	European Integrated Border Management
GNSS	Global Navigation Satellite System
VHF	Very High Frequency
UHF	Ultra High Frequency
LTE	Long-Term Evolution
RL	Reference Level
RMS	Root Mean Square

Περίληψη

Η διπλωματική εργασία εστιάζει στον γεωεντοπισμό θέσης με επίκεντρο τις τεχνικές AoA (Angle of Arrival), TDoA (Time Difference of Arrival) και τον συνδυασμό των δύο παραπάνω τεχνικών που καλείται υβριδική μέθοδος. Μέσω αναλυτικού συγκριτικού πίνακα, παραδειγμάτων εφαρμογών και αναφοράς στις απαραίτητες κεραίες-αισθητήρες, εξετάζει την αποτελεσματικότητα των εν λόγω τεχνικών. Το πρώτο κεφάλαιο περιλαμβάνει εισαγωγή στον γεωεντοπισμό θέσης και εστιάζει στην εύρεση κατεύθυνσης και στη σχεδίαση του τυπικού συστήματος γεωεντοπισμού. Καλύπτει επίσης τις κατηγορίες και τις τεχνικές γεωεντοπισμού, καθώς και τις απαιτούμενες κεραίες-αισθητήρες μαζί με τα βασικά κριτήρια επιλογής τοποθεσιών τους ώστε να έχουμε την καλύτερη δυνατή απόδοση. Το επόμενο κεφάλαιο εξετάζει αναλυτικά τις τρεις τεχνικές: την τεχνική AoA που βασίζεται στον υπολογισμό της γωνίας άφιξης, την τεχνική TDoA που βασίζεται στη διαφορά χρόνου άφιξης και την υβριδική τεχνική που συνδυάζει και τις δύο. Καταλήγει επίσης στο συμπέρασμα ότι η αποδοτικότερη τεχνική από τις τρεις είναι η υβριδική μιας και μας παρέχει καλύτερες μετρήσεις και απόδοση από όλες αφού συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο τεχνικών, με το μειονέκτημα όμως του υψηλού κόστους. Το τρίτο κεφάλαιο εστιάζει στη μεθοδολογία υλοποίησης των μετρήσεων γεωεντοπισμού AoA. Εδώ περιγράφεται και η συνεργασία μου με την εταιρία ACTA Ltd για βαθμονομήσεις (calibrations) που έλαβαν χώρα στην περιοχή του Έβρου στο ευρωπαϊκό πειραματικό πρόγραμμα "Nestor project", σε ήδη εγκατεστημένους σταθμούς εκεί, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων χρησιμοποιώντας, την τεχνική Angle of Arrival, πάνω σε ένα προηγμένο σύστημα παρακολούθησης και ανάλυσης ηλεκτρομαγνητικών σημάτων, που κατασκευάζεται από την εταιρεία Narda Safety Test Solutions και καλείται Signal Shark. Επίσης αναλύεται και η χρήση του συγκεκριμένου εργαλείου με κάποια στιγμιότυπα από το εν λόγω project. Τέλος γίνεται μια γραφική ανάλυση των μετρήσεων, που συλλέχθηκαν με τη μορφή διαγραμμάτων και την εξαγωγή συμπερασμάτων πάνω στη χρήση της τεχνικής AoA στο Nestor Project, που δεν απέδωσε τα αναμενόμενα, λόγω των άσχημων καιρικών συνθηκών που υπήρχαν και κάποιον ακόμα παραγόντων.

Λέξεις κλειδιά : γεωεντοπισμός, AoA, TDoA, Υβριδική μέθοδος

Abstract

This thesis's central point is on geolocation, focusing on the techniques AoA (Angle of Arrival), TDoA (Time Difference of Arrival) and the combination of the above two techniques called hybrid method. Through a detailed comparison table, examples of applications and reference to the necessary sensor-antennas, it examines the effectiveness of these techniques. The first chapter includes an intro to position geolocation and focuses on direction finding and the design of the typical geolocation system. It also covers the categories and techniques of geolocation, as well as the required sensors-antennas with the basic criteria for selecting their locations to obtain the best possible performance. The next chapter discusses analytically these three techniques: The AoA technique based on the angle of arrival calculation, the TDoA technique based on the time difference of arrival, and the hybrid technique that combines both. It also concludes that the most efficient technique of these three is by far the hybrid since it provides better measurements and performance than the others two since it combines the advantages of the two techniques, but with the disadvantage of high cost. Also, the third chapter focuses on the methodology for implementing AoA geolocation measurements. Here is described my collaboration with ACTA Ltd for calibrations that took place in the Evros region for the European experimental project called "Nestor Project", on already installed stations there, in order to reach a conclusion export using the Angle of Arrival method, on an advanced electromagnetic signal monitoring and analysis system, manufactured by Narda Safety Test Solutions, called Signal Shark. The usage of this tool is also analyzed with some screenshots for this project. Finally, a graphical analysis of the measurements collected in the form of diagrams and conclusions are drawn on the use of AoA technique in the Nestor Project, which didn't perform as expected, due to the bad weather conditions that existed and some other factors.

Key words: geolocation, AoA, TDoA, Hybrid methods

1

Εισαγωγή

1.1.Γενικά

Η εποχή μας που καλείται η εποχή των σύγχρονων τεχνολογιών είναι αδιαμφισβήτητο γεγονός ότι έχει φέρει αρκετά σημαντικές αλλαγές σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης ζωής, επηρεάζοντας έτσι ριζικά τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούμε με το περιβάλλον. Ένας από τους τομείς που έχει ωφεληθεί σε υψηλό βαθμό από την τεχνολογική επανάσταση είναι ο γεωεντοπισμός. Η ανάγκη που υπάρχει πλέον για ακριβείς και αξιόπιστες μεθόδους εντοπισμού θέσης έχει ενισχυθεί πολύ περισσότερο στον σύγχρονο κόσμο, όπου οι εφαρμογές από την πλοήγηση και την διαχείριση της κυκλοφορίας μέχρι τις τηλεπικοινωνίες και την ασφάλεια βασίζονται στην ακριβή και αποτελεσματική παρακολούθηση της θέσης. Σε αυτό το πλαίσιο, εκδηλώνεται μεγάλο ενδιαφέρον για τις μεθόδους θέσης βασισμένες σε λαμβανόμενα σήματα, όπως οι τεχνικές εντοπισμού άφιξης κατευθύνσεων (AoA - Angle of Arrival), εντοπισμού διαφοράς χρόνου άφιξης (TDoA - Time Difference of Arrival) και η συνδυασμένη-υβριδική μέθοδος (Hybrid). Οι προαναφερθείσες μέθοδοι ανταποκρίνονται με αρκετά αποτελεσματικό τρόπο στην ανάγκη για ακρίβεια και αξιοπιστία στον γεωεντοπισμό, αντιμετωπίζοντας συγχρόνως προκλήσεις όπως οι πολυπλοκότητες του περιβάλλοντος και η ανακρίβεια των μετρήσεων.

Η AoA εστιάζει στη μέτρηση της γωνίας άφιξης ενός σήματος από πολλαπλές κατευθύνσεις, ενώ η TDoA βασίζεται στον υπολογισμό της διαφοράς χρόνου άφιξης του σήματος σε διάφορα σημεία πομποδέκτη. Οι υβριδικές μέθοδοι κάνουν συνδυασμό αυτών των προσεγγίσεων, ώστε να επιτύχουν ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια και ανθεκτικότητα σε αστάθειες και παρεμβολές. Καθώς βρισκόμαστε στην εποχή που η ακρίβεια και η αξιοπιστία αποτελούν από τα σημαντικότερα κριτήρια, η εμβάθυνση στις σύγχρονες τεχνολογίες εντοπισμού θέσης αναδεικνύει τη δυναμική τους να μετασχηματίσουν τον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε και αλληλεπιδρούμε με τον κόσμο γύρω μας. Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αναλύει με λεπτομέρεια τις παραπάνω τεχνικές, ανακαλύπτοντας τις

εφαρμογές τους, τα πλεονεκτήματά και μειονεκτήματα τους, προσφέροντας έτσι μια εμβριθή κατανόηση της εξέλιξης που διαμορφώνει τον μεταβαλλόμενο χάρτη της τεχνολογίας και του γεωεντοπισμού.

1.2.Αντικείμενο διπλωματικής

Στη παρούσα διπλωματική αναλύονται σύγχρονες τεχνολογίες εντοπισμού θέσης και πιο συγκεκριμένα οι εξής μέθοδοι : Angle of Arrival (AoA), Time Difference of Arrival (TDoA), Υβριδική μέθοδος (AoA - TDoA). Παράλληλα γίνεται αναφορά στο γεωεντοπισμό θέσης αντικειμένου και αναλύεται η διαδικασία εύρεσης κατεύθυνσης του, ο σχεδιασμός ενός τέτοιου συστήματος, τεχνικές και κατηγορίες γεωεντοπισμού, καθώς και ο ρόλος των αισθητήρων και των κεραιών σε ένα τέτοιο σύστημα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται πραγματικά αποτελέσματα με τη μεθοδολογία της AoA για την υλοποίηση μετρήσεων γεωεντοπισμού. Στόχος της διπλωματικής αυτής είναι η μελέτη αυτών των τεχνικών γεωεντοπισμού θέσης και των γεωγραφικών συστημάτων και η υλοποίηση σε ένα πραγματικό σύστημα γεωεντοπισμού θέσης χρησιμοποιώντας την τεχνική AoA. Τέλος, αναφέρονται μερικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων των μετρήσεων που έλαβαν χώρα.

1.3.Δομή της διπλωματικής

Η πρώτη ενότητα αναφέρεται στο γεωεντοπισμό θέσης, στην εύρεσης κατεύθυνσης με γεωεντοπισμό, στη συνέχεια αναλύεται ο τυπικός σχεδιασμός ενός συστήματος εύρεσης κατεύθυνσης καθώς και τους παράμετρούς απόδοσης του. Έπειτα περιγράφεται ο γεωεντοπισμός και η εκτίμηση κατεύθυνσης άφιξης ενός αντικειμένου, οι κατηγορίες και οι τεχνικές συστημάτων γεωεντοπισμού και τέλος λίγα λόγια για τις κεραιές και τους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται σε ένα τέτοιο σύστημα. Στην δεύτερη ενότητα αναλύονται οι τρεις μέθοδοι γεωεντοπισμού AoA, TDoA, Υβριδική, με παραδείγματα για τη κάθε μέθοδο, τα πλεονεκτήματά της, καθώς και παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοσή τους. Στο τέλος αυτής της ενότητας παρουσιάζεται μια συγκριτική μελέτη μεταξύ των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων της κάθε μια τεχνικής. Στη τρίτη ενότητα αναλύεται η μεθοδολογία υλοποίησης μετρήσεων γεωεντοπισμού AoA όπου περιγράφεται το πρόγραμμα NESTOR περιληπτικά, ο εξοπλισμός, η διαδικασία μέτρησης, και η διαδικασία βαθμονόμησης. Στην επόμενη ενότητα αναδεικνύεται η υλοποίηση και τα αποτελέσματα μετρήσεων γεωεντοπισμού AoA , όπου αναφέρεται στη μεθοδολογία μετρήσεων, στα μετρούμενα και στα εξαγόμενα μεγέθη, καθώς και στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Τέλος στη τελευταία ενότητα εξάγονται κάποια συμπεράσματα και κάποιες πιθανές λύσεις για καλύτερα αποτελέσματα.

2

Γεωεντοπισμός θέσης

Ο γεωεντοπισμός θέσης [1] αποτελεί τεχνική αναγνώρισης ή εκτίμησης της πραγματικής γεωγραφικής θέσης ενός αντικειμένου, όπως είναι μια πηγή ραντάρ, ένα κινητό τηλέφωνο, ένας ραδιοφωνικός ή τηλεοπτικός σταθμός εκπομπής. Στην απλούστερη μορφή ο γεωγραφικός εντοπισμός συνεπάγεται τη δημιουργία ενός συνόλου γεωγραφικών συντεταγμένων όπως το γεωγραφικό πλάτος, το γεωγραφικό μήκος καθώς και το ύψος και είναι στενά συνδεδεμένος με τη χρήση συστημάτων εντοπισμού θέσης. Η χρησιμότητα του ενισχύεται από τη χρήση αυτών των συντεταγμένων για το προσδιορισμό μιας σημαντικής θέσης, όπως είναι για παράδειγμα η εύρεση ενός παράνομου ραδιοφωνικού σταθμού που δεν έχει αδειοδοτηθεί και προκαλεί παρεμβολή σε άλλους σταθμούς που έχουν νομίμως λάβει άδεια. Αυτό γίνεται συνήθως χρησιμοποιώντας ένα δορυφορικό σύστημα όπως το GPS, αλλά μπορεί επίσης να γίνει με άλλους τρόπους, όπως ο υπολογισμός της απόστασης από ένα γνωστό σημείο στο έδαφος, με τον υπολογισμό της γωνίας των σημάτων στο χώρο, με τον υπολογισμό των χρόνων που φτάνουν τα σήματα στον δέκτη ή με χρήση πληροφοριών από ένα κινητό τηλέφωνο. Ο γεωεντοπισμός θέσης είναι ιδιαίτερα σημαντικός σε πολλούς τομείς, όπως οι μεταφορές (κίνηση αεροπλάνων), η παρακολούθηση της αλλαγής του κλίματος, η επιστήμη του περιβάλλοντος, η ασφάλεια και η άμυνα ενός κράτους κ.α. Επιπλέον, ο γεωεντοπισμός θέσης έχει γίνει πολύ πιο διαδεδομένος σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς η τεχνολογία έχει εξελιχθεί και έχει καταστεί πιο προσιτή και ευρέως χρησιμοποιούμενη. Οι εφαρμογές του γεωεντοπισμού θέσης έχουν επίσης διευρυνθεί, καθώς η τεχνολογία έχει εξελιχθεί και έχει καταστεί πιο εύκολο να συλλέγονται και να αναλύονται δεδομένα γεωτοποθεσίας σε πραγματικό χρόνο. Υπάρχουν πολλές τεχνικές γεωεντοπισμού θέσης, όπως οι δορυφορικές τεχνολογίες, οι τεχνικές βασισμένες σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, οι τεχνικές βασισμένες σε Wi-Fi και Bluetooth, οι τεχνικές βασισμένες σε RFID (είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί ραδιοκύματα για την αυτόματη αναγνώριση αντικειμένων. Συγκεκριμένα, αποτελείται από μια μικρή ετικέτα που περιέχει ένα μικροσίπ και μια κεραία που εκπέμπει ένα ραδιοσήμα που μπορεί να διαβαστεί από έναν αναγνώστη RFID), καθώς και η χρήση αισθητήρων και κεραιών σε διάφορα αντικείμενα, όπως αυτοκίνητα

, κεραίες κινητής τηλεφωνίας , ακόμα και σε ανθρώπους. Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθούν και οι εφαρμογές του γεωεντοπισμού θέσης σε διάφορους τομείς όπως :

1) Πλοήγηση και χαρτογράφηση: Η τεχνολογία γεωεντοπισμού χρησιμοποιείται σε ψηφιακούς χάρτες και συστήματα πλοήγησης GPS για την καταγραφή και αναγνώριση τοποθεσιών, την καταγραφή πληροφοριών τοποθεσίας και την αυτόματη καταγραφή διαδρομών.

2) Παρακολούθηση και ασφάλεια: Η τεχνολογία γεωεντοπισμού χρησιμοποιείται σε συστήματα ασφαλείας και υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης για την παρακολούθηση της θέσης και της κίνησης ατόμων και οχημάτων, τον εντοπισμό και τον αποκλεισμό επικίνδυνων περιοχών ή καταστάσεων και την εύρεση ατόμων σε περίπτωση που εξαφανιστούν.

3) Επιστημονικές Εφαρμογές: Η τεχνολογία γεωεντοπισμού χρησιμοποιείται σε επιστημονική έρευνα και περιβαλλοντικές μελέτες για την καταγραφή δεδομένων σχετικά με τις μετακινήσεις ζώων και ειδών, την παρακολούθηση και τον έλεγχο των θαλάσσιων και εναέριων αποστολών και τη διαχείριση των φυσικών πόρων και της γεωργικής παραγωγής.

Βέβαια ο γεωεντοπισμός θέσης αντιμετωπίζει αρκετές προκλήσεις. Ορισμένες από αυτές είναι οι εξής:

1)Ακρίβεια: Η ακρίβεια του γεωεντοπισμού θέσης μπορεί να επηρεαστεί από διάφορους παράγοντες, όπως η πυκνότητα των σημάτων, η ανακρίβεια των σημάτων, οι συνθήκες καιρού, το φυσικό περιβάλλον και η επιρροή των γειτονικών συσκευών. Ακόμα μπορεί να επηρεαστεί και από παράγοντες όπως η κακή σύνδεση στο διαδίκτυο .

2) Ασφάλεια: Η ασφάλεια αποτελεί σημαντική πρόκληση στον γεωεντοπισμό θέσης. Οι χρήστες πρέπει να διασφαλίζουν ότι τα δεδομένα τους παραμένουν ιδιωτικά και ασφαλή, καθώς κάποια συστήματα μπορεί να είναι ευάλωτα σε επιθέσεις.

3) Υποστήριξη συσκευών: Ο γεωεντοπισμός θέσης απαιτεί τη χρήση συσκευών που είναι συμβατές με τις τεχνολογίες γεωεντοπισμού. Επομένως, η συνεχής υποστήριξη και αναβάθμιση των συσκευών αποτελεί μια πρόκληση.

2.1. Γεωεντοπισμός και εύρεση κατεύθυνσης

Στις τηλεπικοινωνίες, το DF αναφέρεται στο Direction Finding, δηλαδή στην ανίχνευση της κατεύθυνσης προέλευσης ενός σήματος. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για να εντοπίσει τη θέση προέλευσης μιας πηγής σήματος, όπως για παράδειγμα μιας εκπομπής ραδιοφωνικού σταθμού ή ενός κινητού τηλεφώνου. Η δυνατότητα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλούς τομείς των τηλεπικοινωνιών, όπως για παράδειγμα στην ανίχνευση της κατεύθυνσης προέλευσης ενός σήματος που προκαλεί παρενόχληση σε ένα δίκτυο τηλεπικοινωνιών.

Ο γεωεντοπισμός και η ανίχνευση κατεύθυνσης (DF) ταυτίζονται στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών. Η ανίχνευση κατεύθυνσης είναι η διαδικασία όπου καθορίζει τη φυσική κατεύθυνση από την οποία προέρχεται ένα σήμα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση κεραιών για παράδειγμα. Στο πλαίσιο του γεωεντοπισμού, η ανίχνευση κατευθύνσεων χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης από την οποία προέρχεται ένα σήμα. Αυτό βοηθάει αρκετά ώστε να προσδιορίσουμε τη θέση του ασύρματου πομπού ή για την παρακολούθηση κινούμενων σημείων. Ο στόχος της ανίχνευσης κατεύθυνσης είναι ο καθορισμός του line of bearing (LoB) οποιουδήποτε τύπου ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (π.χ. ενός πομπού ραδιοφώνου), χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες διάδοσης των ραδιοκυμάτων. Το Line of Bearing είναι μια νοητή γραμμή που σχετίζεται με την κατεύθυνση του σήματος που εκπέμπεται από τον πομπό και λαμβάνεται από τον δέκτη. Ουσιαστικά ορίζει την κατεύθυνση του πομπού από τη θέση του δέκτη, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιοριστεί η θέση του πομπού στο χάρτη.

Η σύνδεση πολλών ανιχνευτών κατεύθυνσης δίνει τη δυνατότητα γεωεντοπισμού πηγών ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως: Πομπούς σε κατάσταση κινδύνου, μη-εξουσιοδοτημένους πομπούς, πομπούς παρεμβολών, που δεν δύναται να εντοπιστούν με άλλα μέσα, αναγνώριση γνωστών και αγνώστων πομπών σε διάφορα μέρη όπως επίγεια ή θαλάσσια σύνορα. Ο αισθητήρας που καθορίζει τη γωνία άφιξης του σήματος ή το αζιμούθιο (και την ανύψωση για τις συχνότητες HF (high frequency)), σε σχέση με μια κατεύθυνση αναφοράς, ονομάζεται ανιχνευτής κατεύθυνσης. Ουσιαστικά όμως, οι προδιαγραφές που χαρακτηρίζουν τους ανιχνευτές κατεύθυνσης σύμφωνα με την ITU είναι : Η ακρίβεια, η ευαισθησία, η ανοχή σε παραμορφωμένα κύματα, η αντοχή σε φαινόμενα αποπόλωσης, οι επιπτώσεις των ομοκαναλικών παρεμβολών και ο ελάχιστος χρόνος διάρκειας του σήματος.

2.2. Τυπικός Σχεδιασμός του Συστήματος εύρεσης κατεύθυνσης

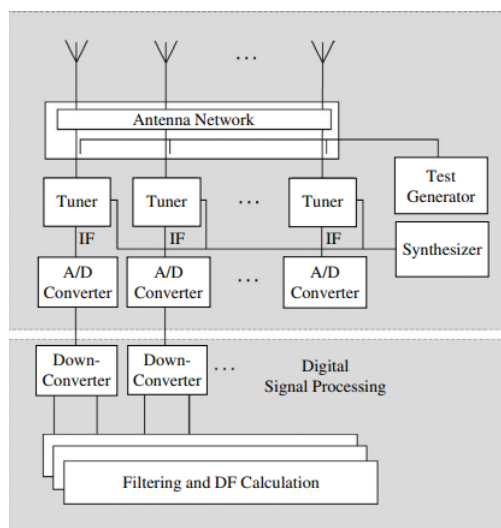
Όλα τα τελευταία συστήματα εύρεσης κατεύθυνσης χρησιμοποιούν τη δομή που φαίνεται στο Σχήμα παρακάτω. Όπως φαίνεται, τα N σήματα εξόδου από χωρικά κατανεμημένα στοιχεία κεραίας αντιστοιχίζονται σε ένα δίκτυο RF μεταξύ H συνεκτικών καναλιών μέτρησης, ψηφιοποιούνται και τροφοδοτούνται σε μια μονάδα επεξεργασίας σήματος όπου χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση παραμέτρων ενδιαφέροντος όπως [3,8]

- Αριθμός προσπίπτοντων κυμάτων (ανίχνευση)
- Αζιμούθιο και ανύψωση των ανιχνευθέντων κυμάτων
- Πόλωση των ανιχνευόμενων κυμάτων
- Επίπεδα ισχύος, σήματα διαμόρφωσης

Ο σχεδιασμός του συστήματος περιλαμβάνει φάσεις όπως η ψηφιοποίηση των σημάτων, ο φιλτραρισμός και οι αλγόριθμοι εκτίμησης κατευθύνσεων. Η επεξεργασία των σημάτων

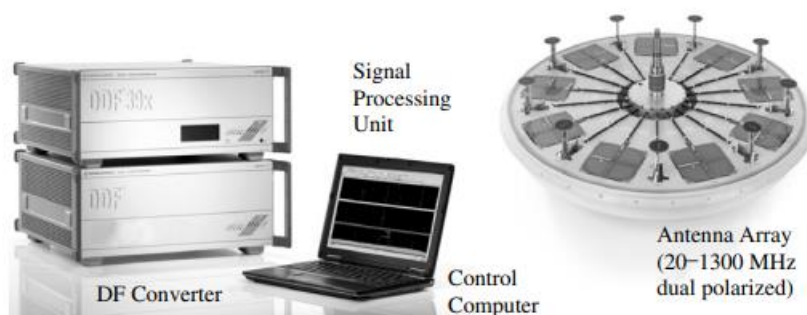
περιλαμβάνει τη χρήση πυλών πεδίου προγραμματιζόμενης λογικής (FPGAs) για την ταχεία επεξεργασία και κανονικούς υπολογιστές για την περαιτέρω ανάλυση των παραμέτρων. Το σύστημα είναι επίσης συνδεδεμένο με υπολογιστές για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή των κυματομορφών των σημάτων.

Πριν από τη ψηφιοποίηση των σημάτων απαιτείται φιλτράρισμα και οι αναλογικοί/ψηφιακοί μετατροπείς (ADC) δεν επιτρέπουν την επεξεργασία στη συχνότητα των σημάτων της κεραίας -μετατροπή σε κατάλληλη ενδιάμεση συχνότητα (IF-συντονιστής) . Το σήμα εισόδου αναμειγνύεται σε ένα ή περισσότερα στάδια με ένα μη διαμορφωμένο σήμα και το αποτέλεσμα φιλτράρεται στη συχνότητα αθροίσματος ή διαφοράς (που αντιστοιχεί στην ενδιάμεση συχνότητα). Για την επακόλουθη αξιολόγηση των διαφορών φάσης, απαιτείται συνεκτική συμπεριφορά από τα κανάλια μέτρησης. Κατά συνέπεια, στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται ένας κοινός τοπικός ταλαντωτής (συνθέτης) για τη μετατροπή συχνότητας μαζί με κοινές πηγές ρολογιού για την αναλογική-ψηφιακή (A/D) μετατροπή. Στο επίπεδο επεξεργασίας ψηφιακού σήματος, τα σήματα μετατρέπονται πρώτα σε σύνθετη βασική ζώνη. Ακολουθεί το κύριο φιλτράρισμα, το οποίο, ανάλογα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή, γίνεται είτε με τη μορφή τράπεζας φίλτρων είτε για ένα επιλεγμένο κεντρικό κανάλι στην περίπτωση απλών συστημάτων εντοπισμού κατεύθυνσης που περιλαμβάνουν σήματα στενής ζώνης. Οι τράπεζες φίλτρων χρησιμοποιούνται σε ευρυζωνικά συστήματα εύρεσης κατεύθυνσης. Κατά τη διάρκεια του επόμενου βήματος επεξεργασίας, συλλέγεται μια ποσότητα δειγμάτων που καθορίζεται με βάση τον επιλεγμένο μέσο χρόνο και τροφοδοτείται στους αλγορίθμους για την εκτίμηση των προσανατολισμών και οποιωνδήποτε άλλων παραμέτρων ενδιαφέροντος. Αυτό το τμήμα της επεξεργασίας περιλαμβάνει συνήθως τη χρήση FPGA λόγω της απαραίτητης υψηλής ταχύτητας επεξεργασίας και της στενής σύνδεσης με το hardware. Για την περαιτέρω επεξεργασία των εκτιμώμενων παραμέτρων χρησιμοποιούνται συνήθως τυπικοί επεξεργαστές, όπως αυτοί που υπάρχουν στους σημερινούς Η/Υ. Όλοι οι υπολογισμοί που δεν υπόκεινται σε δύσκολες απαιτήσεις πραγματικού χρόνου εκτελούνται εδώ, όπως υπολογισμός δεδομένων θέσης και πυξίδας, διαχείριση του hardware του συστήματος κ.α.



Εικόνα 1 Τυπικός σχεδιασμός ενός συστήματος εύρεσης κατεύθυνσης

Οι τυπικοί Η/Υ χρησιμοποιούνται για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων και για την έξοδο ή/και την καταγραφή των κυματομορφών σε επίπεδο βασικής ζώνης, καθώς και για τα αποδιαμορφωμένα σήματα. Στο σχήμα παρακάτω παρουσιάζονται τα στοιχεία ενός πρακτικού συστήματος DF για το εύρος συχνοτήτων από 20 MHz έως 3 GHz.



Εικόνα 2 Τα κυριότερα περιεχόμενα ενός συστήματος εύρεσης κατεύθυνσης

2.2.1. Παράμετροι Απόδοσης

Για να εξασφαλιστεί η ορθή λειτουργία ενός συστήματος εύρεσης κατεύθυνσης πρέπει να πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις, αυτές είναι οι εξής [2,3,9]:

- Υψηλή ακρίβεια

Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) του σήματος επιλέγεται να είναι αρκετά υψηλός ώστε να μπορεί να αμεληθεί η πιθανότητα σφαλμάτων που προκαλείται από το θόρυβο.

* για τον χαρακτηρισμό των σφαλμάτων χρησιμοποιείται η μέση τετραγωνική τιμή (RMS). Στην περιοχή συχνοτήτων από 1 MHz έως 3 GHz, αναμένονται σφάλματα μεταξύ 1° και 2° RMS σε εμπορικά συστήματα εντοπισμού κατεύθυνσης.

* Η μέση τετραγωνική (RMS) ισχύς ενός καναλιού αναφέρεται στο μέσο τετράγωνο της τιμής της ισχύος του σήματος κατά μήκος ενός χρονικού διαστήματος, και μετά τη λήψη της τετραγωνικής ρίζας αυτού του μέσου. Ουσιαστικά αποτελεί ένα μέτρο της συνολικής ισχύος που μεταφέρεται μέσω ενός σήματος ή καναλιού. Στις τηλεπικοινωνίες, η RMS ισχύς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει την πραγματική ισχύ που μεταφέρεται μέσω ενός καναλιού ή μέσω ενός σήματος, λαμβάνοντας υπόψη τις διακυμάνσεις και τη μορφή του σήματος. Αυτό είναι χρήσιμο ειδικά όταν η ισχύς του σήματος μεταβάλλεται με τον χρόνο, όπως στις ασύρματες επικοινωνίες, και χρειαζόμαστε ένα μέτρο που να αποτυπώνει το μέσο όρο της ισχύος σε αυτές τις μεταβολές.

- Υψηλή ευαισθησία

Η ευαισθησία ενός κατευθυντήρα σημαίνει την ικανότητά του να παράγει ακριβή αποτελέσματα εντοπισμού κατεύθυνσης ακόμη και όταν αντιμετωπίζει σήματα χαμηλού πλάτους. Η καλύτερη δυνατή ευαισθησία που μπορεί να επιτευχθεί εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος της συστοιχίας κεραιών, το κέρδος και το συντελεστής θορύβου των στοιχείων της κεραίας, το συντελεστής θορύβου του μετατροπέα DF και το χρόνος μέτρησης.

- Ανοχή στην παραμόρφωση του λαμβανόμενου πεδίου κύματος ως αποτέλεσμα της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών

Υπό κανονικές συνθήκες, η διάδοση των κυμάτων μεταξύ του πομπού και του κατευθυντήρα διακόπτεται από κάποια φυσικά φαινόμενα όπως κτίρια, βουνά, λόφους κ.α. Ακόμη και αν έχουμε άμεση οπτική επαφή, εξακολουθούν να προκύπτουν δευτερεύοντα κύματα, λόγω ανάκλασης, διάθλασης και περίθλασης, τα οποία στη συνέχεια υπερτίθενται στο άμεσο κύμα στη θέση λήψης ως πεδία παρεμβολής. Εάν η συνιστώσα των παρεμβαλλόμενων κυμάτων έχει χαμηλότερη στάθμη ισχύος από την επιθυμητή συνιστώσα κυμάτων, το σφάλμα διόπτευσης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με την επιλογή κατάλληλων διαστάσεων στον κατευθυντήρα.

- Σταθερή απόδοση σε περίπτωση συνδυαστικών παρεμβαλλόμενων σημάτων

Σε αντίθεση με την παρεμβολή πολλαπλών διαδρομών, τα σήματα που παρεμβάλλονται από το ίδιο κανάλι εμφανίζονται συνήθως στη διεύθυνση με τη μορφή ασυσχέτιστων σημάτων εντός της ζώνης συχνοτήτων που περιέχει το σήμα ενδιαφέροντος. Αυτό μπορεί να προκληθεί, για παράδειγμα, από ηλεκτρικό εξοπλισμό και συστήματα (σπινθήρες σε διακόπτες και απορροφητήρες ισχύος), από ακατάπαυστη χρήση του πομπού, ή ελαττωματικών συστημάτων μετάδοσης

- Μικρή ελάχιστη διάρκεια σήματος

Οι προηγμένες τεχνικές μετάδοσης χρησιμοποιούν μερικές φορές πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου (TDMA) ή μεταπήδηση συχνότητας. Η εύρεση κατεύθυνσης είναι δυνατή με τέτοια σήματα μόνο εάν μπορούμε να επεξεργαστούμε τα σήματα της κεραίας με επαρκή ταχύτητα και με τον απαιτούμενο λόγο σήματος προς θόρυβο και να τα καταστήσουμε διαθέσιμα για χρήση στον υπολογισμό των προσανατολισμών. Οι μικρές διάρκειες σήματος συνεπάγονται επίσης ότι λίγα στιγμιότυπα είναι διαθέσιμα για τον υπολογισμό του μέσου όρου, οπότε απαιτούνται μεγαλύτερα συστήματα κεραιών για να προσεγγιστεί η ίδια ευαισθησία που είναι διαθέσιμη με συνεχή σήματα.

- Υψηλή ταχύτητα αναζήτησης και πιθανότητα αναχαίτισης σε ανιχνευτές κατεύθυνσης σάρωσης

Για την αξιόπιστη αναχαίτιση και τον εντοπισμό κατεύθυνσης με σήματα που έχουν άγνωστη συχνότητα, το πιθανό εύρος συχνοτήτων πρέπει να επεξεργάζεται εντός ενός χρονικού διαστήματος που είναι όσο το δυνατόν μικρότερο σε σύγκριση με τη διάρκεια εκπομπής του σήματος ενδιαφέροντος.

2.3. Γεωεντοπισμός και εκτίμηση κατεύθυνσης άφιξης

Η εκτίμηση της κατεύθυνσης άφιξης (DOA) αφορά ουσιαστικά την εκτίμηση της κατεύθυνσης άφιξης των σημάτων, είτε με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών είτε ακουστικών κυμάτων που προσπίπτουν σε έναν αισθητήρα ή μια συστοιχία κεραιών. Η απαίτηση για εκτίμηση προκύπτει από τις ανάγκες εντοπισμού και παρακολούθησης πηγών σήματος όπως για περιπτώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω (εύρεση ενός παράνομου ραδιοφωνικού σταθμού που δεν έχει αδειοδοτηθεί και προκαλεί παρεμβολή σε άλλους σταθμούς που έχουν νομίμως λάβει άδεια , η εύρεση ενός κινητού τηλεφώνου σε έναν σεισμό , η εύρεση επίδοξων εισβολέων σε σύνορα κρατών κ.α.). Οι εφαρμογές της ασύρματης τεχνολογίας έχουν εξαπλωθεί σε πολλούς τομείς, όπως η περιβαλλοντική παρακολούθηση, τα δίκτυα αισθητήρων, η δημόσια ασφάλεια και η έρευνα και διάσωση. Υπό το πρίσμα αυτών των εξελίξεων έχουν θεσπιστεί πολλές τεχνολογικές πολιτικές για την ικανοποίηση των αναγκών των διαφόρων απαιτήσεων. Όλες αυτές οι εφαρμογές ίσως μπορούν να θεωρηθούν ως το κύριο λόγο για το πρόσφατο αυξημένο ενδιαφέρον του καθορισμού της direction of arrival (κατεύθυνση άφιξης) DOA των ασύρματων σημάτων στα ασύρματα συστήματα. Στη πραγματικότητα η εκτίμηση της DOA διαφόρων ασύρματων σημάτων που προσπίπτουν σε μια περιοχή αισθητήρων απαιτείται και σε μία σειρά άλλων εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των ραντάρ, σόναρ, σεισμολογία. Μία άλλη τεχνολογία που είναι εξίσου σημαντική είναι η τεχνολογία έξυπνων κεραιών. Σε αυτή ο DOA αλγόριθμος εκτίμησης συνήθως είναι ενσωματωμένος ώστε να αναπτύξει ένα σύστημα που θα παρέχει ακριβείς πληροφορίες τοποθεσίας για ασύρματες υπηρεσίες.

Οι αλγόριθμοι εκτίμησης DOA αποτελούν την καρδιά των συστημάτων έξυπνων κεραιών. Γενικά, υπάρχουν αρκετοί DOA estimation αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται σε ένα σύστημα μιας έξυπνης κεραίας που στοχεύουν σε εφαρμογές εντοπισμού θέσης, ενώ αναδύονται και άλλοι. Κάποιοι από τους αλγόριθμους αυτούς είναι :

MUSIC [2]: Αποτελεί έναν από τους πιο διαδεδομένους αλγόριθμους για την εκτίμηση DOA. Βασίζεται στην ανάλυση του υποχώρου σήματος – θορύβου για να προσδιορίσει την κατεύθυνση προέλευσης σημάτων, λειτουργεί σε μια συστοιχία αισθητήρων ή κεραιών, οι οποίες μετρούν τα λαμβανόμενα σήματα. Ακολουθεί μια πιο λεπτομερής εξήγηση του τρόπου λειτουργίας του αλγορίθμου:

1) Συλλογή δεδομένων : Συλλέγονται οι μετρήσεις από τους αισθητήρες για το σήμα – στόχο του οποίου η DOA πρέπει να εκτιμηθεί.

2) Υπολογισμός του πίνακα συνδιακύμανσης : ο πίνακας υπολογίζεται από τις μετρήσεις των αισθητήρων και αντιπροσωπεύει τις στατιστικές σχέσεις μεταξύ των μετρήσεων από διαφορετικούς αισθητήρες.

3) Eigenvalue Decomposition (Αποσύνθεση ιδιοτιμών) : Ο πίνακας συνδιακύμανσης αναλύεται στις ιδιοτιμές και τα ιδιοδιανύσματα (ταξινομούνται με βάση τις αντίστοιχες ιδιοτιμές τους).

4) Εκτίμηση του υποχώρου θορύβου (Noise Subspace): Τα ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στις μικρότερες ιδιοτιμές αντιπροσωπεύουν τον υποχώρο θορύβου, αυτά καλύπτουν τον υποχώρο που αποτυπώνει τη συνιστώσα θορύβου των μετρήσεων.

5) Υπολογισμός χωρικού φάσματος : Υπολογίζεται προβάλλοντας τον υποχώρο σήματος ορθογώνια στον υποχώρο θορύβου, επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό του χωρικού ψευδοφάσματος ή της χωρικής συνάρτησης πυκνότητας ισχύος. Το χωρικό φάσμα αντιπροσωπεύει τη συμβολή κάθε DOA στο λαμβανόμενο σήμα.

6) DOA εκτίμηση : Οι DOA εκτιμώνται με τον εντοπισμό των κορυφών στο χωρικό φάσμα. Οι κορυφές αντιστοιχούν στις κατευθύνσεις άφιξης των σημάτων. Μπορεί να εφαρμοστεί ένα κατώφλι για τη διάκριση μεταξύ αληθινών κορυφών και κορυφών που προκαλούνται από θόρυβο.

Συμπερασματικά ο αλγόριθμος MUSIC παρέχει εκτίμηση DOA υψηλής ανάλυσης και μπορεί να χειριστεί πολλαπλά σήματα ταυτόχρονα. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός σε σενάρια με κοντινά διαστήματα μεταξύ των πηγών ή στενά ευθυγραμμισμένες πηγές. Ωστόσο, προϋποθέτει ορισμένες συνθήκες, όπως διάδοση σε μακρινό πεδίο και ασυσχέτιστα σήματα. Μπορεί επίσης να είναι ευαίσθητος στο θόρυβο και απαιτεί ακριβή μοντελοποίηση του υποκείμενου συστήματος και των χαρακτηριστικών του σήματος. Συνολικά, ο αλγόριθμος MUSIC χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές, όπως ραντάρ, σόναρ, ασύρματες επικοινωνίες και επεξεργασία συστοιχιών μικροφώνων για τον εντοπισμό ηχητικών πηγών.

ESPRIT [2] : Είναι μια μέθοδος υψηλής ανάλυσης που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της κατεύθυνσης άφιξης (DOA). Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός σε σενάρια με κοντινά τοποθετημένες ή ευθυγραμμισμένες πηγές. Η βασική ιδέα πίσω από τον αλγόριθμο ESPRIT είναι η εκμετάλλευση των ιδιοτήτων αναλλοίωτης περιστροφής των συστοιχιών αισθητήρων για την εκτίμηση της DOA , πιο λεπτομερώς :

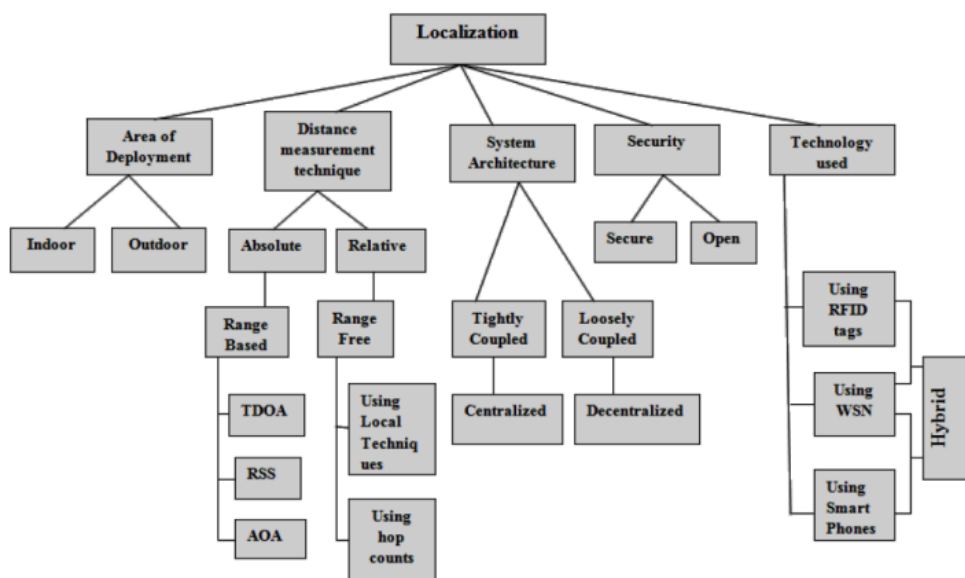
- 1) Συλλογή δεδομένων : Συλλέγονται μετρήσεις από μια συστοιχία αισθητήρων ή κεραιών για το σήμα (ή τα σήματα) στόχο για το οποίο πρέπει να εκτιμηθεί η DOA.
- 2) Υπολογισμός πίνακα συνδιακύμανσης : Ο πίνακας συνδιακύμανσης υπολογίζεται από τις μετρήσεις των αισθητήρων. Ο πίνακας συνδιακύμανσης αντιπροσωπεύει τις στατιστικές σχέσεις μεταξύ των μετρήσεων από διαφορετικούς αισθητήρες.
- 3) decomposition of covariance matrix (αποσύνθεση του πίνακα συνδιακύμανσης) : Ο πίνακας συνδιακύμανσης αποσυντίθεται σε δύο υποπίνακες με τη χρήση μιας τεχνικής αποσύνθεσης μοναδιαίων τιμών (SVD) ή αποσύνθεσης ιδιοτιμών (EVD). Αυτή η διάσπαση αποκαλύπτει τις ιδιότητες αναλλοίωτης περιστροφής της συστοιχίας.
- 4) Εκτίμηση του υποχώρου σήματος : Ο πρώτος υποπίνακας που λαμβάνεται από την αποσύνθεση αντιπροσωπεύει τον υποχώρο σήματος. Περιέχει τις πληροφορίες που σχετίζονται με την DOA των σημάτων.
- 5) Επεξεργασία ESPRIT : Ο δεύτερος υποπίνακας που λαμβάνεται από την αποσύνθεση χρησιμοποιείται για την εκτέλεση της επεξεργασίας ESPRIT. Αυτό περιλαμβάνει την επίλυση ενός γραμμικού συστήματος εξισώσεων για την εκτίμηση του DOA.
- 6) Εκτίμηση DOA : Οι DOA εκτιμώνται από τις λύσεις των γραμμικών εξισώσεων που λαμβάνονται στο βήμα επεξεργασίας ESPRIT. Ο αριθμός των λύσεων αντιστοιχεί στον αριθμό των πηγών σήματος και τα DOA μπορούν να προσδιοριστούν από τις λύσεις.

Συνεπώς ο αλγόριθμος ESPRIT προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως υψηλή ανάλυση, ανθεκτικότητα στο θόρυβο και υπολογιστική αποδοτικότητα. Μπορεί να εκτιμήσει με ακρίβεια την DOA πολλαπλών πηγών, ακόμη και σε δύσκολα σενάρια με κοντινές τοποθετημένες ή στενά ευθυγραμμισμένες πηγές. Ο ESPRIT χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές όπως το ραντάρ, το σόναρ, οι ασύρματες επικοινωνίες και η επεξεργασία συστοιχιών μικροφώνων για τον εντοπισμό ηχητικών πηγών. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ενώ οι βασικές αρχές του αλγορίθμου ESPRIT παραμένουν οι ίδιες, με την πάροδο του χρόνου έχουν αναπτυχθεί παραλλαγές και βελτιώσεις για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων προκλήσεων και τη βελτίωση των επιδόσεων σε διάφορες εφαρμογές.

Είναι αντιληπτό ότι η πρόκληση για ένα σχεδιαστή είναι να επιλέξει το σωστό αλγόριθμο εκτίμησης DOA. Συνεπώς η αποδοτικότητα και η αποτελεσματικότητα ενός αλγορίθμου καθίστανται κρίσιμες για την επιλογή ενός αλγορίθμου DOA estimation .

2.4. Κατηγορίες συστημάτων γεωεντοπισμού

Είναι κοινώς αποδεκτό πως υπάρχουν διάφορες κατηγοριοποιήσεις των συστημάτων εντοπισμού θέσης. Κάθε μια τα ομαδοποιεί σε μη αυστηρά καθορισμένες ομάδες. Αυτό οφείλεται στην πληθώρα των τεχνολογιών και των μεθόδων που χρησιμοποιούνται, οι οποίες συχνά έχουν κοινά στοιχεία και επικαλύπτονται. Γενικότερα μπορούν να ταξινομηθούν χρησιμοποιώντας ως κριτήριο την τεχνολογία που χρησιμοποιούν, την περιοχή εφαρμογής τους, την αρχιτεκτονική τους κ.λπ., όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [6,16].



Εικόνα 3 Κατηγορίες συστημάτων γεωεντοπισμού

Πιο συγκεκριμένα :

- Με βάση την περιοχή εφαρμογής
 Η πλέον χρησιμοποιούμενη κατηγοριοποίηση είναι αυτή που έχει ως κριτήριο την περιοχή εφαρμογής, αν δηλαδή εφαρμόζεται σε εξωτερικό (outdoor) ή εσωτερικό χώρο (indoor). Η κατηγοριοποίηση είναι αναγκαία επειδή ένα σύστημα IPS ακόμα και αν μπορεί να λειτουργήσει και σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους είναι βέβαιο ότι δεν θα έχει την ίδια απόδοση. Έτσι π.χ. ένα σύστημα που στηρίζεται στο GPS δεν μπορεί να έχει την ίδια ακρίβεια σε έναν εσωτερικό χώρο, λόγω των δομικών υλικών των κτηρίων, ενώ ένα σύστημα που στηρίζεται στην τεχνολογία Infrared ή Bluetooth δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε εξωτερικούς χώρους λόγω της μικρής εμβέλειας που έχουν.

- Με βάση τον τρόπο μέτρησης της απόστασης
Μια άλλη κατηγοριοποίηση βασίζεται στον τρόπο με τον οποίο μετρείται η απόσταση του στόχου από τα σημεία αναφοράς και αν η ζητούμενη πληροφορία είναι η ακριβής (Absolute) θέση του στόχου ή η σχετική (Relative) θέση του ως προς τα σημεία αναφοράς. Η απόσταση υπολογίζεται είτε μέσω της διαφοράς του χρόνου άφιξης (Time Difference Of Arrival - TDoA) που είναι ο χρόνος διάδοσης του σήματος επικοινωνίας από τον πομπό προς το δέκτη, είτε με τη ισχύ του λαμβανόμενου σήματος (RSS), είτε μετρώντας τη γωνία λήψης του σήματος (Angle Of Arrival – AoA).
- Με βάση την αρχιτεκτονική
Με βάση την αρχιτεκτονική τα συστήματα εντοπισμού θέσης κατηγοριοποιούνται σε στενά συνδεδεμένα (Tightly Coupled) και σε χαλαρά συνδεδεμένα (Loosely Coupled). Στην πρώτη κατηγορία οι κόμβοι (στόχος και σημεία αναφοράς) μεταδίδουν συνεχώς δεδομένα στον server του συστήματος μέσω ενσύρματης ή ασύρματης επικοινωνίας, όπου γίνεται και η επεξεργασία και οι ανάλογοι υπολογισμοί. Στη δεύτερη κατηγορία οι κόμβοι επικοινωνούν ο ένας με τον άλλον χωρίς να υπάρχει κεντρικός server. Ο κάθε κόμβος υπολογίζει τη δική του θέση με βάση τις πληροφορίες θέσης που λαμβάνει από γειτονικούς κόμβους.
- Με βάση την ασφάλεια
Με κριτήριο την ασφάλεια τα συστήματα IPS μπορούν κατηγοριοποιηθούν σε ασφαλή (secure) και ανοικτά (open). Η προφανής διαφορά είναι ότι στα ασφαλή συστήματα IPS η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων και του server γίνεται με ασφαλή τρόπο (encrypted).
- Με βάση την τεχνολογία
Με βάση την τεχνολογία την οποία χρησιμοποιείται, τα σύστημα IPS κατηγοριοποιούνται σε αυτά που χρησιμοποιούν ετικέτες αναγνωριστικών μέσω ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency Identification - RFID tags), σε αυτά που κάθε κόμβος διαθέτει ασύρματο αισθητήρα (Wireless Sensor Nodes) και σε αυτά που χρησιμοποιούν έξυπνες κινητές συσκευές (smart phones, tablets κ.λπ.). Υπάρχουν επίσης και κάποια υβριδικά συστήματα που χρησιμοποιούν συνδυαστικά κάποιες ή όλες από τις παραπάνω τεχνολογίες.
- Με βάση το κέντρο υπολογισμού
Τέλος, μια άλλη κατηγοριοποίηση των συστημάτων που εξαρτάται από την αρχιτεκτονική που χρησιμοποιείται και δεν φαίνεται στην εικόνα παραπάνω, διαχωρίζει τα συστήματα σε δύο κατηγορίες: σε mobile-based και network-based . Στην πρώτη κατηγορία, ο χρήστης έχει μια συσκευή η οποία υπολογίζει η ίδια την απόστασή της από τους πομπούς που βρίσκονται στα σημεία αναφοράς, μέσω του λαμβανόμενου σήματος. Στη δεύτερη κατηγορία, η συσκευή του χρήστη στέλνει σήματα στους κόμβους του δικτύου μέσω ασύρματης επικοινωνίας ή ανιχνεύεται

από αυτούς και στη συνέχεια το δίκτυο υπολογίζει την θέση του χρήστη (π.χ. RFID tags).

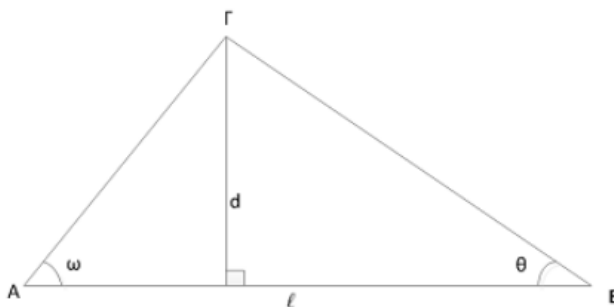
2.5. Τεχνικές γεωεντοπισμού

Οι τεχνικές γεωεντοπισμού είναι ορισμένοι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουμε τη τοποθεσία ενός σήματος, πηγής ή αντικειμένου σε έναν χώρο. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές γεωεντοπισμού που χρησιμοποιούνται σε διάφορα πεδία, όπως στις τηλεπικοινωνίες, τα ραντάρ, ασύρματες εφαρμογές κ.α. Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται απόλυτα από την περιοχή εφαρμογής και τις ελάχιστες προδιαγραφές του συστήματος. Οι τεχνικές υπολογισμού θέσης διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: σε αυτές που βασίζονται σε δορυφόρους (satellite based) και σε αυτές που βασίζονται σε επίγεια συστήματα (terrestrial based). Θα ασχοληθούμε με το δεύτερο σύστημα. Ορισμένες από τις κύριες τεχνικές γεωεντοπισμού είναι [2,3]:

- Μέθοδος Άφιξης Γωνίας (Angle of Arrival - AoA): Αυτή η μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό της γωνίας άφιξης ενός σήματος με τουλάχιστον δύο αισθητήρες-κεραίες. Με βάση τις μετρήσεις της γωνίας, μπορεί να υπολογιστεί η τοποθεσία της πηγής.
* Παραδείγματα υπολογισμού της μεθόδους αυτής θα αναφερθούν εκτενέστερα παρακάτω [5]
- Μέθοδος Χρονικής Διαφοράς Άφιξης (Time Difference of Arrival - TDoA) : Σε αυτήν τη μέθοδο, η τοποθεσία υπολογίζεται με βάση τη χρονική διαφορά άφιξης του σήματος σε τουλάχιστον τρεις αισθητήρες-κεραίες. Με τη χρήση πολλαπλών μετρήσεων TDOA, μπορεί να εξαχθεί η τοποθεσία της πηγής.
* Παραδείγματα υπολογισμού της μεθόδους αυτής θα αναφερθούν εκτενέστερα παρακάτω [6]
- Μέθοδος Διαφοράς Συχνότητας Άφιξης (FDoA) : Σε αυτήν τη μέθοδο, η τοποθεσία υπολογίζεται με βάση τη διαφορά συχνότητας του σήματος που λαμβάνεται από διάφορους αισθητήρες. Απαιτείται η ύπαρξη κίνησης μεταξύ των αισθητήρων και του πομπού για την εκτέλεση της μέτρησης. [8]
- Μέθοδος Χρόνου Άφιξης (ToA) : Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στον προσδιορισμό του χρόνου διάδοσης (propagation time) του σήματος που εκπέμπει ένας πομπός σε πολλούς δέκτες. [6]

- Μέθοδοι Συνδυασμού : Συχνά, οι μέθοδοι γεωεντοπισμού συνδυάζονται για να βελτιώσουν την ακρίβεια της τοποθεσίας. Για παράδειγμα, ο συνδυασμός AOA και TDOA (γνωστή και ως hybrid method) μπορεί να λύσει την ασάφεια που προκύπτει από τις κάθε περιπτώσεις ξεχωριστά και να παράσχει φυσικά καλύτερη ακρίβεια.
- Μέθοδοι Τριγωνισμού : Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούν «τρίγωνα» για να υπολογίσουν την απόσταση της πηγής. Είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν τουλάχιστον τρεις αισθητήρες - κεραίες με γνωστές θέσεις και τις μετρήσεις των αποστάσεων ή γωνιών. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα υπολογισμού με τριγωνισμό :

Έστω ότι δύο παρατηρητές βρίσκονται στα σημεία A , B τα οποία βρίσκονται σε απόσταση l (Εικόνα 4) μεταξύ τους. Ένας παρατηρητής στο σημείο A κοιτάει το Γ υπό γωνία παρατήρησης ω , ενώ ένας άλλος παρατηρητής στο σημείο B κοιτάει το Γ υπό γωνία παρατήρησης θ . Γνωρίζοντας τις τιμές των l , ω , θ μπορούμε με τριγωνομετρικούς τύπους να υπολογίσουμε την απόσταση d ως εξής:



Εικόνα 4 Υπολογισμός απόστασης με τριγωνομετρία

$$l = \frac{d}{\tan(\omega)} + \frac{d}{\tan(\theta)} = d \left(\frac{\cos(\omega)}{\sin(\omega)} + \frac{\cos(\theta)}{\sin(\theta)} \right) = d \frac{\sin(\omega + \theta)}{\sin(\omega) \sin(\theta)}$$

$$\text{Άρα έχουμε τελικά } d = l \frac{\sin(\omega) \sin(\theta)}{\sin(\omega + \theta)}$$

Εξίσωση 1 τριγωνισμού

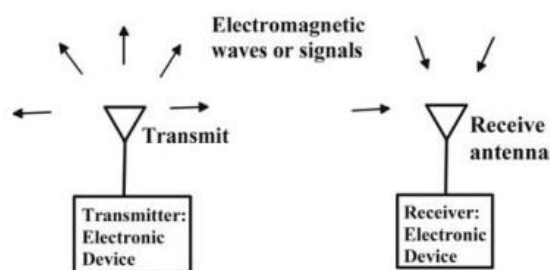
[5]

- Μέθοδοι Συστάδας (Cluster methods) : Βασίζονται στη συσσώρευση μετρήσεων από πολλές κεραιές για να εντοπίσουν την πηγή. Συνήθως αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου οι μετρήσεις είναι μη ακριβείς ή περιορισμένες.

Οι τεχνικές γεωεντοπισμού εξαρτώνται από τον τύπο και τη μορφολογία του περιβάλλοντος, τον τύπο της συσκευής-αντικειμένου που πρέπει να εντοπιστεί, τα διαθέσιμα σήματα στους αισθητήρες-κεραίες, καθώς και τις απαιτήσεις της εφαρμογής που θέλουμε να τα χρησιμοποιήσουμε. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, και κάθε μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματά της και τα μειονεκτήματά της ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής.

2.6. Κεραιές και αισθητήρες στο γεωεντοπισμό

Μια κεραία είναι ένας μετατροπέας που έχει σχεδιαστεί για να μεταδίδει ή να λαμβάνει ηλεκτρομαγνητικά κύματα ή ραδιοσήματα που διαδίδονται στον αέρα ή σε ένα μέσο. Μια κεραία εκπομπής δέχεται ρεύματα από ηλεκτρονικές συσκευές και τα μετατρέπει σε αντίστοιχα ηλεκτρομαγνητικά ή ραδιοσήματα που εκπέμπονται στον αέρα ή σε ένα μέσο. Διαφορετικοί τρόποι διάταξης ή τοποθέτησης των αγωγών και των υλικών οδηγούν σε διάφορες κεραιές με διαφορετική συμπεριφορά και χρήση. Εν ολίγοις, μια κεραία χρησιμεύει ως συσκευή διασύνδεσης μεταξύ του αέρα (ή ενός μέσου) και των ηλεκτρονικών συσκευών, καθιστώντας δυνατή την υλοποίηση ενός ασύρματου συστήματος, όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω. [2]



Εικόνα 5 Ασύρματη μετάδοση μέσω κεραιών

Οι κεραιές και οι αισθητήρες παίζουν από τους σημαντικότερους ρόλους στα συστήματα γεωεντοπισμού, για το λόγο ότι αποτελούν τα μέσα μέσω των οποίων συλλέγονται οι

πληροφορίες για τον εντοπισμό και την τοποθέτηση αντικειμένων ή πηγών σήματος. Οι κεραίες αποτελούν το κύριο στοιχείο που λαμβάνει ή εκπέμπει το σήμα. Στα συστήματα γεωεντοπισμού, οι κεραίες συνήθως σχεδιάζονται για να έχουν κατευθυντικότητα και ευαισθησία σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις ή συχνότητες. Έτσι επιτρέπει την ακριβέστερη ανίχνευση και μέτρηση του σήματος. Οι αισθητήρες, όπως τα ραντάρ, οι αισθητήρες ανίχνευσης κατεύθυνσης, ή ακόμη και αισθητήρες GPS, συλλέγουν τις κατάλληλες πληροφορίες που απαιτούνται για τον εντοπισμό. Αυτές οι πληροφορίες μπορεί να περιλαμβάνουν τη γωνία άφιξης του σήματος, το χρόνο άφιξης του σήματος, τη συχνότητα του σήματος, την απόσταση από τον αισθητήρα και πολλές ακόμα παραμέτρους που μπορούν να σχετίζονται με την τοποθεσία. Οι πληροφορίες που συλλέγονται από τους αισθητήρες χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον υπολογισμό της τοποθεσίας, του προσανατολισμού ή του εντοπισμού του σήματος με βάση την τεχνική που χρησιμοποιείται στο κάθε σύστημα γεωεντοπισμού. Συνολικά, οι κεραίες και οι αισθητήρες είναι κρίσιμοι για την απόδοση και την ακρίβεια των συστημάτων γεωεντοπισμού, επιτρέποντας τη συλλογή λεπτομερών πληροφοριών για τον εντοπισμό αντικειμένων ή πηγών σήματος στα πεδία εφαρμογών που χρησιμοποιούνται.

Πιο συγκεκριμένα ο αισθητήρας που καθορίζει τη γωνία άφιξης του σήματος ή το αζιμούθιο (και την ανύψωση για τις συχνότητες HF), σε σχέση με μια κατεύθυνση αναφοράς, ονομάζεται ανιχνευτής κατεύθυνσης. Ανάμεσα στις πάμπολλες υλοποιήσεις των ανιχνευτών κατεύθυνσης υπάρχουν κοινά τα παρακάτω λειτουργικά εξαρτήματα :

- Συστοιχία κεραιών
- Σύστημα λήψης (receiving assembly)
- Επεξεργαστής ανίχνευσης κατεύθυνσης

Τα σχεδιαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των κάθε αισθητήρων – κεραιών σχεδιάζονται και προσαρμόζονται σε σχέση με τις εκάστοτε απαιτήσεις της εφαρμογής που απαιτούνται. Σε αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνονται μεταξύ άλλων : Ο τύπος

απεικόνισης, το λειτουργικό σχέδιο (operational concept), η μηχανική αντοχή, οι διαστάσεις και το σχήμα, η κατανάλωση ενέργειας του αισθητήρα ανίχνευσης κατεύθυνσης.

Ουσιαστικά όμως, οι προδιαγραφές που χαρακτηρίζουν τους ανιχνευτές κατεύθυνσης σύμφωνα με την ITU είναι:

- Η ακρίβεια,
- η ευαισθησία,
- η ανοχή σε παραμορφωμένα κύματα,
- η αντοχή σε φαινόμενα αποπόλωσης,
- οι επιπτώσεις των ομοκαναλικών παρεμβολών,
- η αντίσταση στην απευαισθητοποίηση του δέκτη, καθώς και
- ο ελάχιστος χρόνος διάρκειας του σήματος.

2.6.1. Κριτήρια επιλογής τοποθεσίας κεραιών

Η τοποθέτηση των κεραιών στο χώρο ενδιαφέροντος εξαρτάται κυρίως από τρεις συνθήκες, την καταλληλότητα του υποψήφιου χώρου για παροχή επαρκούς γεωγραφικής κάλυψης, την ύπαρξη εμποδίων στον περιβάλλοντα χώρο, η οποία μειώνει δραστικά τη γεωγραφική κάλυψη και κατ' επέκταση την ακρίβεια των υπηρεσιών γεωεντοπισμού, και το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον της περιοχής, και κατά πόσο αυτό θα επηρεάσει την ποιότητα των μετρήσεων του συστήματος. Θα πρέπει να επιλέγεται μια τοποθεσία όπου τα ισχυρά εκπεμπόμενα πεδία που πρέπει να καταγράφονται θα είναι σχετικά ανεπηρέαστα από τις τοπικές κατασκευές ή τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Στις συχνότητες VHF όπου χρησιμοποιούνται ομοιοκατευθυντικές κεραίες, είναι σημαντικό να είναι σαφής η διαδρομή στη γενική κατεύθυνση της πηγής σήματος. Επιπλέον, πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η λήψη πολλαπλών διαδρομών λόγω τοπικής ανάκλασης ή εκ νέου ακτινοβολίας του επιθυμητού σήματος. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα των μετρήσεων είναι οι καιρικές συνθήκες της περιοχής (π.χ. έντονος άνεμος και παγετός), οι γραμμές μετάδοσης υψηλής τάσης, οι περιοχές γειτνίασης με αεροδρόμια καθώς και δρόμους με μεγάλη κίνηση κ.α.. Σημαντικό παράγοντα επίσης αποτελεί και η προσβασιμότητα του χώρου από ένα δρόμο παντός καιρού, καθώς και η ύπαρξη των απαραίτητων παροχών, όπως ηλεκτρικό ρεύμα, τηλέφωνο, internet. Στην περίπτωση που οι κεραίες που πρόκειται να εγκατασταθούν, περιλαμβάνουν και ανιχνευτές κατεύθυνσης, τότε πρέπει να δίνεται η υψηλότερη προτεραιότητα στα κριτήρια επιλογής της τοποθεσίας ανιχνευτών κατεύθυνσης όπως την ύπαρξη ή όχι βουνών, λόφων και μεγάλων τεχνητών κατασκευών, καθώς και τη γειτνίαση με

μεγάλους αγωγούς ή μεταλλικούς σωλήνες στο υπέδαφος, η οποία εισάγει σφάλματα στην ανίχνευση κατεύθυνσης.[9]

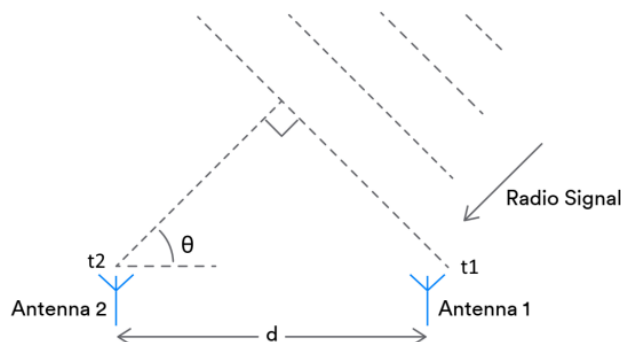
3

Τεχνικές Γεωεντοπισμού AoA, TDoA, Hybrid

3.1. Μέθοδος AoA - Angle of Arrival

Η τεχνολογία Angle of Arrival (AoA) ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία της εκτίμησης κατεύθυνσης άφιξης (DOA), είναι μια τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εντοπίσει την κατεύθυνση διάδοσης του RF σήματος (είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα υψηλής συχνότητας που χρησιμοποιείται για την ασύρματη μετάδοση δεδομένων, φωνής ή εικόνας. Τα RF σήματα κινούνται στον αέρα με ταχύτητες παρόμοιες με αυτές του φωτός και μπορούν να μεταδοθούν σε μεγάλες αποστάσεις μέσω κεραιών ή άλλων μέσων μετάδοσης. Η συχνότητα των RF σημάτων κυμαίνεται συνήθως από λίγα kHz έως πολλά GHz, ανάλογα με τη χρήση τους και το είδος της συσκευής που τα δημιουργεί ή τα λαμβάνει. Τα RF σήματα χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, όπως η τηλεόραση, ο ραδιοφωνικός σταθμός, τα κινητά τηλέφωνα, ασύρματα δίκτυα, η ραδιοεπικοινωνία, η ασύρματη επικοινωνία μεταξύ συσκευών στο "Internet of Things" και πολλές άλλες) και την ανίχνευση της αρχικής γωνίας ενός RF σήματος από μια πηγή στον αέρα, με λίγα λόγια ανιχνεύει την κατεύθυνση ενός πιθανού ασύρματου πομπού. Αυτό γίνεται συνήθως χρησιμοποιώντας κεραιές ή αισθητήρες (απαιτούνται τουλάχιστον δύο) πολλών στοιχείων που τοποθετούνται σε διαφορετικές τοποθεσίες μεταξύ τους. Η τεχνολογία AoA λειτουργεί ως εξής : κάθε κεραία ή αισθητήρας καταγράφει το σήμα που λαμβάνει και υπολογίζει τη φάση του σήματος σε σχέση με τους

άλλους αισθητήρες. Αυτοί οι υπολογισμοί στη συνέχεια συνδυάζονται για να υπολογιστεί η αρχική γωνία του σήματος. Η μέθοδος AoA μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως μια πιο πολύπλοκη έκδοση των παλαιότερων, μη αυτοματοποιημένων μεθόδων DF που χρησιμοποιούνταν παραδοσιακά στην ραδιοπαρακολούθηση. Η μη αυτοματοποιημένη DF απαιτούσε έναν ανθρώπινο χειριστή και μια κατευθυντική κεραία για τον γεωεντοπισμό ενός πιθανού ασύρματου πομπού σε σχετικά μικρές αποστάσεις (έως ~100 μέτρα). Οι βασικοί σταθμοί της τεχνολογίας AoA είναι οι αντιλαμβανόμενοι σταθμοί, οι οποίοι είναι ασύρματοι δέκτες που μπορούν να λάβουν σήματα από τον ίδιο πομπό και να εκτιμήσουν τη γωνία προέλευσης του σήματος. Συνήθως ο δέκτης είναι τοποθετημένος σε συγκεκριμένο σημείο στο χώρο και είναι σταθερός, ενώ ο πομπός μπορεί να είναι ένα κινητό τηλέφωνο ή ένας ασύρματος πχ κινούμενος στη εμβέλεια γύρω από τους σταθμούς. Για την επιλογή των AoA τοποθεσιών πρέπει να γίνει μία μελέτη έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι παραμορφώσεις του κύματος λόγω επανεκπομπής από τοπικά εμπόδια, ανακλάσεις εδάφους και αλλαγές στην αγωγιμότητα του εδάφους. Ακόμη, κάποιες κεραίες AoA πρέπει να βαθμονομηθούν μετά την εγκατάστασή τους ώστε να μειώσουν τα σφάλματα που προκύπτουν από τη συχνότητα και τη κατεύθυνση. Η βαθμονόμηση των κεραιών είναι ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα περιορισμού της απόδοσης AoA. [3,5]



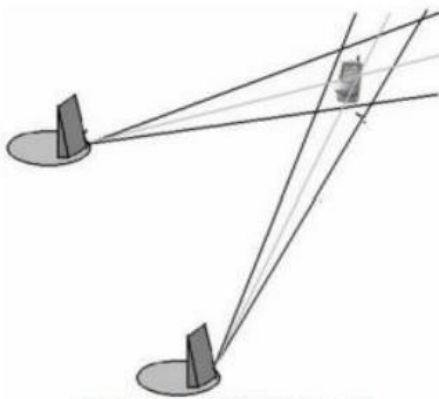
Εικόνα 6 Απεικόνιση της AoA μεθόδου, τη στιγμή που έρχεται το σήμα στους δέκτες

3.1.1. Πλεονεκτήματα AoA τεχνικής

- Τα συστήματα AoA αποδίδουν αρκετά καλά για σήματα στενής ζώνης και μη διαμορφωμένα σήματα καθώς και για σήματα ευρείας ζώνης.
- Απαιτούν χαμηλότερους ρυθμούς δεδομένων επειδή μόνο ορισμένα χαρακτηριστικά του σήματος, όπως η γωνία διόπτρευσης, η συχνότητα και ο χρόνος, μεταδίδονται σε μια κεντρική τοποθεσία.

- Πιο οικονομική τεχνική μιας και απαιτεί τουλάχιστον 2 σταθμούς γεωεντοπισμού παρέχοντας ικανοποιητική ακρίβεια σε καλές συνθήκες περιβάλλοντος.
- Ορισμένα απλά συστήματα ΑΟΑ είναι λιγότερο ευαίσθητα στις αποσυνδέσεις του σήματος μεταξύ των ανιχνευτών. Αυτό σημαίνει ότι τα ΑΟΑ συστήματα μπορούν να διατηρήσουν τη συνοχή του σήματος ακόμη και αν υπάρχουν αποκλίσεις στις συχνότητες του σήματος λόγω της κίνησης των πηγών ή του περιβάλλοντος.
- Έχει υψηλή ταχύτητα υπολογισμού για γεωεντοπισμό. Η ΑοΑ επιτρέπει την ανανέωση της τοποθεσίας σε συχνότητες που μπορεί να φτάνουν έως και 100 φορές το δευτερόλεπτο. Επιπλέον, η ΑοΑ δεν απαιτεί υψηλό συγχρονισμό του χρόνου μεταξύ των δεκτών, κάτι που την καθιστά πιο ευέλικτη στον τομέα των δικτύων.
- Ορισμένα συστήματα ΑοΑ υποστηρίζουν τον ταυτόχρονο γεωεντοπισμό πολλών σημάτων με διάφορες συχνότητες, μέθοδος γνωστή και ως ευρυζωνικής ανίχνευσης (wideband DF).
- Για να δημιουργηθεί μια Γραμμή Θέσης (LoP) απαιτούνται τουλάχιστον 2 αισθητήρες, ενώ για το γεωεντοπισμό σε 2-διάστατο χώρο απαιτούνται τουλάχιστον 3 αισθητήρες και για 3-διάστατο χώρο απαιτούνται τουλάχιστον 4 αισθητήρες. Η τεχνική της ΑοΑ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό μιας μόνο πηγής σήματος (single site location).
- Ακρίβεια και αποτελεσματικότητα κοντά στα όρια του περιγράμματος των αισθητήρων: Η ΑοΑ τεχνική επιτυγχάνει υψηλή ακρίβεια και αποτελεσματικότητα όταν η πηγή του σήματος βρίσκεται εντός του περιγράμματος των αισθητήρων ή κοντά σε αυτό.

Η εφαρμογή της μεθόδου ΑοΑ για τη σύγχρονη παρακολούθηση απαιτεί τη διάθεση τουλάχιστον δύο δεκτών ΑοΑ όπως είπαμε προηγουμένως. Η τομή των κατευθύνσεων που προέρχονται από αυτούς τους δύο δέκτες καθορίζει τη θέση του ασύρματου πομπού που εντοπίζεται. Οι κατευθύνσεις που προκύπτουν από τη μέθοδο ΑοΑ δεν είναι ευθείες γραμμές, αλλά ακτίνες, οι οποίες γίνονται πιο ευρείες καθώς απομακρύνεται κανείς από τους δέκτες ΑοΑ, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αυτό οδηγεί σε μειωμένη ακρίβεια της μεθόδου όταν ο ασύρματος πομπός που εντοπίζεται βρίσκεται μακριά από τους δέκτες ΑοΑ.



Εικόνα 7 Απεικόνιση της κατεύθυνσης στην ΑοΑ μεθόδου, όσο κινείται ένας πομπός πιο μακριά τόσο μειώνεται η ακρίβεια της μεθόδου

3.1.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων της τεχνικής ΑοΑ

1. Ποιότητα του σήματος: Η ακρίβεια των μετρήσεων ΑοΑ εξαρτάται από την ποιότητα του σήματος που λαμβάνεται. Αν το σήμα είναι ασθενές, θορυβώδες ή παρεμβλητικό, μπορεί να επηρεαστεί η ακρίβεια της μέτρησης και να μην έχουμε σωστές μετρήσεις.
2. Ανεπιθύμητες παρεμβολές: Η παρουσία άλλων σημάτων ή πηγών παρεμβολών μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στην ακρίβεια των μετρήσεων ΑοΑ. Αυτές οι παρεμβολές μπορούν να προέρχονται από άλλα σήματα επικοινωνίας, ηλεκτρονικές συσκευές ή φυσικά εμπόδια όπως κτίρια, δέντρα. Επίσης ο καιρός είναι ένας παράγοντας πολύ σημαντικός μιας και σε περιβάλλον με αρκετό αέρα δεν θα μπορέσουμε επίσης να έχουμε σωστές μετρήσεις.
3. Αποστάσεις μεταξύ των αισθητήρων: Η ακρίβεια της μέτρησης μπορεί να επηρεαστεί από τις ακριβείς αποστάσεις και τη γεωμετρία των αισθητήρων. Όταν οι αισθητήρες είναι κοντά μεταξύ τους, η γωνία άφιξης μπορεί να μετρηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια. Η μικρή απόσταση μεταξύ των αισθητήρων οδηγεί σε μια πιο ακριβή απεικόνιση του σήματος. Αυτό σημαίνει ότι ακόμα και μικρές αλλαγές στη γωνία άφιξης μπορούν να ανιχνευθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια. Από την άλλη πλευρά, όταν οι αισθητήρες είναι απομακρυσμένοι μεταξύ τους, η ακρίβεια της μέτρησης

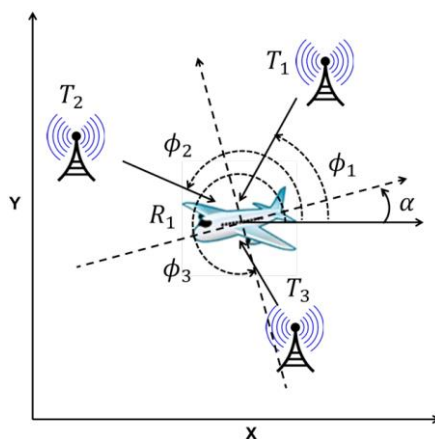
μπορεί να μειωθεί. Συνεπώς η απόσταση και η θέση της των αισθητήρων αποτελούν αρκετά σημαντικούς παράγοντες.

4. Συχνότητα λειτουργίας: Η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των μετρήσεων ΑοΑ. Υψηλότερες συχνότητες μπορεί να παρουσιάζουν περισσότερη απόσβεση (η ικανότητα ενός υλικού ή ενός περιβάλλοντος να απορροφά ή να ανακλά το ηλεκτρομαγνητικό κύμα) και παρεμβολές από τα εμπόδια. Υψηλότερες συχνότητες έχουν πιο μικρό εύρος εξάπλωσης, που σημαίνει ότι το σήμα μεταδίδεται πιο συγκεντρωμένα και εστιάζεται σε μικρότερη περιοχή. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερη ευαισθησία στην παρεμβολή από εμπόδια και ανακλάσεις, επιτρέποντας πιο ακριβείς μετρήσεις ΑοΑ.

3.1.3. Παραδείγματα ΑοΑ τεχνικής σήμερα

Η τεχνολογία ΑοΑ έχει πολλές εφαρμογές στην ασύρματη επικοινωνία, όπως η ανίχνευση και εντοπισμός αντικειμένων, η διαχείριση της κυκλοφορίας των αεροσκαφών κ.λπ.

Ένα παράδειγμα εφαρμογής της τεχνικής ΑοΑ πχ είναι στη διαχείριση της κυκλοφορίας των αεροσκαφών στα αεροδρόμια μέσω της ανίχνευσης και ταυτοποίησης της κατεύθυνσης άφιξης των αεροπλάνων. Συγκεκριμένα η τεχνική αυτή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση της γωνίας προέλευσης του σήματος που εκπέμπεται από το αεροσκάφος κατά την προσέγγιση στο αεροδρόμιο. Έτσι με βάση αυτής της πληροφορίας υπάρχει η δυνατότητα για ανίχνευση και παρακολούθηση της κίνησης αεροσκαφών, φυσικά την αποφυγή συγκρούσεων και τον έλεγχο της κυκλοφορίας τους. Συνεπώς με τη χρήση της ΑοΑ μπορούμε να έχουμε βελτίωση της ασφάλειας και της αποδοτικότητας της διαχείρισης της κυκλοφορίας των αεροσκαφών.



Εικόνα 8 Παράδειγμα εφαρμογής της ΑοΑ στη διαχείριση κυκλοφορίας αεροπλάνων

Ένα ακόμα παράδειγμα της τεχνικής AoA θα μπορούσε να είναι η παρακολούθηση της θέσης ενός κινούμενου αντικειμένου με τη χρήση 2 κεραιών. Για παράδειγμα, αν χρησιμοποιείται μια συστοιχία κεραιών, κάθε κεραία μπορεί να λάβει το σήμα που εκπέμπεται από το κινούμενο αντικείμενο σε διαφορετική στιγμή. Αν η διαφορά αυτής της χρονικής καθυστέρησης είναι δεδομένη, τότε μπορεί να υπολογιστεί η γωνία προέλευσης του σήματος, χρησιμοποιώντας τη σχέση του κατακόρυφου ύψους των κεραιών με τη διαφορά φάσης. Η γωνία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η θέση του αντικειμένου στον χώρο.

3.1.4. Χρήση κεραιών στην AoA

Ένας πολύ απλός τρόπος ανίχνευσης της γωνίας άφιξης ενός σήματος είναι η χρήση μιας περιστρεφόμενης κεραίας / συστήματος κεραιών. Μια τηλεχειριζόμενη κεραία και ένας δέκτης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δείξουν το Input level του δέκτη ως συνάρτηση της γωνίας. Μία κάθετα ή οριζόντια πολωμένη κατευθυντική κεραία μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Για τη βελτίωση του αποτελέσματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα κεραιών με δύο πανομοιότυπες κεραίες που παρέχει το άθροισμα ή τη διαφορά των inputs levels των δύο κεραιών. Η διαφορά οδηγεί σε ένα πολύ απότομο ελάχιστο όταν οι κεραίες είναι στραμμένες προς τη κατεύθυνση προς τον πομπό. Το αθροιστικό σήμα έχει υψηλότερη ευαισθησία αλλά η κατευθυντικότητα είναι πολύ χαμηλότερη. Αυτή η μέθοδος εύρεσης κατεύθυνσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλες τις εκπομπές που είναι μεγαλύτερες στον αέρα από ό,τι χρειάζεται ο εξοπλισμός για δύο περιστροφές του συστήματος κεραιών. Τα γρήγορα περιστρεφόμενα συστήματα κεραιών μπορούν να έχουν ταχύτητα περιστροφής έως και 200 r.p. ενώ τα αργά χρειάζονται περισσότερο από 1 λεπτό για έναν ολόκληρο κύκλο. Η λαμβανόμενη πόλωση εξαρτάται μόνο από την τοποθέτηση της κεραίας. Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου σε σχέση με άλλες είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθετα και οριζόντια πολωμένα σήματα. Το κατώτερο όριο συχνότητας καθορίζεται από τις μηχανικές διαστάσεις της κεραίας και συνήθως δεν θα είναι κάτω από τα 80 MHz. Η ανώτερη συχνότητα περιορίζεται κυρίως από τις προδιαγραφές του περιστρεφόμενου ζεύκτη μεταξύ του ιστού και της κεραίας. Οι λεγόμενες περιστρεφόμενες κεραίες είναι διαθέσιμες για συχνότητες έως 40 GHz.

Για την τεχνική AoA, συνήθως χρησιμοποιούνται κεραίες με κατευθυντικό προσανατολισμό όπως αναφέρθηκε παραπάνω (directional antennas). Οι κεραίες αυτές σχεδιάζονται έτσι ώστε να έχουν προσανατολισμένο πεδίο ακτινοβολίας, το οποίο είναι σημαντικό να «κοιτάει»

σε συγκεκριμένη κατεύθυνση, δηλαδή την κατεύθυνση που έρχεται το σήμα, ώστε να έχουμε ακριβή αποτελέσματα μέτρησης της γωνίας άφιξης του σήματος. Μερικοί από τους τύπους κεραιών με κατευθυντικό προσανατολισμό που χρησιμοποιούνται περισσότερο για την τεχνική AoA είναι :

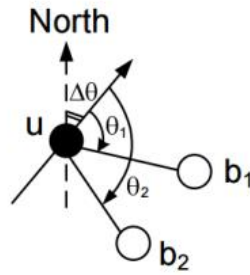
- Κεραίες Yagi: Είναι κεραίες με σωληνωτή μορφή και μεγάλη κατευθυντικότητα. Έχουν ένα ή περισσότερα ενεργά στοιχεία (ακτινοδότες) και ένα ή περισσότερα αποδεκτικά στοιχεία (αποδοχείς).
- Phased array antennas : Αποτελούνται από πολλαπλά στοιχεία κεραιών που λειτουργούν ως ένα συνεχές σύστημα. Οι φάσεις των σημάτων στα στοιχεία κεραίας ρυθμίζονται για να επιτευχθεί κατευθυντικότητα και ευελιξία στον έλεγχο της γωνίας άφιξης.
- Adaptive array antennas : Αυτές οι κεραίες χρησιμοποιούν πολλαπλά στοιχεία κεραίας και προηγμένους αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος για τον αυτόματο έλεγχο της κατευθυντικότητας και της ανίχνευσης της γωνίας άφιξης.

Αυτές είναι μερικές από τις κεραίες που συνήθως χρησιμοποιούνται για την τεχνική AoA. Βέβαια για την επιλογή της κατάλληλης κεραίας πρέπει να γνωρίζουμε τις απαιτήσεις της εφαρμογής που θα τη χρειαστούμε, όπως η ακρίβεια του γεωεντοπισμού, η απόσταση από την πηγή του σήματος και οι συνθήκες περιβάλλοντος.

3.1.5. Βασικές εξισώσεις της μεθόδου AoA

Όπως αναλύθηκε και παραπάνω, η μέθοδος AoA βασίζεται στον υπολογισμό της θέσης και της κατεύθυνσης ενός κινητού στόχου, με βάση τη γωνία λήψης των σημάτων που εκπέμπονται από τα σημεία αναφοράς, χρησιμοποιώντας τον τριγωνισμό. Θεωρούμε ότι όλα τα σημεία αναφοράς διαθέτουν μη-κατευθυντική κεραία και οι στόχοι έχουν τη δυνατότητα να γνωρίζουν τη γωνία με την οποία φτάνουν τα σήματα από τα σημεία αυτά. Ο προσανατολισμός θεωρείται σταθερός και όλες οι γωνίες λήψης υπολογίζονται με βάση αυτόν κατά τη φορά του ωρολογίου. Όταν ο προσανατολισμός είναι στις 0 μοίρες, δείχνει το βορρά και η μετρούμενη AOA ονομάζεται απόλυτη, διαφορετικά ονομάζεται σχετική. Τα σημεία αναφοράς δεν γνωρίζουν το προσανατολισμό τους, ενώ κάθε στόχος μπορεί να γνωρίζει (Εικόνα 9) ή και να μη γνωρίζει (Εικόνα 10) το προσανατολισμό του στο χώρο. Και στις δύο περιπτώσεις θα χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο του τριγωνισμού.

Αρχικά θεωρούμε ότι ο στόχος γνωρίζει τον προσανατολισμό του (Εικόνα 9). Οι γωνίες θ_1 και θ_2 είναι οι AOA που λαμβάνονται από τα σημεία αναφοράς b_1 και b_2 αντίστοιχα.



Εικόνα 9 Γεωεντοπισμός με τον στόχο να γνωρίζει το προσανατολισμό του

Αφού ο προσανατολισμός είναι γνωστός $\Delta\theta$, όπως βλέπουμε στην εικόνα, οι απόλυτες ΑοΑ από τα σημεία b_1 και b_2 είναι :

$$AoAi = (\theta_i + \Delta\theta)(mod\ 2\pi), i = 1, 2$$

Εξίσωση 2 απόλυτων ΑοΑ δύο σημείων

Οπότε, με γνωστές τις θέσεις των b_1 και b_2 , η θέση του στόχου μπορεί να προσδιοριστεί πάνω στην τομή των ακτινών δύο τουλάχιστον μη συνευθειακών σημείων.

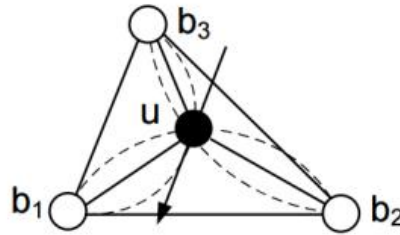
Στη περίπτωση που ο αρχικός προσανατολισμός δεν είναι γνωστός (Εικόνα 10), και δεν είναι δυνατή η λήψη απόλυτων ΑοΑ, ο υπολογισμός μπορεί να γίνει με τη διαφορά των τριών σημείων ΑοΑ. Έτσι οι γωνίες $\angle b_1ub_2$, $\angle b_2ub_3$, $\angle b_1ub_3$ μπορούν να υπολογιστούν μέσω των σχετικών ΑοΑ (Εικόνα 11).

$$\angle b_1ub_2 = \theta_1 + 3600 - \theta_2$$

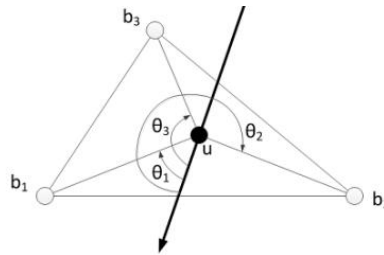
$$\angle b_2ub_3 = \theta_2 - \theta_3$$

$$\angle b_1ub_3 = \theta_3 - \theta_1$$

Εξίσωση 3 Υπολογισμός γωνιών b_1 , b_2 , b_3 μέσω των σχετικών ΑοΑ

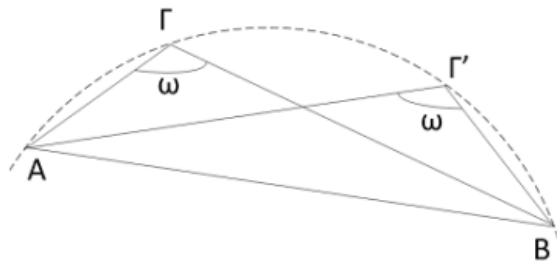


Εικόνα 10 Γεωεντοπισμός με το στόχο να μη γνωρίζει το προσανατολισμό του



Εικόνα 11 Σχετικές ΑοΑ

Γνωρίζουμε ότι σε έναν κύκλο αν θεωρήσουμε μια χορδή AB και δύο σημεία Γ και Γ' τα οποία σχηματίζουν γωνιά ω με τα σημεία A και B, τότε τα Γ και Γ' ανήκουν στο ίδιο τόξο του κύκλου (Εικόνα 12).



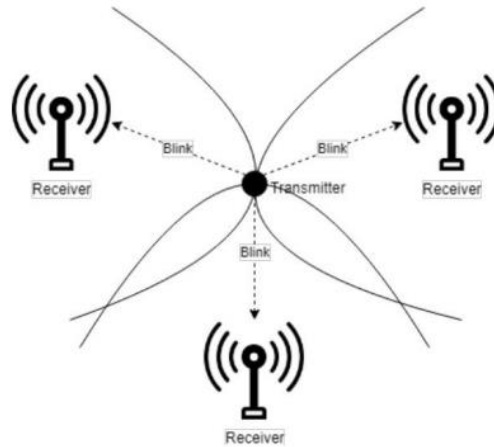
Εικόνα 12 Πότε δύο σημεία ανήκουν στο ίδιο τόξο

Έτσι, η γωνία $\angle b_1ub_2$ και η χορδή b_1b_2 περιορίζουν τη θέση του u πάνω στο τόξο που διέρχεται από τα b_1 , u , b_2 (Εικόνα 10). Ομοίως η γωνία $\angle b_1ub_3$ και η χορδή b_1b_3 περιορίζουν τη θέση του u πάνω στο τόξο που διέρχεται από τα b_1 , u , b_3 , και η γωνία $\angle b_2ub_3$

και η χορδή $b2b3$ περιορίζουν τη θέση του u πάνω στο τόξο που διέρχεται από τα $b2$, u , $b3$. Συνεπώς οι τομές των τριών τόξων (μέσω τριγωνισμού) προσδιορίζουν τη θέση του u .

3.2. Μέθοδος TDoA -Time Difference of Arrival

Σε ότι αφορά την τεχνική TDoA, ανήκει επίσης στην κατηγορία της εκτίμησης κατεύθυνσης άφιξης (DOA), μετράει το χρόνο άφιξης ενός RF σήματος σε πολλά και διάφορα σημεία στο χώρο και έπειτα συγκρίνει τη χρονική διαφορά μεταξύ του κάθε δέκτη. Η παραδοσιακή προσέγγιση για την εκτίμηση της τεχνικής αυτής που χρησιμοποιείται είναι να υπολογίσουμε την cross – correlation (διασταυρούμενη συσχέτιση) ενός σήματος που φτάνει σε δύο δέκτες (receivers). Με δεδομένο ότι γνωρίζουμε τη θέση κάθε δέκτη, μπορεί στη συνέχεια να εξαχθεί μια εκτίμηση της θέσης των πηγών των εκπομπών, με την προϋπόθεση ότι όλοι οι δέκτες είναι χρονικά συγχρονισμένοι. Κάποια παραδείγματα χρησιμοποίησης της TDoA είναι σε εργασίες ραδιοεντοπισμού όπως εντοπισμό κινητών τηλεφώνων σε έκτακτη ανάγκη πχ πυρκαγιά, για τον εντοπισμό του επίκεντρου σε σεισμό κ.α. Επιπλέον, η μέθοδος TDoA προσφέρει μεγάλη ευελιξία στην επιλογή και τη διάταξη της κεραίας, με αποτέλεσμα την ανεξαρτησία της ακρίβειας της μεθόδου από κοντινούς ανακλαστήρες, άλλες κεραίες και καλώδια. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει στους χρήστες της μεθόδου TDoA να επικεντρωθούν σε άλλες λεπτομέρειες κατά τον σχεδιασμό του συστήματος, όπως το μέγεθος της κεραίας, τη πολυπλοκότητα του συστήματος, τη βιωσιμότητα του συστήματος και τη κάλυψη συχνοτήτων. Για τον γεωεντοπισμό ενός ασύρματου πομπού απαιτείται τουλάχιστον τρεις αισθητήρες/κεραίες TDoA. Η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται από αρκετούς καίριους παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό ενός πρακτικού δικτύου αισθητήρων TDoA, όπως η γεωμετρία των αισθητήρων, η ζώνη συχνοτήτων του σήματος, οι περιβαλλοντικοί παράγοντες, η χρονική ακρίβεια, η διάρκεια και η ταχύτητα των υπολογισμών κ.λπ. Τέλος η μέθοδος αυτή είναι σχετικά νέα στην πρακτική εφαρμογή λύσεων ραδιο-παρακολούθησης. Ωστόσο, θεωρείται βασικός λίθος της σύγχρονης ραδιο-παρακολούθησης ικανός να ανιχνεύσει διάφορα κωδικοποιημένα ευρυζωνικά σήματα με υψηλή ακρίβεια. [6,7]



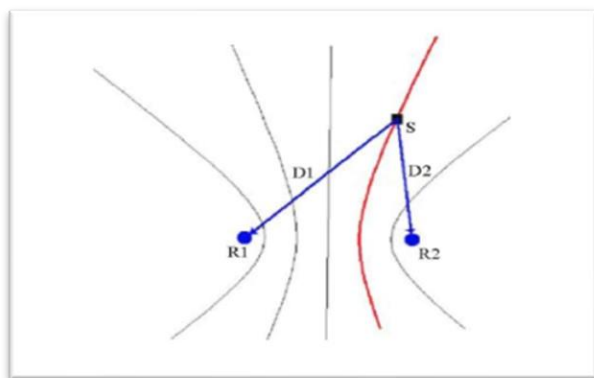
Εικόνα 13 Αποτύπωση της TDoA μεθόδου όταν λαμβάνουν οι δέκτες το σήμα, το σημείο τομής είναι η cross – correlation

3.2.1. Πλεονεκτήματα TDoA τεχνικής

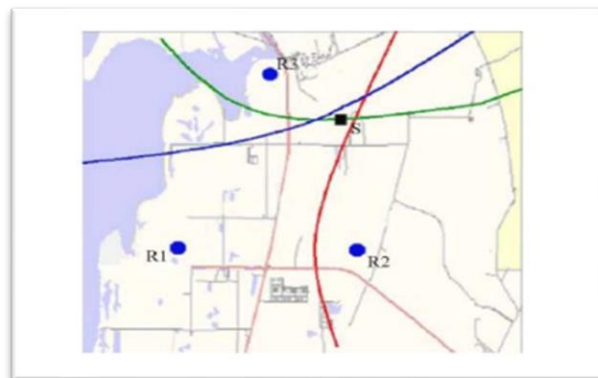
- Η κεραία έχει μικρό κόστος, χαμηλή πολυπλοκότητα και μπορεί να είναι και μικρή σε μέγεθος.
- Η κεραία δεν απαιτεί υψηλές μηχανικές αντοχές, ηλεκτρική ακρίβεια. Επιπλέον λόγω του μικρού μεγέθους που μπορούμε να έχουμε στη κεραία μας υπάρχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να είναι δυσδιάκριτη (πράγμα αρκετά σημαντικό κατά τη εγκατάσταση συστημάτων παρακολούθησης σε ιστορικές ή αρχιτεκτονικά περιορισμένες τοποθεσίες).
- Οι απαιτήσεις τοποθέτησης είναι λιγότερο περιοριστικές. Αυτό επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στην επιλογή θέσεων TDoA. Ως αποτέλεσμα, οι εγκαταστάσεις TDoA αναπτύσσονται ταχύτερα, σε αστικές εγκαταστάσεις μπορούν να τοποθετηθούν πρόσθετοι δέκτες για να ξεπεραστούν τα φαινόμενα σκίασης από ψηλότερες κατασκευές.
- Η TDoA αποδίδει καλύτερα για νέα και αναδυόμενα σήματα με πολύπλοκες διαμορφώσεις, μεγάλο εύρος ζώνης και μικρή διάρκεια.

- Η επεξεργασία συσχέτισης που χρησιμοποιείται στην TDoA μπορεί να καταστείλει θορύβους και παρεμβολές που δεν είναι συσχετισμένοι μεταξύ των θέσεων των κεραιών. Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει στο σύστημα να γεωεντοπίζει σήματα με χαμηλό λόγο σήματος προς παρεμβολή + θόρυβο (χαμηλό SINR).
- Η TDoA μπορεί να κάνει γεωεντοπισμό χρησιμοποιώντας μετρήσεις πολύ μικρής διάρκειας σε σήματα μεγαλύτερης διάρκειας.
- Ο δέκτης και η κεραιά TDoA δεν είναι τόσο πολύπλοκοι . Ένας δέκτης TDoA απαιτεί τουλάχιστον ένα κανάλι RF πραγματικού χρόνου για αδιάληπτη επεξεργασία και με τη μεγαλύτερη πιθανότητα υποκλοπής του σήματος. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ένα λιγότερο πολύπλοκο δέκτη σε ένα απλό ασύρματο περιβάλλον.
- Με προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας, η TDoA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον γεωεντοπισμό σημάτων υψηλού εύρους ζώνης σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους σε μικρή απόσταση και σε περιβάλλοντα με υψηλή multipath ικανότητα.

Ο λόγος για τον οποίο η μέθοδος TDoA πρέπει να έχει τουλάχιστον τρεις δέκτες TDoA και όχι δύο εξηγείται στο παρακάτω παράδειγμα



Εικόνα 14 Υπερβολικές καμπύλες που αναπαριστούν την διαφορά διαδρομής ($D1-D2$) από τις μετρήσεις δύο αισθητήρων TDoA ($R1$ και $R2$).



Εικόνα 15 Γεωεντοπισμός χρησιμοποιώντας τρεις αισθητήρες TDoA (τομή τριών υπερβολικών καμπυλών).

Όπου η Εικόνα 14 δείχνει τη διαφορά διαδρομής ($D1 - D2$) με κόκκινη γραμμή που υπολογίζεται σύμφωνα με τη μέθοδο TDoA. Οι αισθητήρες TDoA λήψης, που ονομάζονται $R1$ και $R2$, μετρούν την χρονική άφιξη των απευθείας σημάτων από την πηγή S και στη συνέχεια υπολογίζεται η χρονική διαφορά (συνήθως σε ένα κεντρικό διακομιστή TDoA). Η χρονική διαφορά που μεταφράζεται σε διαφορά διαδρομής οδηγεί σε μια υπερβολική καμπύλη. Η πιθανή τοποθεσία της πηγής S μπορεί να βρίσκεται οπουδήποτε σε αυτήν την καμπύλη.

Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η μέθοδος TDoA απαιτεί έναν τρίτο αισθητήρα TDoA για να κατασκευάσει επιπλέον χρονικές/διαδρομικές διαφορές μεταξύ διαφορετικών αντιστοιχών ζευγών αισθητήρων TDoA και να εντοπίσει την πηγή στο σημείο της τομής όλων των υπερβολικών καμπυλών (Εικόνα 15).

3.2.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων της τεχνικής TDoA

1. Συγχρονισμός των αισθητήρων: Οι αισθητήρες πρέπει να είναι συγχρονισμένοι για να είναι γνωστή η ακριβής χρονική διαφορά άφιξης του σήματος. Ο μη συγχρονισμός μεταξύ των αισθητήρων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα στις μετρήσεις TDoA και να μην έχουμε ακρίβεια.
2. Ακρίβεια χρονισμού: Η ακρίβεια με την οποία μπορούν να μετρηθούν οι χρονικές διαφορές άφιξης του σήματος είναι ένας σημαντικός παράγοντας. Υψηλότερα επίπεδα ακρίβειας χρονισμού οδηγούν σε μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις TDoA.
3. Σήμα-θόρυβος (SNR): Το SNR είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ακρίβεια των μετρήσεων. Χαμηλότερο SNR μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερο σφάλμα στην εκτίμηση της χρονικής διαφοράς άφιξης του σήματος.
4. Πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος: Η παρουσία εμποδίων, ανακλάσεων κλπ. μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των μετρήσεων. Σε ένα πολύπλοκο περιβάλλον με ανακλάσεις, εμπόδια, ακραία καιρικά φαινόμενα η ακρίβεια μπορεί να μειωθεί.
5. Ακρίβεια μετρήσεων από τους αισθητήρες: Η ακρίβεια των μετρήσεων από τους αισθητήρες επηρεάζει επίσης την ακρίβεια των μετρήσεων TDoA. Με προηγμένους αισθητήρες που παρέχουν υψηλότερη ακρίβεια στις μετρήσεις αυξάνεται και η ακρίβεια των χρονικών διαφορών άφιξης του σήματος.

3.2.3. Παραδείγματα TDoA τεχνικής σήμερα

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ένα παράδειγμα εφαρμογής της τεχνικής TDoA είναι για την διευκόλυνση των επιστημόνων να βρουν το επίκεντρο σε ένα σεισμό. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται με τη χρήση ενός δικτύου σειсмоγράφων ή αισθητήρων. Οι αισθητήρες αυτοί τοποθετούνται σε διάφορες γεωγραφικές θέσεις και καταγράφουν τα σεισμικά κύματα που προκαλούνται από τον σεισμό. Η τεχνική TDoA στηρίζεται στο γεγονός ότι τα σεισμικά

κύματα διαδίδονται με διάφορες ταχύτητες από το επίκεντρο του σεισμού προς τους αισθητήρες. Με τη μέτρηση των χρονικών διαφορών άφιξης των σεισμικών κυμάτων σε διάφορους αισθητήρες, μπορούμε να υπολογίσουμε τις αποστάσεις μεταξύ του επίκεντρου και των αισθητήρων.

Άλλο ένα παράδειγμα είναι για τον εντοπισμό ενός τηλεφώνου σε μία έκτακτη κατάσταση και όχι μόνο. Όταν ένα τηλέφωνο είναι συνδεδεμένο σε ένα κινητό δίκτυο, η τεχνική TDoA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμήσει τη θέση του τηλεφώνου μέσω των σημάτων που ανταλλάσσονται μεταξύ του τηλεφώνου και των κεραιών του δικτύου. Οι κεραιές του κινητού δικτύου τοποθετούνται σε διάφορες τοποθεσίες και μπορούν να μετρήσουν τις χρονικές διαφορές άφιξης των σημάτων από το τηλέφωνο. Αυτές οι χρονικές διαφορές χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί η απόσταση μεταξύ του τηλεφώνου και των κεραιών. Συνήθως, απαιτείται ένας ελάχιστος αριθμός τουλάχιστον τριών κεραιών για να υπολογιστεί η θέση του τηλεφώνου. Όσο περισσότερες κεραιές συμμετέχουν στη μέτρηση, τόσο πιο ακριβής γίνεται ο εντοπισμός της θέσης.

3.2.4. Χρήση κεραιών στην TDoA

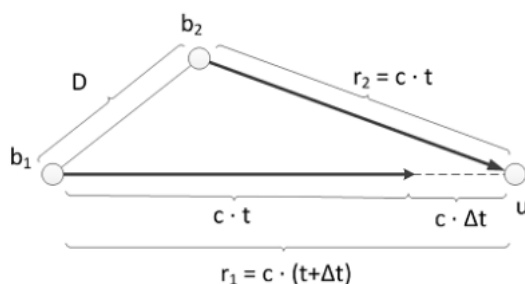
Για την τεχνική TDoA, οι πιο συνηθισμένες είναι οι κεραιές οριζόντιας πολλαπλής εισόδου-πολλαπλής εξόδου (MIMO). Οι κεραιές MIMO επιτρέπουν την αποστολή και λήψη πολλαπλών σημάτων ταυτόχρονα μεταξύ πολλαπλών ανταποκριτών (transceivers). Παράλληλα προσφέρουν το πλεονέκτημα της δυνατότητας μέτρησης των χρονικών διαφορών άφιξης των σημάτων σε διάφορες κεραιές αφού με αυτές τις χρονικές διαφορές, μπορεί να υπολογιστεί η απόσταση μεταξύ της πηγής του σήματος και των κεραιών. Η τεχνική TDoA απαιτεί τη συγχρονισμένη λειτουργία των κεραιών, ώστε να μπορούν να μετρηθούν οι χρονικές διαφορές με ακρίβεια.

Συνήθως, για την τεχνική TDoA χρησιμοποιούνται κεραιές μεγάλης κατευθυντικότητας και υψηλής ευαισθησίας. Αυτό επιτρέπει την ακριβή μέτρηση των χρονικών διαφορών άφιξης των σημάτων και, συνεπώς, την ακριβή προσδιορισμό των αποστάσεων. Κατάλληλα επιλεγμένες κεραιές MIMO μπορούν να παρέχουν υψηλή ακρίβεια στον γεωεντοπισμό βασιζόμενες στις χρονικές διαφορές άφιξης των σημάτων.

3.2.5. Βασικές εξισώσεις της μεθόδου TDoA

Όπως αναφέραμε και παραπάνω η μέθοδος TDoA βασίζεται στην εκτίμηση των χρόνων άφιξης των σημάτων του δύο πομπών από τον ίδιο δέκτη. Έστω ότι δύο σημεία αναφοράς b_1 , b_2 εκπέμπουν συγχρονισμένα και με γνωστή περίοδο δύο σήματα σε διαφορετική συχνότητα (έστω ακουστικά σήματα). Έστω, ότι το σήμα του b_2 ανιχνεύεται στον στόχο u τη

χρονική στιγμή t και το σήμα του b_1 ανιχνεύεται μετά από Δt χρόνο (Εικόνα 16). Δεν γνωρίζουμε τον χρόνο εκπομπής των σημάτων από τα σημεία πάρα μόνο ότι και οι δύο εκπέμπουν την ίδια χρονική στιγμή. Επομένως, αφού δεν είναι γνωστός ο χρόνος t , δεν μπορούμε να εκτιμήσουμε τις αποστάσεις r_1 , r_2 . Μπορούμε να πούμε ότι ο b_2 βρίσκεται πιο κοντά από τον b_1 και μάλιστα σε απόσταση $c \cdot \Delta t$.



Εικόνα 16 Δύο σήματα εκπέμπουν ταυτόχρονα και φτάνουν μια διαφορά χρόνου Δt

Η απόσταση D των b_1 , b_2 είναι γνωστή, η διαφορά των δύο αποστάσεων r_1 , r_2 επίσης γνωστή, επομένως οι πιθανές θέσεις του u στις δύο διαστάσεις είναι η υπερβολή

$$|r_1 - r_2| = c \cdot \Delta t$$

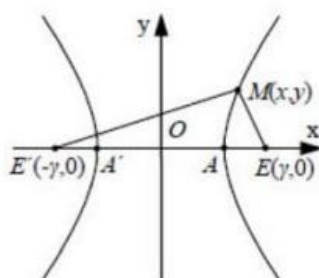
Εξίσωση 4 υπερβολής

Ο γενικός τύπος της υπερβολής (Εικόνα 17) είναι:

$$|ME' - ME| = 2a$$

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1, \text{ όπου } b = \sqrt{c^2 - a^2} \text{ και } E'E = 2c \quad (1)$$

Εξίσωση 5 Γενικός τύπος υπερβολής



Εικόνα 17 Γραφική παράσταση υπερβολής

Από την (1) και για $2\alpha = c \cdot \Delta t$ και $2\gamma = D$ (Εικόνα 16) έχουμε:

$$\frac{4x^2}{(c \cdot \Delta t)^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \text{ με } b = \sqrt{D^2 - (c \cdot \Delta t)^2}$$

Και τελικά

$$\frac{4x^2}{(c \cdot \Delta t)^2} + \frac{4y^2}{D^2 - (c \cdot \Delta t)^2} = 1$$

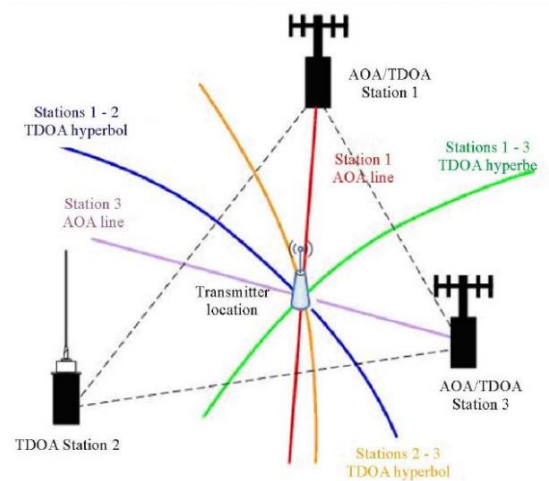
Όπου x, y οι συντεταγμένες του στόχου. Επομένως με την συγχρονισμένη εκπομπή σήματος από δύο σημεία, μπορούμε να εκτιμήσουμε την υπερβολή πάνω στην οποία βρίσκεται ο στόχος.

3.3. Υβριδική μέθοδος (AoA -TDoA)

Η υβριδική μέθοδος συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των μεθόδων TDoA και AoA για να βελτιώσει την ακρίβεια του γεωεντοπισμού ασύρματων πομπών. Η χρήση της υβριδικής μεθόδου επιτρέπει τον συνδυασμό των χαρακτηριστικών των δύο μεθόδων για να παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία. Η υβριδική μέθοδος συνήθως χρησιμοποιεί TDoA για την αρχική εκτίμηση της θέσης του πομπού και στη συνέχεια χρησιμοποιεί AoA για να βελτιώσει την ακρίβεια και να επιβεβαιώσει τη θέση. Με αυτόν τον τρόπο, η υβριδική μέθοδος μπορεί να αντιμετωπίσει τα μειονεκτήματα των δύο μεθόδων και να παρέχει μια ισορροπημένη λύση μεγαλύτερης ακρίβειας και ευελιξίας. Η τεχνική αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλούς τομείς και εφαρμογές, όπως [10] :

- Εντοπισμός θέσης σε κινητή τηλεφωνία: Η τεχνική Hybrid μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό της θέσης κινητών τηλεφώνων. Με την συνδυασμένη χρήση πληροφοριών AoA και TDoA από διάφορες κεραίες του δικτύου, μπορεί να επιτευχθεί ακριβέστερος και πιο αξιόπιστος εντοπισμός της θέσης του τηλεφώνου με μεγάλη ακρίβεια.
- Παρακολούθηση οχημάτων: Η τεχνική Hybrid μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της θέσης οχημάτων, όπως αυτοκινήτων ή φορτηγών. Με την συνδυασμένη χρήση GPS για τον γενικό εντοπισμό και την τεχνική AoA για τον εντοπισμό της γωνίας άφιξης του σήματος, μπορεί να επιτευχθεί πιο ακριβής παρακολούθηση της θέσης και κατεύθυνσης των οχημάτων.

- Εντοπισμός παραβίασης: Η τεχνική Hybrid μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό παραβίασης ή παραβατικής συμπεριφοράς σε περιορισμένους χώρους, όπως αεροδρόμια ή σύνορα χωρών, συνδυάζοντας αισθητήρες που βασίζονται στην τεχνική AoA και TDOA, μπορεί να εντοπιστεί ακριβώς η θέση της πηγής παραβίασης.



Εικόνα 18 Απεικόνιση υβριδικής μεθόδου

3.4. Σύγκριση επιδόσεων μεταξύ των τεχνικών AOA, TDOA και Hybrid

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας με συνοπτικά στοιχεία για τις επιδόσεις των τριών τεχνικών ώστε να γίνει μια σύγκριση μεταξύ τους και να παρθούν κάποια θεωρητικά συμπεράσματα

Επιδόσεις	AoA	TDoA	Hybrid(AoA-TDoA)
Ελάχιστος αριθμός σταθμών για γεωεντοπισμό	Δυο	Τρεις	Τουλάχιστον τρεις . Δύο από αυτούς τους σταθμούς χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των χρονικών διαφορών άφιξης (TDoA), ενώ ο τρίτος σταθμός χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της γωνίας άφιξης (AoA). Ωστόσο, για μεγαλύτερη ακρίβεια και ευστάθεια, συνήθως χρησιμοποιούνται περισσότεροι αισθητήρες.
Ακρίβεια γεωεντοπισμού	Όσο πιο κοντά στο σταθμό βάσης τόσο μεγαλύτερη η ακρίβεια , όσο απομακρυνόμαστε μειώνεται η ακρίβεια.	Όσο πιο μεγάλη η απόσταση μεταξύ των σταθμών TDoA, τόσο μεγαλύτερη η ακρίβεια του γεωεντοπισμού. Όσο πιο κοντά βρίσκονται οι σταθμοί TDoA, τόσο μικρότερη είναι η ακρίβεια.	Όσο πιο πολλές μετρήσεις και πληροφορίες λαμβάνονται από διάφορους αισθητήρες και χρησιμοποιούνται και οι δύο μέθοδοι, τόσο αυξάνεται η ακρίβεια του γεωεντοπισμού.
Μέθοδος ανεξάρτητη από τη διαμόρφωση του σήματος	Δεν είναι απόλυτα ανεξάρτητη από τη διαμόρφωση του σήματος, αλλά η επίδραση της διαμόρφωσης εξαρτάται από τα συγκεκριμένα συστήματα και τις υλοποιήσεις της.	Ναι	Η ανεξαρτησία από τη διαμόρφωση του σήματος εξαρτάται από την ακρίβεια των μετρήσεων AoA και TDoA και την ορθή εφαρμογή των αλγορίθμων υπολογισμού της θέσης. Μερικώς ανεξάρτητη.

Απαίτηση επικοινωνίας σε δεδομένα	Χαμηλή, 10-30 kbit/s	Μέτρια προς υψηλή, 120 kbit/s – 2 Mbit/s	Ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή και τις ακριβείς απαιτήσεις του συστήματος. Συνήθως έχει αυξημένες απαιτήσεις επικοινωνίας σε δεδομένα σε σύγκριση με τις ατομικές μεθόδους.
Χωροταξικοί Περιορισμοί	Δύσκολη ανύψωση μεγάλων κεραιών, μειώνοντας έτσι τις επιλογές εγκατάστασης.	Απλοί , αφού επιτρέπονται ευέλικτες επιλογές εγκατάστασης και εύκολη ανύψωση των σταθμών χωρίς ανάγκη για μεγάλες κεραίες.	Παρόμοια με την ΑοΑ καθώς απαιτείται η χρήση κεραιών μεγάλου μεγέθους για την ακριβή μέτρηση της γωνίας άφιξης
Τύπος κεραίας / Πολυπλοκότητα κεραίας	Κατευθυντικές κεραίες/ Κεραία πολλαπλών στοιχείων άρα έχει μεγάλη πολυπλοκότητα, μεγάλη σε μέγεθος και υψηλό κόστος.	Ομοικατευθυντικές κεραίες αλλά με λιγότερο πολυπλοκότητα και μικρότερο μέγεθος και κόστος.	Η χρήση της μπορεί να αυξήσει τη πολυπλοκότητα της κεραίας σε σχέση με τη χρήση μιας μόνο μεθόδου όπως και το κόστος.
Απαίτηση για calibration	Απαραίτητο	Απαραίτητο	Απαραίτητο
Απόσταση κάλυψης	Από μερικά μέτρα έως μερικά εκατοντάδες μέτρα, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες.	Από μερικές εκατοντάδες μέτρα έως κάποια χιλιόμετρα, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες.	Έχει τη δυνατότητα να καλύψει μεγάλες αποστάσεις και περιοχές.
Κόστος εγκατάστασης και λειτουργία της τεχνικής	Συνήθως είναι υψηλό, ειδικά αν λάβουμε υπόψη τις απαιτήσεις υποδομής, εξοπλισμού και διαχείρισης του συστήματος.	Θα μπορούσε και εδώ να είναι υψηλό αν αναλογιστούμε την χρήση προηγμένου εξοπλισμού και υποδομών.	Υψηλό

Ανθεκτικότητα σε παρεμβολές	Ανθεκτική σε ορισμένες παρεμβολές αλλά μπορεί να επηρεαστεί από κάποιες παραμέτρους και συνθήκες που εμφανίζονται κατά τη μετάδοση του σήματος , όπως φυσικά εμπόδια , καιρός κτλπ.	Σχετικά ανθεκτική σε παρεμβολές, αλλά η ανθεκτικότητά της μπορεί να εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως οι συνθήκες περιβάλλοντος και οι χαρακτηριστικά του σήματος που χρησιμοποιείται.	Η ανθεκτικότητα σε παρεμβολές εξαρτάται από την ακρίβεια και την αξιοπιστία των μετρήσεων που λαμβάνονται από τους αισθητήρες και την ικανότητα του αλγορίθμου συνδυασμού των δεδομένων να αντιμετωπίσει τις παρεμβολές. Γενικά όμως παρέχει υψηλή ανθεκτικότητα σε παρεμβολές.
Σήματα ευρείας ζώνης , χαμηλού SNR και σήματα μικρής διάρκειας	Συνήθως αποδίδει καλύτερα για σήματα στενής ζώνης . Είναι ανεξάρτητη από το εύρος ζώνης του σήματος , αλλά αποδίδει καλύτερα σε σήματα υψηλού SNR.	Αποδίδει καλύτερα για νέα και αναδυόμενα σήματα με πολύπλοκες διαμορφώσεις , μεγάλο εύρος ζώνης και μικρή διάρκεια . Η ακρίβεια της βελτιώνεται καθώς αυξάνεται το εύρος ζώνης του σήματος και σε σήματα υψηλότερου SNR.	Συνδυασμός
Ταχύτητα γεωεντοπισμού	Υψηλή	Όχι τόσο υψηλή	Αρκετά υψηλή

Πίνακας 1 Σύγκριση των τριών μεθοδολογιών ανάλογα με τις επιδόσεις τους

Συμπεράσματα

Είναι προφανές ότι υπάρχουν διακριτά χαρακτηριστικά και των δύο μεθόδων TDoA και AoA που τις καθιστούν κατάλληλες και ελκυστικές για ένα συγκεκριμένο σενάριο γεωεντοπισμού που εξετάζεται. Επομένως, ο συνδυασμός και των δύο μεθόδων μπορεί να βοηθήσει στην αντιμετώπιση της ασάφειας γεωεντοπισμού που σχετίζεται αποκλειστικά με το TDoA ή το AoA και να βελτιώσει την ακρίβεια του. Σαν ένα γενικό συμπέρασμα και σύμφωνα με τις παραπάνω επιδόσεις που συγκρίθηκαν στο πίνακα θα μπορούσαμε να αναφέρουμε τα εξής:

Κάθε τεχνική έχει τα πλεονεκτήματά της και τα μειονεκτήματά της, όπως και τα σενάρια χρήσης για τα οποία είναι κατάλληλη. Η τεχνική AoA θα λέγαμε ότι είναι πιο κατάλληλη για γεωεντοπισμό με χρήση 2 κεραιών/αισθητήρων, σε κάποια απόσταση μεταξύ τους, παρέχοντας βέβαια όχι και το απόλυτο από πλευράς εκτίμησης μετρήσεων. Η τεχνική TDoA απαιτεί περισσότερους αισθητήρες για ακριβείς εκτιμήσεις, αλλά μπορεί να είναι ευαίσθητη στην αστάθεια του χρονισμού των σημάτων. Για να καταλήξουμε όμως σε κάποιο συμπέρασμα θα πρέπει να ξέρουμε το περιβάλλον στο οποίο θα υλοποιήσουμε τις μετρήσεις αλλά και τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Οπότε η επιλογή της καλύτερης τεχνικής θα γίνει ανάλογα των περιορισμών και των απαιτήσεων μας.

Σίγουρα όμως η Υβριδική τεχνική που αποτελεί τον συνδυασμό AoA με TDoA είναι η καλύτερη τεχνική από τις τρεις μιας και μας παρέχει τα πλεονεκτήματα και των δύο μεθόδων σε μία. Έχει πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα γεωεντοπισμού από τις άλλες δύο, μιας και η εμβέλεια του μπορεί να καλύψει χιλιόμετρα. Επιπλέον είναι πολύ περισσότερο πιο ανθεκτική σε παρεμβολές και φαινόμενα που επηρεάζουν τη μετάδοση του σήματος. Μπορεί σαν κόστος η Υβριδική τεχνική να κοστίζει περισσότερο μιας και τα κόστη εγκατάστασης και λειτουργίας είναι μεγαλύτερα, αλλά η ακρίβεια των μετρήσεων είναι πολύ μεγαλύτερη και πιο σωστή.

4

Μεθοδολογία υλοποίησης μετρήσεων γεωεντοπισμού ΑοΑ

Για την υλοποίηση της διπλωματικής εργασίας, πήρα μέρος στο Nestor Project, [15] προκειμένου να υλοποιηθούν κάποιες μετρήσεις γεωεντοπισμού ΑοΑ, σε περιοχές κοντά στα σύνορα του Έβρου. Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσω το Nestor Project (τι είναι , τι σκοπό έχει, τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήσαμε, την διαδικασία βαθμονόμησης και την συμμετοχή που είχα σε αυτό).

Αρχικά το Nestor Project είναι ένα ευρωπαϊκό πρόγραμμα και χρηματοδοτείται από την ΕΕ, αντιμετωπίζει ένα κοινό «πρόβλημα» μεταξύ των χωρών της ΕΕ, πιο συγκεκριμένα το πρόβλημα αυτό είναι η διαφύλαξη των ευρωπαϊκών θαλάσσιων και επίγειων συνόρων. Για το σκοπό αυτό, το project στοχεύει στο να δείξει ένας πλήρως λειτουργικό σύστημα επόμενης γενιάς, ολιστικής παρακολούθησης συνόρων που παρέχει προ-ενδεικτική επίγνωση πέρα από τα θαλάσσια και επίγεια σύνορα, ακολουθώντας τον στόχο της ΕΙΒΜ. Ο κύριος στόχος του project είναι να δώσει κίνητρο στις υπηρεσίες παρακολούθησης των συνόρων για να αξιοποιήσουν σύγχρονες τεχνολογίες που υποστηρίζουν τα κράτη μέλη στην επίτευξη πλήρους γνώσης της κατάστασης στα εξωτερικά τους σύνορα και τη βελτίωση της ικανότητας λήψης αποφάσεων και αντίδρασης των αρχών ασφαλείας τους. Για αυτό το σκοπό το έργο αυτό αναπτύσσει μια ευέλικτη, ολοκληρωμένη λύση, προσαρμοσμένη στις ανάγκες και απαιτήσεις των τελικών χρηστών, συνδυάζοντας ολοκληρωμένες ικανότητες παρακολούθησης, έγκαιρη επίγνωση της κατάστασης λίγο πριν τα σύνορα και τροφοδοσίες από αισθητήρες υψηλής τεχνολογίας και πολλά εξαρτήματα απαραίτητων στοιχείων. Οι τεχνολογίες του Nestor σχηματίζουν ένα αλληλο-συνδεδεμένο δίκτυο για την ανίχνευση, αξιολόγηση και αντίδραση σε παράνομες δραστηριότητες σε αποστολές παρακολούθησης συνόρων (επίγεια ή εκ θαλάσσης). Το ερευνητικό αυτό πρόγραμμα έλαβε χώρα σε 3 διαφορετικές χώρες στην Ευρώπη (Λιθουανία , Κύπρος , Ελλάδα).

4.1. Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε

4.1.1. ADFA κεραία

Η κεραία ADFA [11] της εταιρίας Narda χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές ραντάρ, εφαρμογές παρακολούθησης σήματος και ανίχνευσης. Η κεραία προσφέρει υψηλή ακρίβεια στην κατεύθυνση των σημάτων και μπορεί να ανιχνεύσει σήματα από μεγάλες αποστάσεις. Είναι από τα βασικότερα στοιχεία του εξοπλισμού μας, καθώς είναι αυτή που μας βοηθάει να εντοπίσουμε το σήμα που εκπέμπεται από την πηγή που θέλουμε να εντοπίσουμε.

Λίγα λόγια για την κεραία αυτή και πως τη χρησιμοποιήσαμε :

- Αρχικά στήθηκε σε 2 DF(direction finding) σταθμούς που είχαμε επιλέξει (στην περίπτωση την δική μας έχουν στηθεί σε ένα ύψωμα όπου είχε εγκατεστημένους πυλώνες κινητής τηλεφωνίας, οπότε οι ADFA κεραίες εγκαταστάθηκαν πάνω στους πυλώνες).
- Σε κάθε DF σταθμό έχει επίσης εγκατασταθεί και ειδικό αλεξικέραυνο για την καλύτερη προστασία της κεραίας.
- Η ADFA έχει 9 directional elements τοποθετημένα γύρω γύρω , έτσι ώστε να μπορούμε να πάρουμε 360 μοίρες κάλυψη δηλαδή λειτουργεί με τη χρήση πολλαπλών στοιχείων κεραίας που τοποθετούνται σε μια στρογγυλή στήριξη και διαμορφώνουν μια καμπυλότητα σε σχήμα κύκλου. Ο σχεδιασμός αυτός επιτρέπει στην κεραία να πραγματοποιεί ευαίσθητες μετρήσεις του σήματος σε διαφορετικές γωνίες και να υπολογίζει την κατεύθυνση της πηγής του σήματος.
- Τοποθετήθηκε σε θέση τέτοια ώστε να κοιτάζει προς τον Βορά (εκεί στρέφεται το σημείο ενδιαφέροντος) για καλύτερα αποτελέσματα.
- Είναι εξοπλισμένες με GNSS και έτσι διασφαλίζουν την απρόσκοπτη λήψη των συντεταγμένων GPS, της κατεύθυνσης της πυξίδας και των πληροφοριών ώρας.
- Μπορεί να σταθεροποιηθεί και να στηθεί και στην οροφή αμαξίου με κατάλληλες καιρικές συνθήκες.

Παρακάτω παρουσιάζεται μια εικόνα της ADFA κεραίας, στημένη στην οροφή ενός αμαξίου, και το εσωτερικό της.



Εικόνα 19 Απεικόνιση κεραίας ADF4 με εφαρμογή στην οροφή αμαξιού και τα εσωτερικά της στοιχεία

4.1.2. *Walkie Talkie Motorola TLKR T92 H2O*

Είναι ένα αδιάβροχο φορητό ραδιοεπικοινωνιακό σύστημα (που χρησιμοποιήσαμε για να εκπέμπουμε συχνότητα από σημεία ενδιαφέροντος) όπου καλύπτει μια απόσταση έως και 10 χιλιομέτρων σε ανοιχτό χώρο. Είναι ένα αξιόπιστο και ανθεκτικό σύστημα επικοινωνίας που παρέχει φωνητική επικοινωνία σε δύσκολες καιρικές συνθήκες, όπως βροχή, χιόνι και υγρασία. Καλύπτει το εύρος συχνοτήτων 446.00625 έως 446.19375 MHz στην Ευρώπη και άλλες περιοχές που χρησιμοποιούν το πρότυπο PMR446. Εμείς το χρησιμοποιήσαμε για εκπομπή στη συχνότητα 446 MHz. [12]



Εικόνα 20 Walkie Talkie Motorola TLKR T92 H2O

4.1.3. FT-818ND

Το FT-818ND [13] είναι ένας πομποδέκτης ραδιοερασιτεχνικού εξοπλισμού της Yaesu που χρησιμοποιήσαμε επίσης για να εκπέμψουμε συχνότητα από σημεία ενδιαφέροντος. Ο FT-818ND είναι ένας πομποδέκτης πολλαπλών ζωνών, καλύπτοντας τα φάσματα HF, 51 MHz, 145 MHz και 431 MHz (οι συχνότητες που εκπέμψαμε). Έχει ισχύ εξόδου έως και 6W στα HF και 50MHz, και έως και 2.5W στα VHF και UHF. Επιπλέον, διαθέτει ενσωματωμένο μετρητή SWR, δυνατότητα σύνδεσης με υπολογιστή για ραδιοερασιτεχνικά λογισμικά.

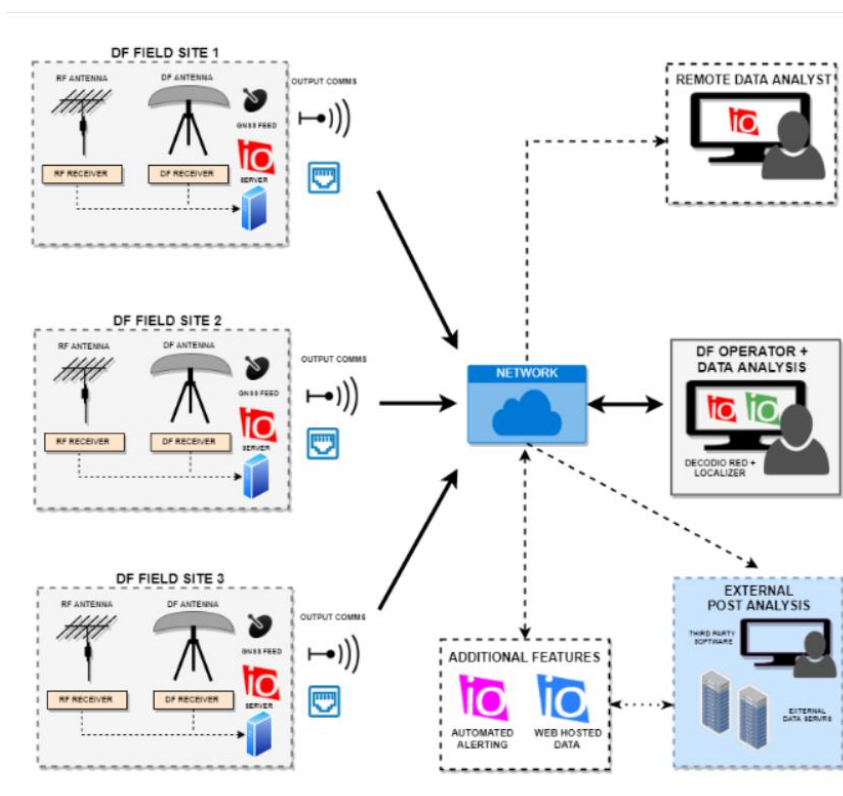


Εικόνα 21 FT-818ND

4.1.4. Decodio Localization software

Είναι ένα λογισμικό που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό και την ανάλυση σημάτων ασύρματης επικοινωνίας. Το λογισμικό αυτό διαθέτει πολλαπλά εργαλεία για την ανίχνευση και την ανάλυση σημάτων, καθώς και για την εκτίμηση της θέσης πηγών σημάτων. Συγκεκριμένα είναι σε θέση να εντοπίζει πηγές σήματος με βάση την ένταση του σήματος σε διαφορετικά σημεία του χώρου, χρησιμοποιώντας πολλαπλούς δέκτες και αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος. Επιπλέον, το λογισμικό αυτό προσφέρει εκτεταμένες δυνατότητες ανάλυσης σημάτων, όπως ανίχνευση και αποκωδικοποίηση αναλογικών και ψηφιακών σημάτων επικοινωνίας. Με τη χρήση του Decodio Localization Software [14], μπορεί να γίνει ανάλυση της επικοινωνίας που πραγματοποιείται μεταξύ διαφόρων συσκευών, όπως κινητά τηλέφωνα, ασύρματα δίκτυα και άλλες συσκευές επικοινωνίας. Επίσης, το λογισμικό παρέχει εκτεταμένες δυνατότητες οπτικοποίησης και ανάλυσης δεδομένων, ώστε να είναι δυνατή η

επεξεργασία των αποτελεσμάτων και η διενέργεια αναλύσεων για συγκεκριμένες ανάγκες. Το λογισμικό χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς, όπως οι τηλεπικοινωνίες, η ασφάλεια, η έρευνα και η ανάπτυξη, και είναι κατάλληλο για χρήση σε διάφορους τύπους επιχειρήσεων, κρατικές αρχές και άλλους οργανισμούς που ασχολούνται με την εντοπισμό και την ανάλυση σημάτων ασύρματης επικοινωνίας. Στην περίπτωση του Nestor Project το software αυτό, χρησιμοποίησε την τεχνική Angle of Arrival για τον εντοπισμό της κατεύθυνσης του σήματος. Αυτό επιτεύχθηκε με τη χρήση κατάλληλων αισθητήρων όπως τις κεραίες ADFA που αναφέρθηκε παραπάνω, όπου το λογισμικό λαμβάνει σήματα από τους αισθητήρες και εφαρμόζει αλγόριθμους AoA, και αυτό γίνεται με τη χρήση πολλαπλών σταθμών παρακολούθησης (monitoring stations) οι οποίοι συλλέγουν σήματα από διαφορετικές κατευθύνσεις, και στη συνέχεια αναλύουν αυτά τα σήματα για να υπολογίσουν την κατεύθυνση προέλευσης τους.



Εικόνα 22 Setup του Decodio localizer/υβριδική μέθοδος

4.1.5. SignalShark

Το SignalShark [11] είναι ένας φορητός αναλυτής συχνотήτων της εταιρείας Narda. Αυτό το εργαλείο παρέχει αξιόπιστη ανίχνευση σήματος και ανάλυση συχνотήτων σε μια ποικιλία εφαρμογών, όπως η μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος, η ανίχνευση ενδοεπικοινωνιακών παρεμβολών, η μέτρηση της απόδοσης ασύρματων δικτύων κ.α. Με το SignalShark, οι χρήστες μπορούν να εντοπίσουν και να αναλύσουν σήματα σε πραγματικό χρόνο και να αποθηκεύσουν τα δεδομένα για μελλοντική ανάλυση. Το SignalShark μπορεί να λειτουργήσει σε συνδυασμό με τις κεραίες ADFA και το λογισμικό Decodio Localization, για την εκτίμηση της κατεύθυνσης άφιξης σημάτων. Η κεραία ADFA χρησιμοποιείται για τον αυτόματο εντοπισμό κατευθύνσεων άφιξης σημάτων υψηλής συχνотητας, ενώ το λογισμικό Decodio Localization παρέχει την ανάλυση και τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων αυτών των μετρήσεων. Για τη χρήση του SignalShark με τις κεραίες ADFA και το λογισμικό Decodio Localization, θα πρέπει να συνδεθούν όλες οι συσκευές μεταξύ τους. Αφού γίνει η σύνδεση, το λογισμικό Decodio Localization θα πρέπει να ρυθμιστεί ώστε να λειτουργεί με το SignalShark και να αναλύει τα δεδομένα που συλλέγονται από τις κεραίες ADFA. Στη συνέχεια, μπορούν να γίνουν μετρήσεις της κατεύθυνσης άφιξης των σημάτων και να παραχθούν αναλυτικά αποτελέσματα. Αυτή η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλούς σκοπούς, όπως για τον εντοπισμό παράνομων παρεμβολών στο φάσμα των ραδιοσυχνотήτων, για τον εντοπισμό πηγών ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών που επηρεάζουν τη λειτουργία άλλων ηλεκτρονικών συστημάτων και για τον εντοπισμό σημάτων σε επικίνδυνες περιοχές, όπως επίγεια και θαλάσσια σύνορα για τις αφίξεις μεταναστών.

Ένα παράδειγμα για το πώς χρησιμοποιείται το Narda Signal Shark με τις κεραίες ADFA (Automatic Direction Finding Antenna) μαζί με το Decodio localization software :

Αρχικά στήνουμε την ADFA κεραία μας σε ένα από τους 2 DF (direction finding) σταθμούς που έχουμε επιλέξει (στην περίπτωση την δική μας έχουν στηθεί σε ένα ύψωμα όπου είχε εγκατεστημένους πυλώνες κινητής τηλεφωνίας , οπότε οι ADFA κεραίες εγκαταστάθηκαν πάνω στους πυλώνες). Σε κάθε DF σταθμό έχει επίσης εγκατασταθεί και ειδικό αλεξικέραυνο όπου θα προστατέψει την κεραία μας σε περίπτωση κεραυνού. Το επόμενο βήμα είναι να συνδεθεί στο SignalShark, εάν τη συνδέσουμε απευθείας με τη συσκευή , η κεραία μας έχει ενσωματωμένο καλώδιο με δύο connectors : έναν control connector (τροφοδοσία ρεύματος και μετάδοση δεδομένων και σημάτων ελέγχου) και έναν N-connector (για τη μετάδοση του σήματος RF). Έπειτα, το SignalShark συνδέεται σε ένα LTE dongle (Το LTE dongle αποτελείται από μια συσκευή η οποία χρησιμοποιείται για να παρέχει πρόσβαση στο διαδίκτυο μέσω της τεχνολογίας LTE. Το LTE είναι ένα πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας που παρέχει αρκετά υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων σε κινητά δίκτυα. Το dongle είναι μια μικρή φορητή συσκευή που συνήθως συνδέεται μέσω μιας θύρας USB σε έναν υπολογιστή, laptop ή tablet. Όταν συνδέεται σε ένα δίκτυο LTE, το dongle μπορεί να λειτουργήσει ως ένα μόντεμ για να παρέχει ασύρματη πρόσβαση στο διαδίκτυο στη συσκευή στην οποία είναι συνδεδεμένο. Με αυτό το τρόπο παρέχει πρόσβαση στο διαδίκτυο σε φορητές συσκευές, σε περιοχές όπου δεν υπάρχει επαρκής σύνδεση), στέλνει τα δεδομένα από την ADFA σε μια κεντρική τοποθεσία. Το Decodio software τρέχει μέσα στο SignalShark και λαμβάνει τις πληροφορίες θέσης από την ADFA και τις τοποθεσίες GPS, καθώς και τη χρονική σήμανση με αλγορίθμους της τεχνικής

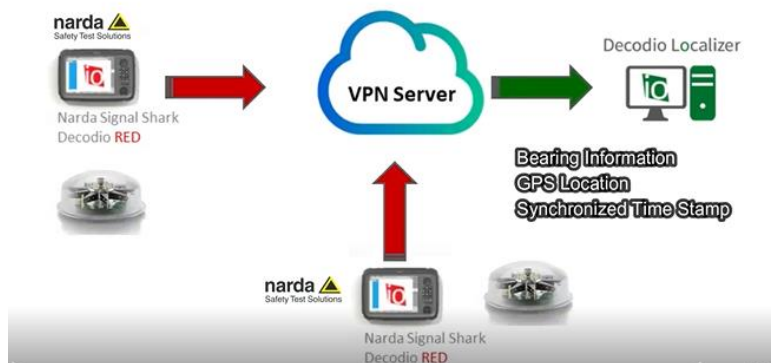
ΑοΑ και τα στέλνει σε μία κεντρική τοποθεσία, όπου εκτελείται το localization software. Αυτός είναι ο ένας από τους δύο DF σταθμούς, με τον ίδιο τρόπο αλλά σε διαφορετική τοποθεσία θα προχωρήσουμε στο setup του δεύτερου DF σταθμού. Στον κεντρικό σταθμό θα παρθούν όλα τα data από τους 2 DF σταθμούς ώστε να εντοπίσουμε την στοχευμένη πληροφορία, ο οποίος αποτελείται από ένα φορητό υπολογιστή (συνδεδεμένο στο ίδιο vρη network όπως και οι υπόλοιποι DF stations) όπου ανακτά τις πληροφορίες και τις παρουσιάζει σε ένα χάρτη, δείχνοντας το heat map του σημείου που είναι πιθανό να βρίσκεται ο πομπός. Συνεπώς, έχουμε δυο DF stations όπου είναι στημένοι σε διαφορετικές τοποθεσίες, και ένας άγνωστος πομπός εκπέμπει σήμα με έναν ασύρματο. Οπότε εντοπίστηκε το σήμα στο σημείο Χ μέσω του heat map. Στο σημείο που είναι κόκκινο ο χάρτης σημαίνει ότι υπάρχει στο σημείο εκείνο μεγαλύτερη πιθανότητα να βρίσκεται ο άγνωστος πομπός.



Εικόνα 23 Βήμα 1. Τοποθέτηση κεραίας ADFA στο πρώτο DF station



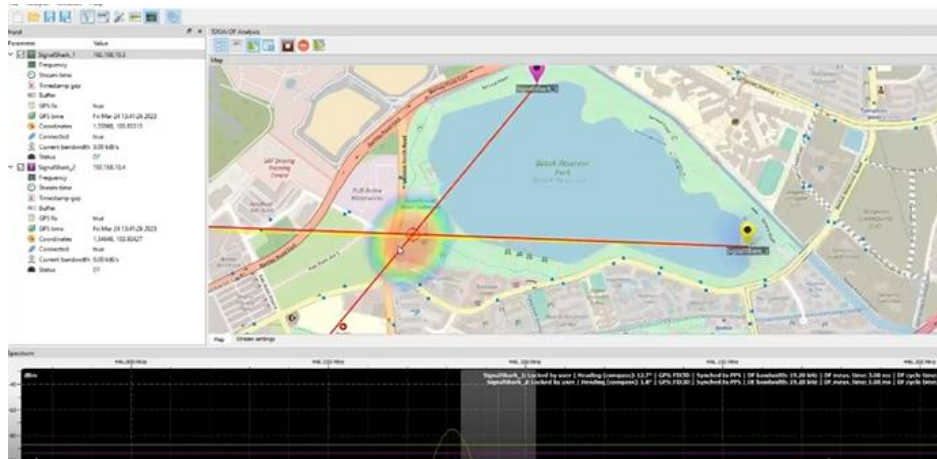
Εικόνα 24 Βήμα 2. Τοποθέτηση κεραίας ADFA στο δεύτερο DF station



Εικόνα 25 Εικονική λειτουργία του decodio software



Εικόνα 26 Οι 2 DF σταθμοί στο χάρτη



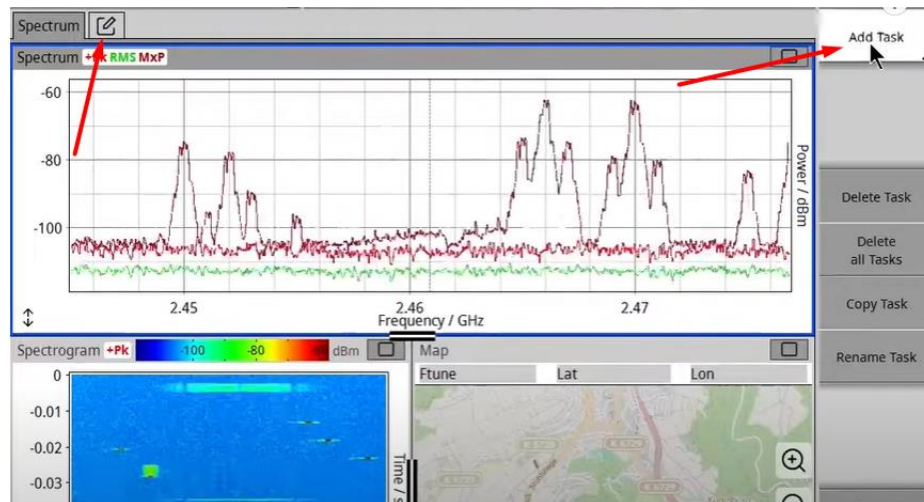
Εικόνα 27 Βήμα 3. Το heat map του signal shark όταν γίνεται μια άγνωστη εκπομπή

4.1.5.1 Signal Shark λειτουργία – παραδείγματα real time

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια στιγμιότυπα real time μέσα από τη συσκευή του signal shark και κάποιες επεξηγήσεις ώστε να κατανοηθεί η λειτουργία του .

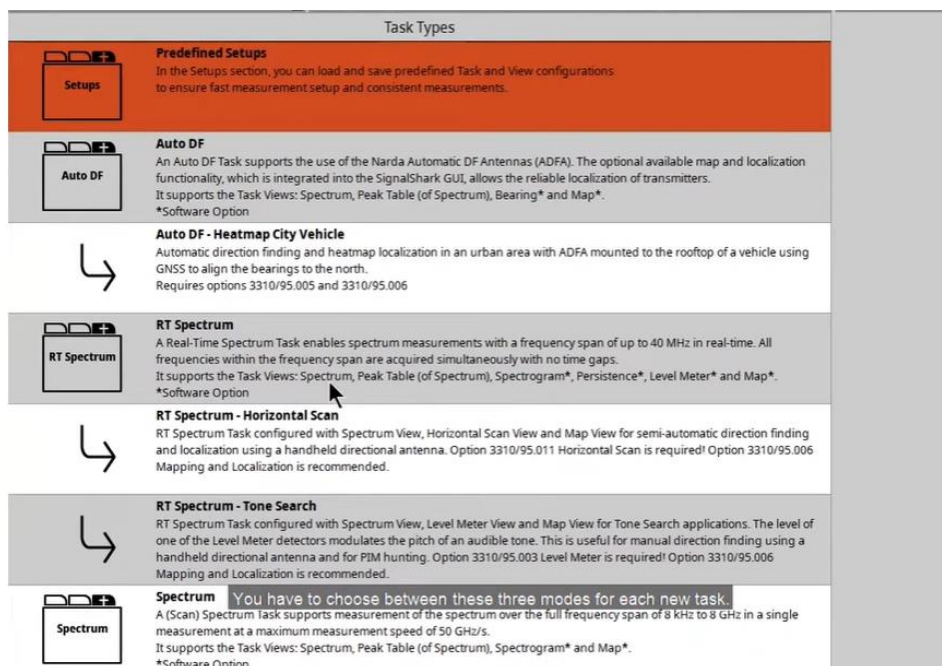
Βήμα 1

Μετά το άνοιγμα του signal shark, πρώτα πρέπει να ανοίξουμε ένα νέο task με τις default ρυθμίσεις, για να το κάνουμε αυτό, επιλέγουμε το edit field στο task tabs και μετά ενεργοποιούμε το “add task”.



Εικόνα 28 Βήμα1 Signal Shark υλοποίηση, δημιουργία νέου task

Το signal shark έχει 3 λειτουργίες, την auto df, real time spectrum και spectrum. Οπότε πρέπει να επιλέξουμε ανάμεσα σε αυτές τις 3. Η Auto DF επιτρέπει την αυτόματη εύρεση κατεύθυνσης με ADFA κεραίες. Το rt spectrum επιτρέπει την χρήση real time συμπεριφοράς από τον αναλυτή έως 40 MHz (span). Στο spectrum μπορείς να χρησιμοποιήσεις το span ως τα μέγιστα όρια συχνότητας του αναλυτή αλλά μετά δεν θα βρίσκεται σε real time mode.

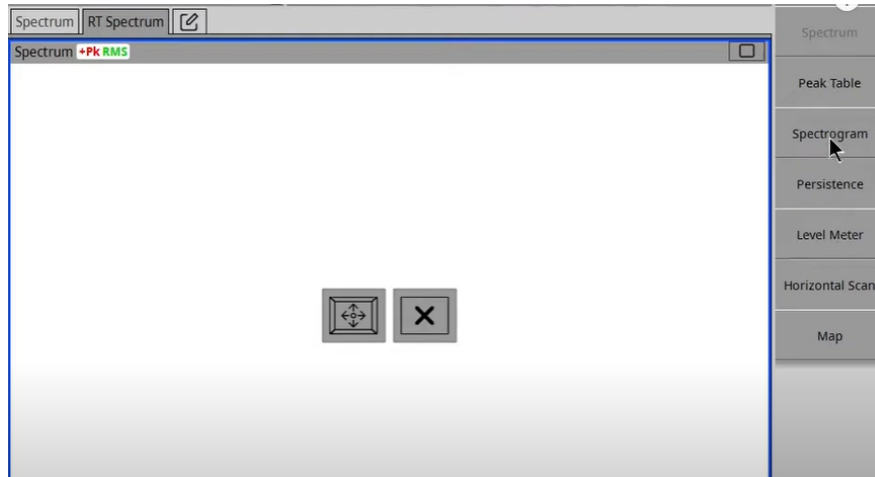


Εικόνα 29 Οι τύποι των tasks

Εμείς θα ασχοληθούμε πχ με τις real time μετρήσεις στο spectrum, που όπως βλέπουμε έχει προστεθεί στην μπάρα και το σχετικό πλαίσιο.

Βήμα 2

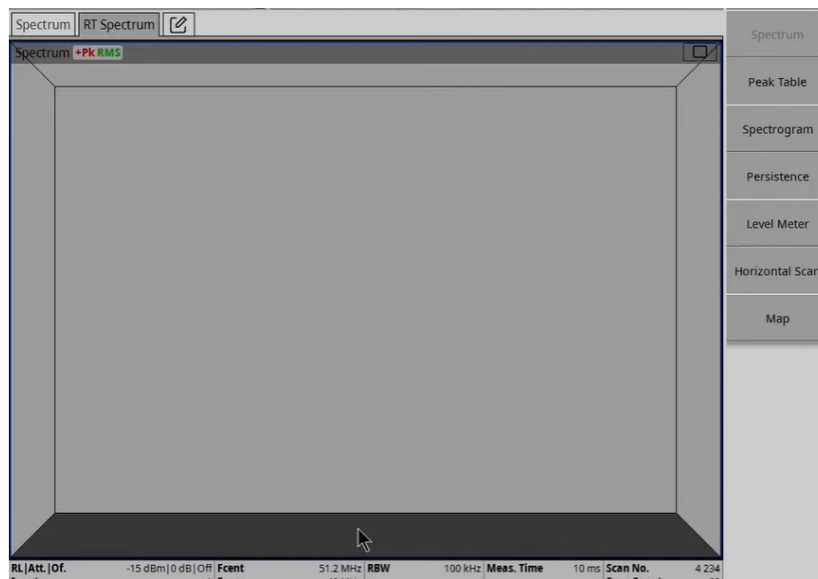
Επόμενο βήμα είναι να ορίσουμε την εμφάνιση των αποτελεσμάτων με την μορφή που θέλουμε. Εάν θέλουμε να ενεργοποιήσουμε επιπλέον το spectrogram πατάμε στο αντίστοιχο πεδίο.



Εικόνα 30 Βήμα2 , ορίζουμε τη μορφή που θέλουμε για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων

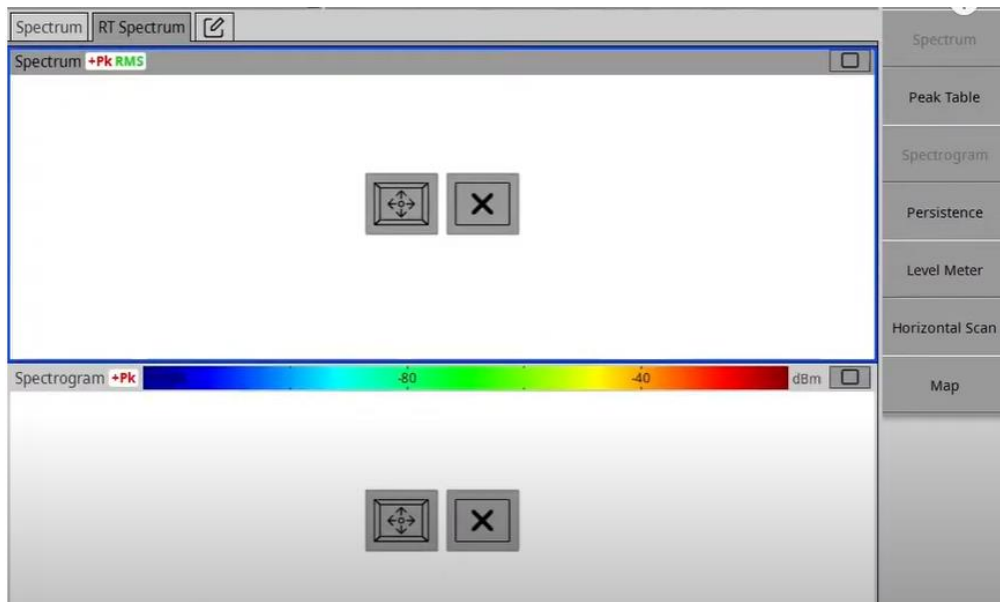
Βήμα 3

Ακολουθώς έχουμε να ορίσουμε που θα τοποθετηθεί το spectrogram, πάνω, κάτω, δεξιά ή αριστερά στο υπάρχον φάσμα. Επιλέγουμε πχ να το τοποθετήσουμε στο κάτω μέρος



Εικόνα 31 Βήμα3 ορίζουμε που θα θάλουμε το spectrogram

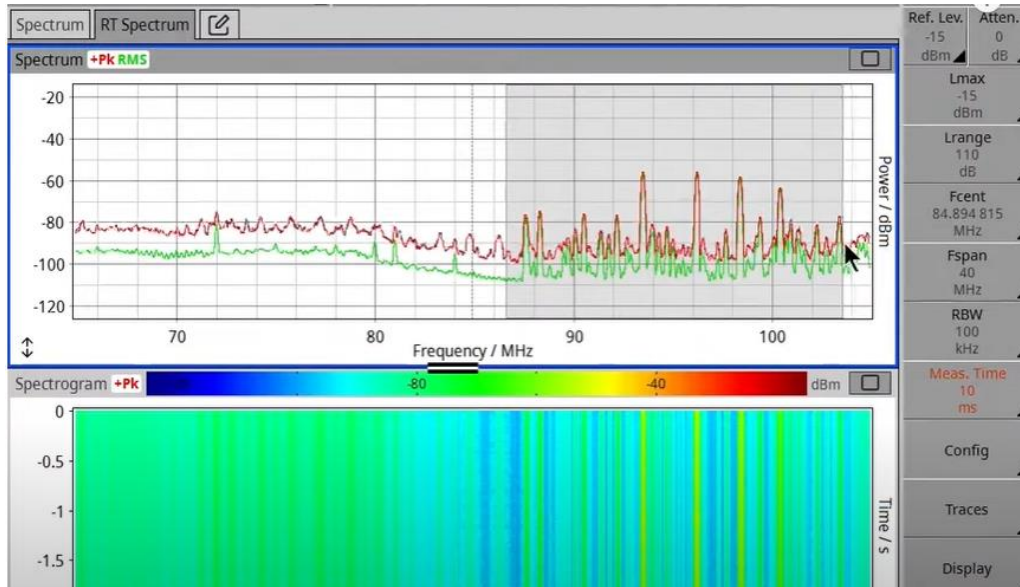
Οπότε αυτό που βλέπουμε είναι μια pre-view από αυτό που θα δούμε, μπορούμε να προσθέσουμε περισσότερα ή και να διαγράψουμε επίσης .



Εικόνα 32 Βλέπουμε την μορφή που θα έχει πριν θάλουμε τα αποτελέσματα

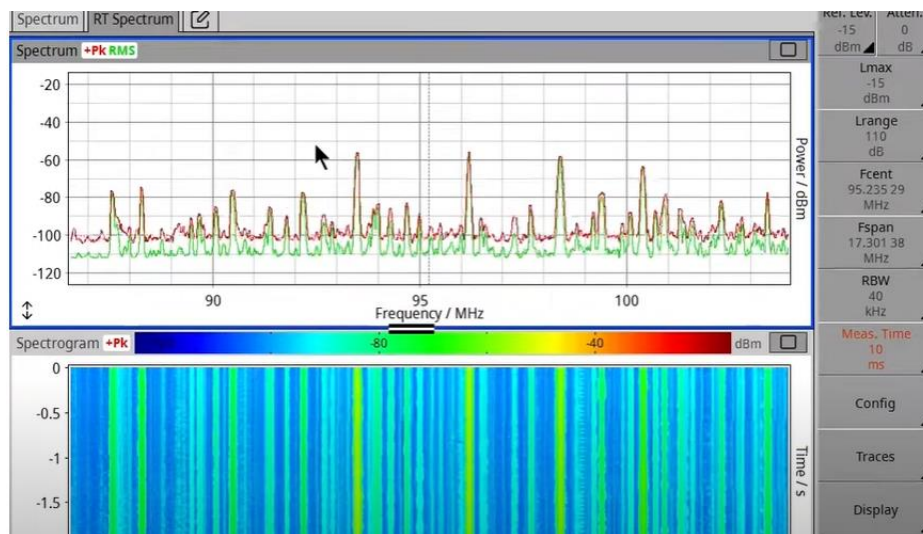
Βήμα 4

Εάν θέλουμε να μετακινηθούμε στο εύρος της συχνότητας που μετρίεται real time, για παράδειγμα να μετρήσουμε ένα FM band, μπορούμε να το κάνουμε εύκολα ακουμπώντας τη κλίμακα τιμών του άξονα της συχνότητας και απλά μετακινώντας στην επιθυμητή θέση. Εάν επιλέξουμε στην οθόνη την περιοχή που θέλουμε να μεγεθύνουμε, μπορούμε να ορίσουμε ένα παράθυρο μεγέθυνσης μετακινώντας από δεξιά στα αριστερά όπως φαίνεται παρακάτω.

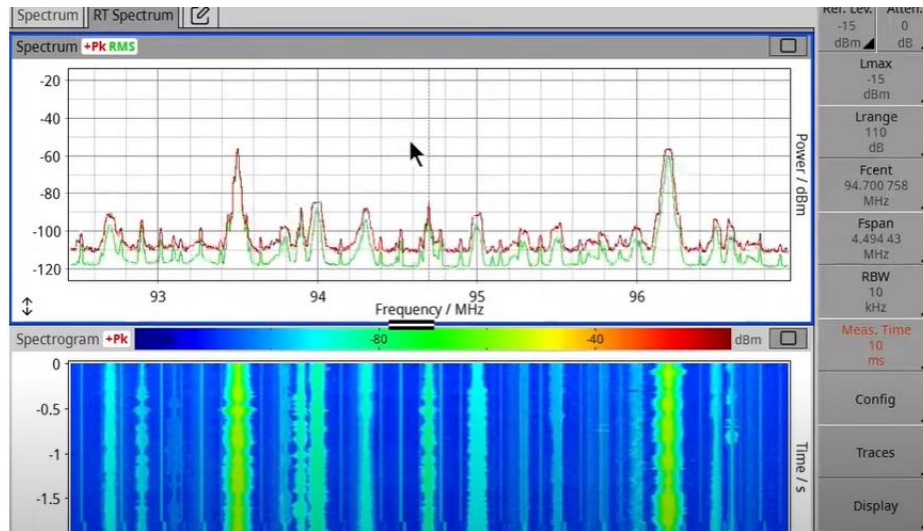


Εικόνα 33 Βήμα4 έχουμε τα αποτελέσματα και μπορούμε να μεγενθύνουμε ή να ελαχιστοποιήσουμε το σήμα

Μπορούμε να μεγεθύνουμε την περιοχή ώστε να δούμε καλύτερη τη συχνότητα που μας ενδιαφέρει. Μετά από μεγέθυνση έχουμε αυτά τα αποτελέσματα και όπως βλέπουμε η κεντρική συχνότητα διατηρείται αλλά το span διπλασιάζεται.

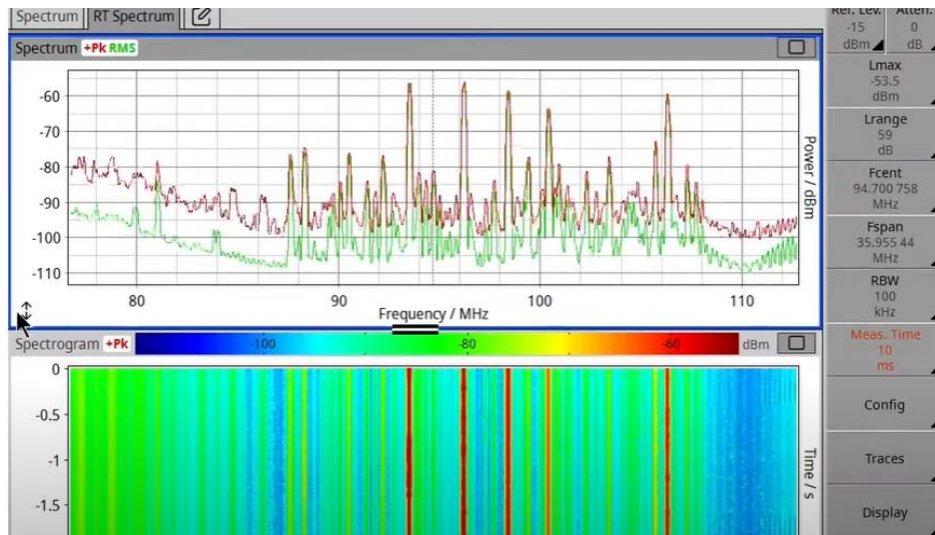


Εικόνα 34 Το μεγενθυμένο σήμα, παρατηρούμε τη διατήρηση της κεντρικής συχνότητας



Εικόνα 35 Βλέπουμε ότι το span έχει διπλασιαστεί

Αν θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε την απεικόνιση του πλάτους επιλέγουμε το διπλό σύμβολο που είναι πάνω από το spectrogram και έχουμε το ακόλουθο αποτέλεσμα.



Εικόνα 36 Βελτιστοποίηση του πλάτους

Όπως βλέπουμε στα στιγμιότυπα παραπάνω στα δεξιά υπάρχει μια μπάρα με κάποιες λειτουργίες, πιο αναλυτικά για κάθε λειτουργία έχουμε :

Ref. Level / Atten (Attenuator) : Το reference level είναι ένας έμμεσος τρόπος για να οριστεί η τρέχουσα τιμή του attenuator. Καθορίζει τη μέγιστη μετρήσιμη στάθμη. Για μεγαλύτερη ευκολία ορίζει επίσης το ανώτερο όριο του άξονα της προβολής. Η ευαισθησία του συστήματος εξαρτάται από τη ρύθμιση του attenuator εισόδου. Η ρύθμιση αυτή καθορίζεται από την παράμετρο RL. Η υψηλή ευαισθησία μέτρησης αποφεύγει την παραποίηση των αποτελεσμάτων λόγω θορύβου που παράγεται εσωτερικά από τη συσκευή. Από την άλλη πλευρά, είναι σημαντικό η συσκευή να μην υπερφορτώνεται (κορεσμός). Ο κορεσμός μπορεί επίσης να προκληθεί από σήματα εκτός της ζώνης συχνοτήτων, π.χ. ραδιοπομπούς υψηλής ισχύος κατά τη μέτρηση σημάτων κινητής τηλεφωνίας. Η ρύθμιση της Ref. Level καλύπτει έως και 25 dB ανάλογα με τα προσαρτημένα εξαρτήματα (τύπος κεραίας κ.λπ.) και είναι συνδεδεμένη με τη ρύθμιση του attenuator εισόδου (Attenuator, Atten). Ο attenuator εισόδου μπορεί να προσαρμοστεί ιδανικά στο σήμα μέτρησης μέσω της ρύθμισής του σε βήματα των 0,5 dB. Στην υψηλότερη ρύθμιση Atten = 2 dB - στην πιο ευαίσθητη, Atten = 0 dB.

Lmax / Lrange :

Στο πεδίο Lmax μπορούμε να κάνουμε τα εξής:

- Να ορίσουμε το επίπεδο μηδέν του άξονα γ.
- Να ορίσουμε τη λειτουργία εισόδου: Απόλυτη ή σχετική
- Να ορίσουμε τη σύζευξη : Όταν η σύζευξη έχει οριστεί σε Ενεργό, οι προβολές μιας εργασίας είναι συνδεδεμένες (π.χ. ο άξονας).

Το κουμπί Lrange επιτρέπει να ορίσουμε το εύρος του άξονα γ.

Entry mode : Το Κουμπί αυτό μας επιτρέπει να καθορίσουμε αν οι τιμές εισάγονται ως απόλυτες ή σχετικές τιμές.

Coupling : Το κουμπί αυτό μας επιτρέπει να συνδέσουμε τον άξονα επιπέδων των προβολών μέσα σε ένα task .

Fcent / Fspan : Ορίζουμε μια κεντρική συχνότητα και ένα εύρος συχνοτήτων.

RBW : Οι κανονικοί τύποι φίλτρων εύρος ζώνης ανάλυσης (RBW) ή εύρος ζώνης καναλιού (CBW) επιτρέπουν να επιλέξουμε ένα στενό εύρος συχνοτήτων με το επιθυμητό εύρος ζώνης από ένα φάσμα ευρείας ζώνης και να καταστείλουμε τις υπόλοιπες συνιστώσες του σήματος. Στις λειτουργίες εργασιών Spectrum και RT Spectrum, είναι δυνατή η χρήση φίλτρων EMC αντί των κανονικών φίλτρων. Κατά τη χρήση φίλτρων EMC μπορούν να επιλεγούν τα ακόλουθα εύρη ζώνης: 10 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 1 kHz, 9 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 120 kHz, 1 MHz. Τα διαθέσιμα εύρη ζώνης εξαρτώνται επίσης από τη ρύθμιση Fspan. Μετά την επιλογή του τύπου φίλτρου EMC, το RBW ή CBW αντικαθίσταται παντού στις αντίστοιχες προβολές από το EBW .

Meas.Time : Εδώ μπορούμε να ρυθμίσουμε το χρόνο μέτρησης. Ο χρόνος μέτρησης ή ανιχνευτή καθορίζει το χρονικό εύρος που χρησιμοποιείται από τους εσωτερικούς ανιχνευτές για τον υπολογισμό των τιμών τους (+Pk, RMS, -Pk, ...).

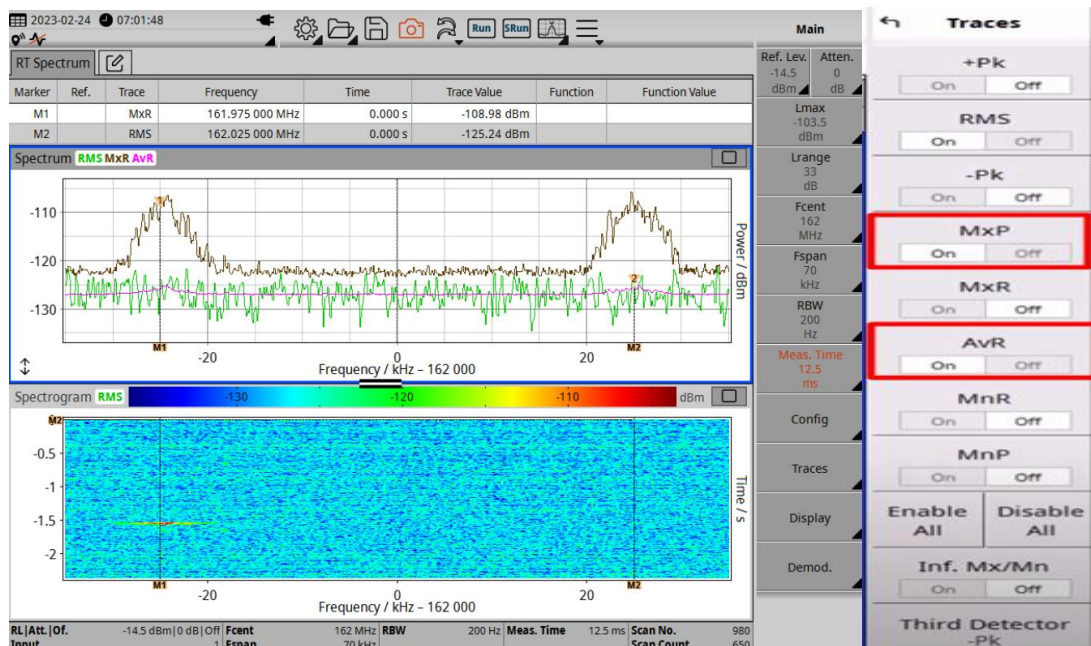
Config : Εδώ μπορούμε να ορίσουμε τον τρόπο εκτέλεσης των μετρήσεων.

Traces : Εδώ μπορούμε να επιλέξετε ποια traces θα εμφανίζονται (+Pk , RMS , Avg , MxP , MxR , AvR , MnR ,MxA):

Display : Εδώ μπορούμε να αλλάξουμε τις γενικές ρυθμίσεις απεικόνισης, όπως το σημείο μηδέν του άξονα Y, το εύρος του άξονα Y ή τη μονάδα του άξονα (οι διαθέσιμες ρυθμίσεις εξαρτώνται από την τρέχουσα προβολή).

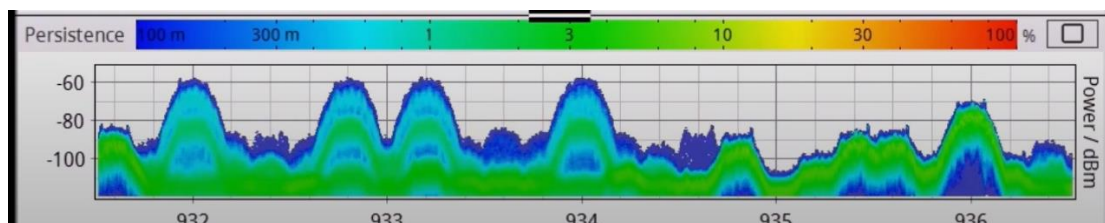
Βήμα 5

Σε συνέχεια του πρώτου στιγμιότυπου παρατηρούμε ότι το σχεδιάγραμμα αναπαριστά την εστίαση μας σε έναν σταθμό βάσης, στο RT spectrum ενεργοποιήσαμε πολλαπλές διαδρομές (traces->MxP,AvR) για να εκτιμήσουμε τα ελάχιστα και μέγιστα επίπεδα, έπειτα ενεργοποιήσαμε το spectrogram ώστε να δούμε καλύτερα και να αναλύσουμε σε βάθος το φάσμα συχνοτήτων. Επίσης προσαρμόσαμε τις ρυθμίσεις μας όπως το measurement time, span για να εστιάσουμε περισσότερο στο σήμα ενδιαφέροντος. Μια τέτοια ανάλυση με πολλές οπτικές σχετικά με το σήμα και ενδεχομένως την αντίστοιχη αποδιαμόρφωση είναι ένας σημαντικός βοηθός για εξαγωγή συμπερασμάτων με την ενδεχόμενη πηγή παρεμβολών. Συνήθως οι παρεμβολές από λανθασμένα ή προβληματικά ηλεκτρονικά συστήματα που χρησιμοποιούμε συμπεριφέρονται με μορφή κυμάτων και εμφανίζουν σαφώς περιορισμένο εύρος ζώνης σε αντίθεση με σκόπιμα ραδιοσήματα που λειτουργούν ως παρεμβολές.



Εικόνα 37 Βήμα5 Ενεργοποίηση του MxP, AvR για την εκτίμηση μέγιστων και ελαχίστων επιπέδων, για εξαγωγή συμπερασμάτων της ενδεχόμενης πηγής παρεμβολών

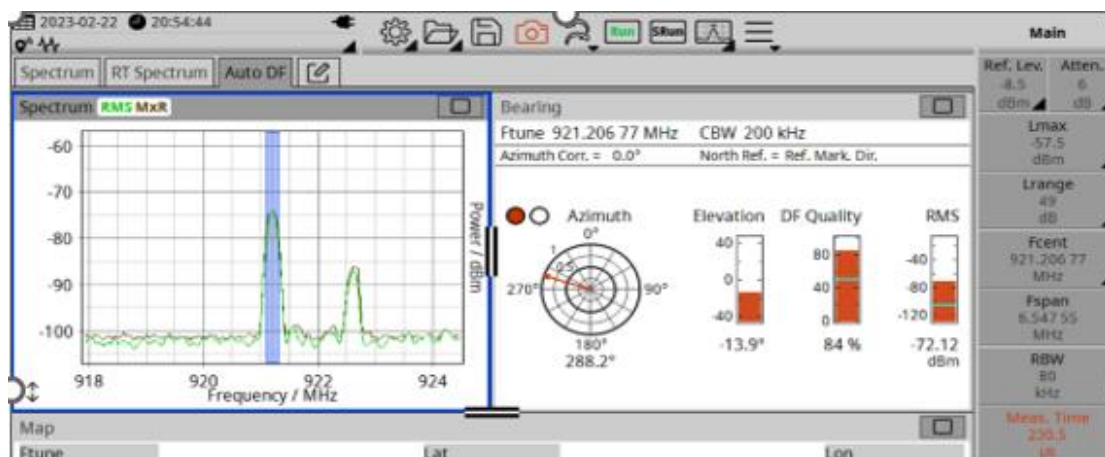
Εδώ βλέπουμε μια κυματομορφή οπότε μπορούμε να καταλάβουμε ότι υπάρχει πρόβλημα με κάποια ηλεκτρονική συσκευή.



Εικόνα 38 παράδειγμα κυματομορφής παρεμβολών από ένα προβληματικό σύστημα, όπου βλέπουμε το περιορισμένο εύρος ζώνης του και τη συγκεκριμένη μορφή του

Βήμα 6

Παρακάτω έχουμε και το τελικό στάδιο μας, το οποίο μπορούμε να το εμφανίσουμε ενεργοποιώντας το πεδίο `signal shark automatic direction finding mode`. Στο `auto df mode` χρησιμοποιούμε όπως φαίνεται 3 παράθυρα : Το `real time spectrum`, το `bearing` (Στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, ο όρος αυτός αναφέρεται στη γωνία που μετρίεται σε μοίρες ή απόσταση σε μοίρες από μια κατεύθυνση ή ένα σημείο αναφοράς, και συχνά χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης μεταξύ δύο σημείων ή αντικειμένων σε έναν χώρο, όπως σε περιπτώσεις ανακατεύθυνσης σημάτων κεραιών, ναυσιπλοΐας, αεροπορίας και άλλων εφαρμογών που απαιτούν προσδιορισμό κατευθύνσεων) και το χάρτη. Αυτά τα 3 παράθυρα επίσης παραμετροποιούνται αυτόματα, βασισμένα στις διάφορες μετρήσεις του `signal shark` και καλύπτουν πολλούς διαφορετικούς τύπους σημάτων και περιβάλλοντος (αστικού ή αγροτικού). Στην περίπτωση μας χρησιμοποιήσαμε `markers` και `traces` για να υποδείξουμε για παράδειγμα άλλα σήματα σε παρακείμενα κανάλια ή για να μετρήσουμε την ισχύ του καναλιού. Στο παράθυρο του `bearing`, η κύρια ρύθμιση που χρειάζεται να ρυθμιστεί στο σήμα ενδιαφέροντος μας είναι το `channel bandwidth` όπου το `cbw` πρέπει να ρυθμιστεί στο `signal bandwidth`, υποδεικνύεται με μπλε γραμμή στο `spectrum`. Επιλέγοντας ένα ευρύτερο `cbw`, μπορεί να είναι χρήσιμο όταν το σήμα αλλάζει σε συχνότητα αλλά προσθέτει επίσης περισσότερη ισχύ θορύβου την οποία θέλουμε να αποφύγουμε. Από την άλλη επιλέγοντας ένας μικρότερο `cbw` μπορεί να είναι χρήσιμο όταν παρουσιάζονται σήματα σε κοντινά παρακείμενα κανάλια και θα πρέπει να αποκλειστούν από τον γεωεντοπισμό, ωστόσο χαμηλότερο `cbw` σημαίνει χαμηλότερη λαμβανόμενη ισχύς του σήματος ενδιαφέροντος. Συνεπώς καταλαβαίνουμε πόσο σημαντική παράμετρος είναι το `setup` του `cbw`. Επίσης μπορούμε να δούμε την τρέχουσα `RMS` ισχύ του καναλιού για το κανάλι που είναι μαρκαρισμένο με τη μπλε γραμμή στο `spectrum`. Επιπλέον στην οθόνη του `bearing` έχουμε κάποιες ενδείξεις για την `df quality` και το `elevation`. Εκτός από τις γραμμές της πυξίδας που μας δείχνουν το τελευταίο αποτέλεσμα `bearing`, βλέπουμε μια πορτοκαλί και μια μαύρη κουκκίδα κάθε φορά που έχει υπολογιστεί ένα έγκυρο αποτέλεσμα, αυτές οι δύο κουκκίδες αλλάζουν χρώμα και τα τρία ραβδογράμματα θα χρωματίζονται επίσης με πορτοκαλί χρώμα. Έπειτα θα εμφανιστεί μια κόκκινη γραμμή και η προβολή χάρτη για ένα σύντομο χρονικό διάστημα, στην προβολή χάρτη χρησιμοποιούμε την παρούσα τοποθεσία όπως θεωρούμε τη διαδρομή μας και την ύποπτη παρεμβολή σε αυτό το περιβάλλον. Τέλος θα εμφανιστεί ένα `heat map` στον ίδιο χάρτη το οποίο θα μας εμφανίσει και την πιθανότερη τοποθεσία της παράνομης εκπομπής με όσο πιο κόκκινο χρώμα τόσο πιο πιθανή η θέση της. (Για λόγους απορρήτου δεν μου επιτράπηκε να χρησιμοποιήσω τους χάρτες και τα πραγματικά `heat maps`, οπότε επέλεξα να μη τα αναφέρω. Έχω περιγράψει όμως παραπάνω σε παράδειγμα κάποια ενδεικτικά)



Εικόνα 39 Βήμα6 Εμφάνιση του τελικού αποτελέσματος, με τις ενδείξεις για το spectrum, bearing και το χάρτη. Βλέπουμε επίσης και μεγεθυμένη την RMS ισχύ του καναλιού

4.2. Η συμμετοχή σε αυτό το project, διαδικασία μετρήσεων και βαθμονόμησης

Η συμμετοχή μου στο πρόγραμμα αυτό ήταν πάνω στο κομμάτι της βαθμονόμησης (calibration) για τον γεωεντοπισμό σήματος από μία πηγή που εξέπεμπε κάποια συχνότητα με την βοήθεια του SignalShark και της τεχνικής AoA. Υπήρχαν 3 τοποθεσίες/σταθμοί βάσης που πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές σε περιοχές κοντά στα σύνορα του Έβρου. Από τον κάθε σταθμό λαμβάναμε αρκετές διαφορετικές μετρήσεις σε πολλά σημεία στο εύρος της περιοχής, και κινούμασταν σε ακτίνα από 500 μέτρα και πάνω από τους σταθμούς βάσης, προσπαθώντας όσο των δυνατών να είμαστε πλησιέστερα στις τοποθεσίες που γίνονται πιο συχνά οι παράνομες διελεύσεις μεταναστών (σύμφωνα με τις πληροφορίες που μας παρείχε η ελληνική αστυνομία). Χρησιμοποιήθηκαν 2 συσκευές που εξέπεμπαν συχνότητα, ένας πομποδέκτης FT-818ND και ένας ασύρματος πομποδέκτης Motorola PMR T92. Οι συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν στα 51MHz, 145MHz, 431MHz από τον FT-818ND και 446MHz από τον ασύρματο. Οπότε το πρώτο βήμα ήταν να βρεθούμε στα σημεία της κάθε τοποθεσίας που είχαν σχεδιαστεί από πριν, ώστε να γίνουν οι εκπομπές, έπειτα εξέπεμπε κάποιος σε αυτές τις συχνότητες για κάποια δευτερόλεπτα περίπου 7-8 φορές για τον κάθε σταθμό σε διαφορετικά σημεία γύρω του κάθε φορά. Ακολούθως αυτός που έκανε την εκπομπή έστελνε το σημείο που βρισκόταν σε συντεταγμένες μέσω των google maps από το κινητό του τηλέφωνο. Μόλις γινόταν η εκπομπή φαινόταν το σήμα που έρχεται στο SignalShark και εμφανιζόταν μια πιθανή τοποθεσία του πομπού όπου και πάλι κρατούσαμε τις συντεταγμένες του πιθανού σημείου εκπομπής, για να τις επαληθεύσουμε. Στο τελευταίο βήμα αφού τελείωσαν οι μετρήσεις κάναμε την επαλήθευση, αν το πραγματικό σημείο του πομπού δηλαδή ήταν κοντά με το σημείο που μας έστελνε το SignalShark. Οπότε αφού

κάναμε όλα τα στάδια, αμέσως μετά σημείωνα σε ένα αρχείο excel για την κάθε τοποθεσία τις μετρήσεις που εξαγόntonτουσαν από το SignalShark, με σκοπό να τις χρησιμοποιήσω για την ανάλυση των αποτελεσμάτων που περιγράφονται σε επόμενο κεφάλαιο.

5

Υλοποίηση και αποτελέσματα μετρήσεων γεωεντοπισμού ΑοΑ

Για κάθε μέτρηση που πραγματοποιήθηκε τα στοιχεία που κρατήθηκαν και αναγράφηκαν σε excel ήταν : η true angle, η μέτρηση της γωνίας για κάθε συχνότητα τη στιγμή που μετρήθηκε (MHz όπως την έχω σημειώσει στο φύλλο), η correction value , το Error και το pwr dBm. Η απόσταση του πομπού που έκανε την εκπομπή στη μετάδοση για κάθε μία από τις 4 συχνότητες και της κεραίας ήταν ≤ 500 μέτρων και σε κάποιες περιπτώσεις υπήρχαν και δοκιμές σε μεγαλύτερη απόσταση των 500 μέτρων. Να σημειωθεί επίσης ότι οι καιρικές συνθήκες δεν ήταν και οι πιο ευνοϊκές μιας και υπήρχε στη περιοχή δυνατός άνεμος και βροχή και για αυτό το λόγο σε κάποια σημεία υπήρχαν κενές μετρήσεις, πράγμα που φαίνεται και σε κάποια διαγράμματα. Συνολικά έγιναν μετρήσεις σε τρεις διαφορετικές τοποθεσίες σε αρκετά σημεία για την καθεμία, σε κάθε τοποθεσία η εκπομπή που γινόταν περιλάμβανε και τις 4 συχνότητες που είχαμε (51 MHz, 145 MHz, 431MHz Και 446MHz). Επίσης σε κάθε τοποθεσία δεν έγιναν ο ίδιος αριθμός μετρήσεων λόγω διάφορων περιορισμών που προέκυψαν (δυσκολίας προσέγγισης των σημείων που είχαν σχεδιαστεί να χρησιμοποιηθούν), συνεπώς σε κάποιες τοποθεσίες υπήρχαν περισσότερες μετρήσεις από άλλες. Όμως ο αριθμός των μετρήσεων που πραγματοποιηθήκαν μας επιτρέπει να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα μιας και είναι αρκετός. Παρακάτω απεικονίζονται 5 διαγράμματα για την κάθε τοποθεσία, τα οποία προκύπτουν από τις μετρήσεις που είχα σημειώσει σε αρχείο excel, και τα διαγράμματα έγιναν επίσης στο περιβάλλον του excel με βάση τις μετρήσεις. Επίσης αναλύεται ξεχωριστά τι σημαίνει το κάθε στοιχείο μέτρησης (η κάθε στήλη) από την Εικόνα 40 παρακάτω που παρουσιάζεται παρακάτω.

1	Site	True Angle °	Distance m	51,2 MHz	51,2 MHz corr. Val.	PWR dBm
2	1	75	500	96	-21	-73
3	2	75		93	-18	-96
4	3					
5	4	75		83	-8	-101
6	5	75				
7	6	26		59	-33	-86
8	7	2		7	-5	-87
9	8	348		343	5	-96
10	9	315		305	10	-90
11	10	219	2800	247	-28	-93
12	11	194	2600	246	-52	-98
13	12	138	2250	138	0	-97
14	13	107				
15						

Εικόνα 40 Παράδειγμα από στιγμιότυπο φύλου excel για κατανόηση των στηλών στη πρώτη συχνότητα που μετρήθηκε. (Οι ίδιες στήλες και για τις υπόλοιπες συχνότητες)

Site : Είναι τα 13 σημεία που πήραμε μετρήσεις από την πρώτη μας τοποθεσία.

Distance m : Είναι η απόσταση μεταξύ του σταθμού βάσης και του πομπού.

True Angle : Η έννοια της "true angle" αναφέρεται στη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της κατευθυντικής κεραίας ενός πομπού και της κατεύθυνσης του σήματος που μεταδίδεται ή λαμβάνεται. Είναι σημαντική για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος μας, καθώς μπορεί να επηρεάσει την ισχύ του σήματος που φτάνει στον δέκτη. Επηρεάζεται από παράγοντες όπως η απόσταση μεταξύ των κεραιών, η συχνότητα λειτουργίας του σήματος και η παρουσία εμποδίων όπως δέντρα ακόμα και ο ισχυρός άνεμος.

MHz : Αποτυπώνει τη γωνία του σήματος που λαμβάνουμε την στιγμή της εκπομπής. Παράδειγμα με βάση το στιγμιότυπο παραπάνω : Το σημείο τοποθεσίας #8 (γραμμή 9) είναι πραγματικά στις 348° (true angle). Αλλά για 51 MHz μετρήσαμε 343°. Επομένως, πρέπει να προσθέσουμε μια διόρθωση +5° (CV). Ωστόσο, για μια άλλη συχνότητα στην ίδια πραγματική γωνία θα πρέπει να εξετάσουμε μια διαφορετική τιμή διόρθωσης, καθώς οι τιμές αυτές μπορεί να αλλάζουν όχι μόνο ως προς την κατεύθυνση αλλά και ως προς τη συχνότητα.

Correction Value (CV) : Για να υπολογίσουμε τη CV κάνουμε την αφαίρεση, της μέτρησης της true angle, με τη μέτρηση της γωνίας κάθε συχνότητας που αντιστοιχεί στην εκάστοτε γωνία (στοιχείο MHz).

Pwr dBm : Το Pwr dBm είναι μια μονάδα μέτρησης της ισχύος σήματος στις τηλεπικοινωνίες. Συγκεκριμένα, αναφέρεται στην ισχύ του σήματος σε σχέση με το ένα milliwatt (1 mW). Η ισχύς του σήματος μετράτε σε dBm. Η μέτρηση της ισχύος σε dBm είναι χρήσιμη κατά τη σχεδίαση, τη λειτουργία και τη διαχείριση δικτύων και τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού, καθώς βοηθά στον υπολογισμό της απόδοσης του συστήματος και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του.

Επίσης υπολογίσαμε και το σφάλμα μέτρησης (Error) που είναι : Η διαφορά της μέτρησης (MHz) για τη κάθε γωνία με την true angle. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να δούμε γραφικά

το ποσοστό του λάθους των μετρήσεων. (Ουσιαστικά είναι η στήλη CV αλλά με αντίθετο πρόσημο)

8.1. CV vs True angle

Βλέπουμε τα διαγράμματα της Correction Value σε σχέση με την True Angle για κάθε μία από τις 3 τοποθεσίες. Δηλαδή βλέπουμε πόσο διόρθωση πρέπει να προσθέσουμε σε σχέση με την true angle. Όπως βλέπουμε και στα 3 διαγράμματα οι αυξομειώσεις είναι μεγάλες και συχνές ,γεγονός που δείχνει ότι δεν είχαμε και το επιθυμητό αποτέλεσμα. Στην πρώτη τοποθεσία ο μέσος όρος διόρθωσης για όλες τις συχνότητες είναι -11, στην δεύτερη τοποθεσία ο μέσος όρος διόρθωσης είναι περίπου -42 και στη τρίτη είναι 10,6.

1^η τοποθεσία

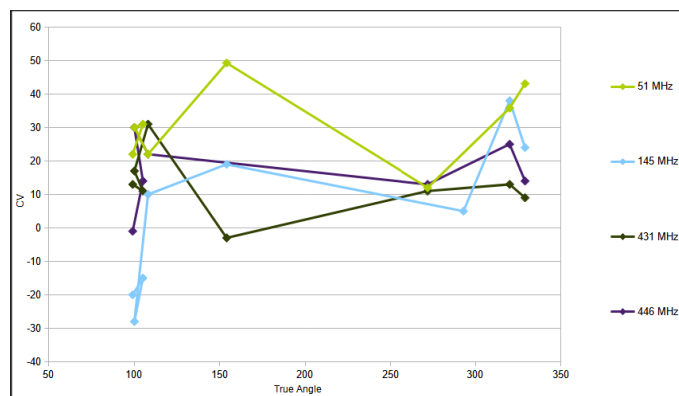


Figure 1.Διάγραμμα Correction value - true angle 1η τοποθεσία

2^η τοποθεσία

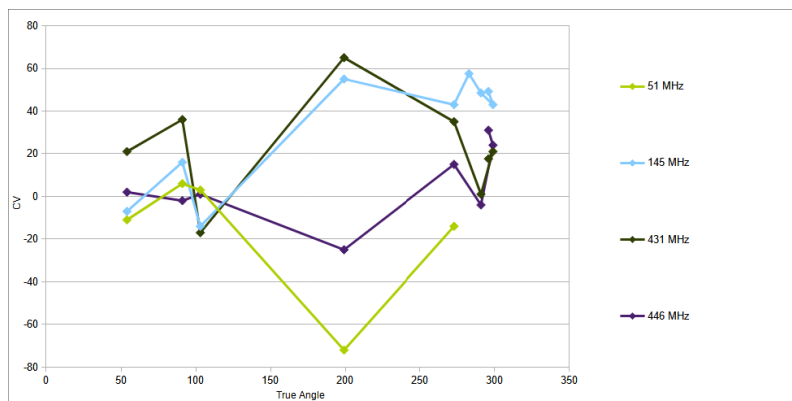


Figure 2. Διάγραμμα Correction value - true angle 2η τοποθεσία

3^η τοποθεσία

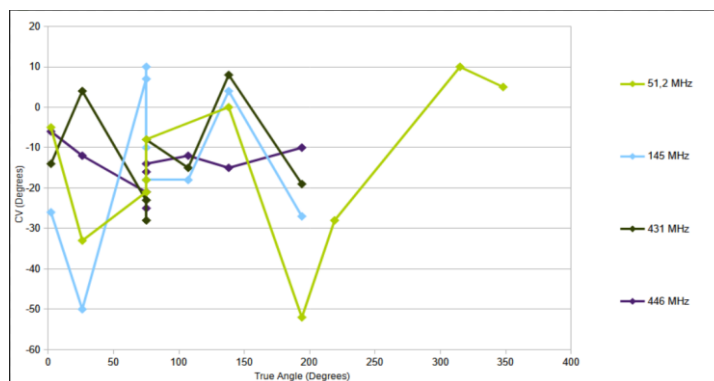


Figure 3. Διάγραμμα Correction value - true angle 3η τοποθεσία

8.2. Error

Όπως φαίνεται και στα τρία διαγράμματα του Error συναρτήσει της true angle υπάρχει μεγάλο σφάλμα μέτρησης. Το μικρότερο σφάλμα συγκεντρωτικά μπορούμε να πούμε ότι το

έχει η τρίτη τοποθεσία μιας και φαίνεται και από τις γραμμές που δεν έχουν τόσο μεγάλες προσαυξήσεις όσα τα υπόλοιπα δύο.

1^η τοποθεσία

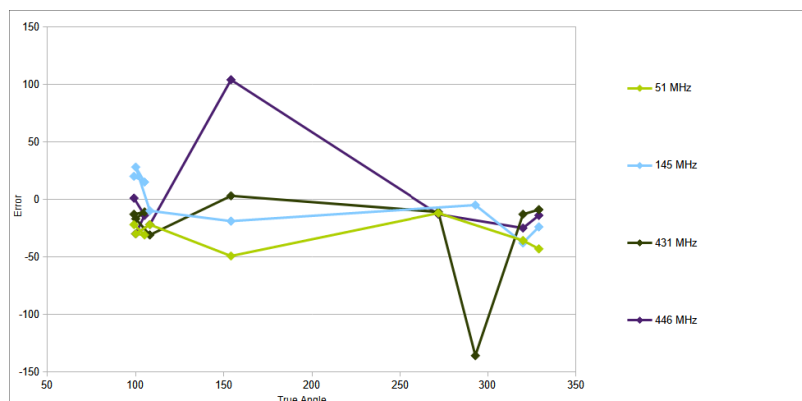


Figure 4. Διάγραμμα σφάλματος μέτρησης 1η τοποθεσία

2^η τοποθεσία

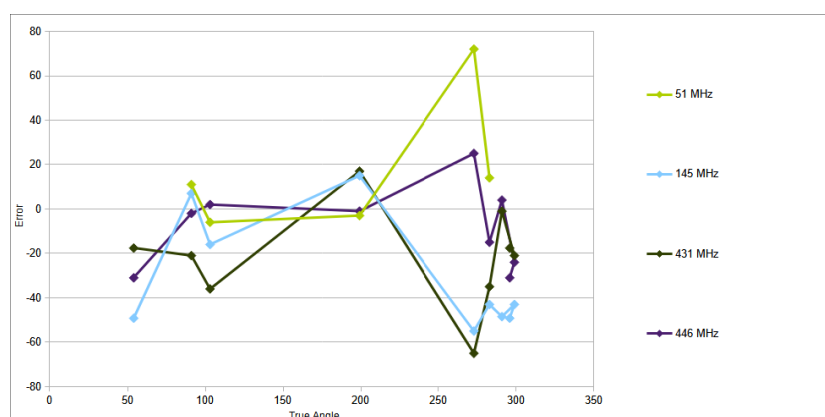


Figure 5. Διάγραμμα σφάλματος μέτρησης 2η τοποθεσία

3^η τοποθεσία

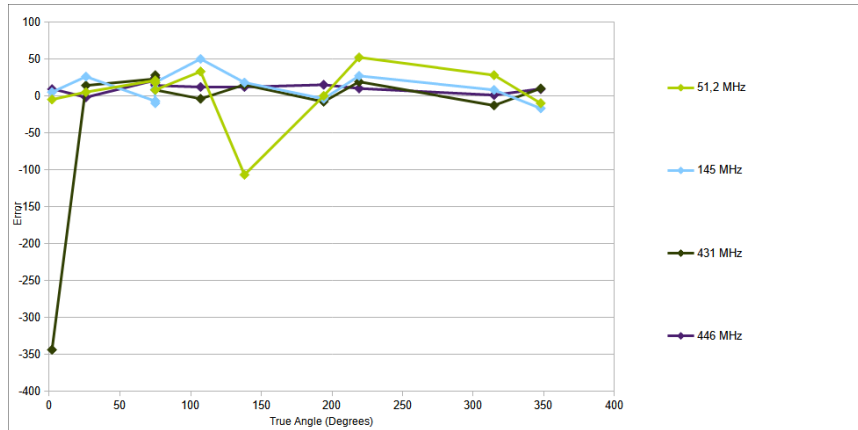


Figure 6. Διάγραμμα σφάλματος μέτρησης 3η τοποθεσία

8.3. MHz vs True angle

Εδώ έχουμε την γωνία που μετρήθηκε για κάθε συχνότητα στις 3 τοποθεσίες συναρτήσει της πραγματικής. Παρατηρούμε ότι και τα 3 διαγράμματα έχουν αυξητική τάση αφού όσο μεγαλώνει η true angle τόσο αυξάνεται και η μετρούμενη γωνία, με κάποιες εξαιρέσεις στο πρώτο διάγραμμα (στα 446 και 431 MHz) και στο τρίτο (στα 431 MHz)

1^η τοποθεσία

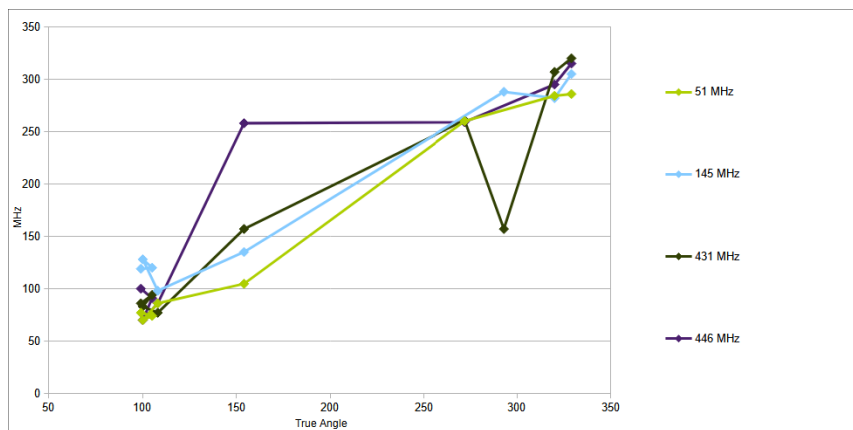


Figure 7. Διάγραμμα MHz-true angle 1η τοποθεσία

2^η τοποθεσία

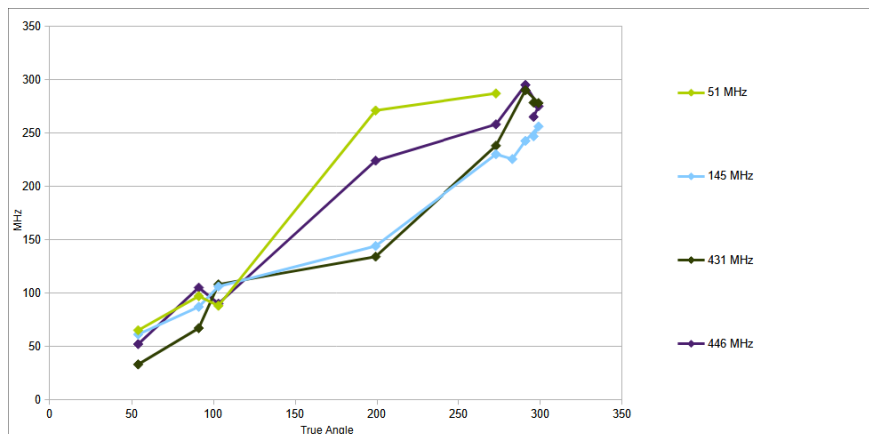


Figure 8. Διάγραμμα MHz-true angle 2η τοποθεσία

3^η τοποθεσία

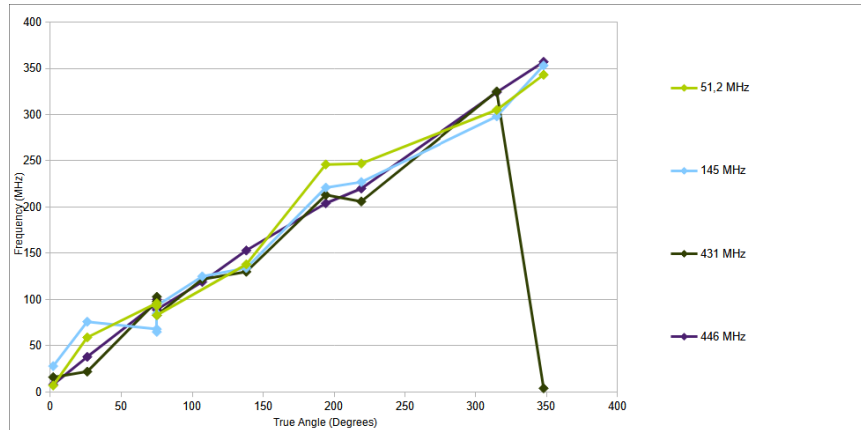


Figure 9. Διάγραμμα MHz-true angle 3η τοποθεσία

8.4. PWD vs True angle

Σε αυτά τα διαγράμματα βλέπουμε την ισχύ του σήματος που εκπέμπεται σε κάθε τοποθεσία σε συνάρτηση με την True Angle. Στη πρώτη τοποθεσία η ισχύς είναι από -102 έως -59 dBm, με μέσο όρο -87,3 dBm περίπου, οπότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το σήμα είναι ασθενές. Στην δεύτερη τοποθεσία έχουμε ισχύ από -104 έως -64 dBm με μέσο όρο -90,5 dBm, οπότε και πάλι έχουμε ένα ασθενές σήμα με κάποιες εξαιρέσεις όπως και προηγουμένως που βλέπουμε ισχυρό σήμα. Τέλος στη τρίτη τοποθεσία έχουμε από -104 έως -53 dBm με μέσο όρο -82,5 dBm, όπου έχουμε και το πιο ισχυρό σήμα από τις τρεις τοποθεσίες, το οποίο μπορούμε να το παρατηρήσουμε και από τη μορφή του διαγράμματος. Σπουδαίο ρόλο στην ισχύ του σήματος παίζει η απόσταση μεταξύ της εκπομπής και του σταθμού βάσης αλλά και το περιβάλλον που γίνονται οι μετρήσεις.

1^η τοποθεσία

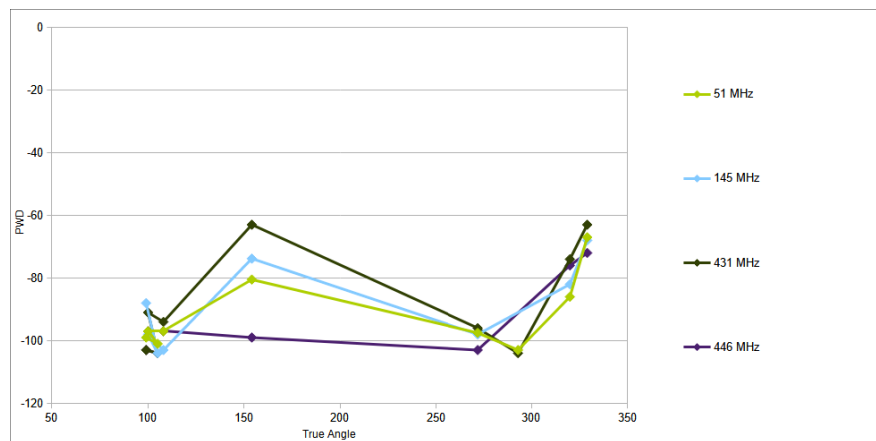


Figure 10. Διάγραμμα pwd-true angle 1η τοποθεσία

2^η τοποθεσία

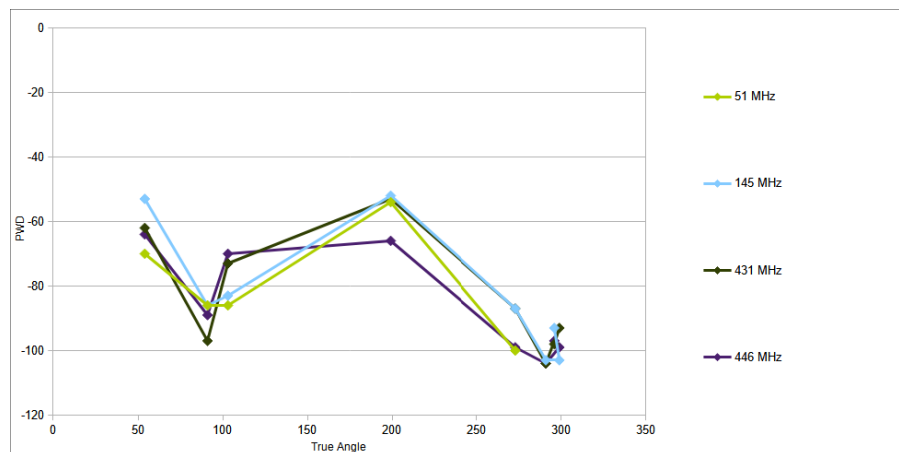


Figure 11. Διάγραμμα pwd-true angle 2η τοποθεσία

3^η τοποθεσία

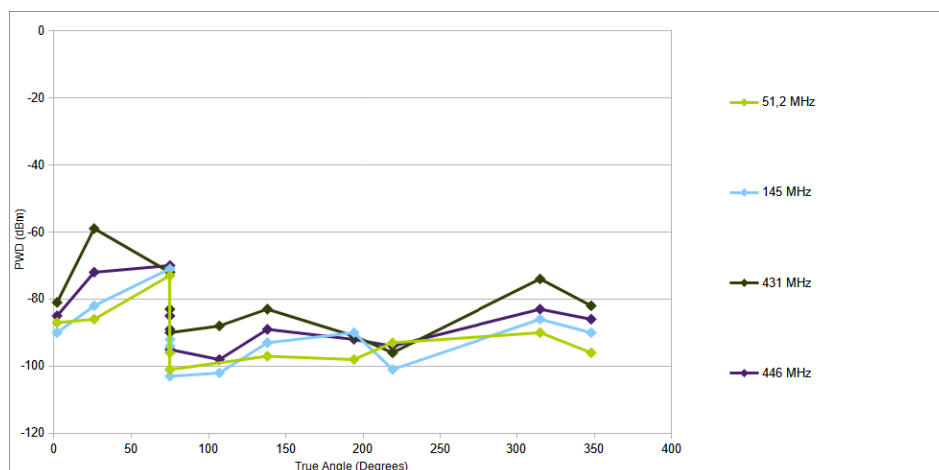


Figure 12. Διάγραμμα pwd-true angle 3η τοποθεσία

8.5. Polar plots

Ακολουθώς παρουσιάζονται 2 διαφορετικά πολικά διαγράμματα (PWD vs True angle και CV vs True angle). Για τα παρακάτω polar plots να σημειωθεί ότι σε κάποιες περιπτώσεις τα διαγράμματα φαίνονται «αραιά», δηλαδή υπάρχουν κενά και ο λόγος είναι ότι έλλειπαν οι μετρήσεις για αυτές τις γωνίες, είτε γιατί δεν ήταν σωστές είτε γιατί δεν πάρθηκαν. Επίσης στο y άξονα οι τιμές είναι σε μοίρες και στον x σε dbm και μοίρες αντίστοιχα.

8.5.1 Polar Plot PWD vs True angle

Ένα διάγραμμα Polar Plot που απεικονίζει το PWD σε dbm σε σχέση με την πραγματική γωνία (true angle) μπορεί να παρέχει πολλές χρήσιμες πληροφορίες για το γεωεντοπισμό, ειδικά όταν χρησιμοποιείται σε συστήματα ανίχνευσης ή θέσης. Αυτό το διάγραμμα μπορεί να αποκαλύψει τα ακόλουθα: Το Polar Plot μπορεί να δείξει την κατεύθυνση από την κεραία προς την πηγαία πηγή του σήματος. Η γωνία στο οποίο το σήμα έχει τη μεγαλύτερη ισχύ λέμε ότι μπορεί να δώσει μια εκτίμηση για τη θέση της πηγαίας πηγής. Εάν το σήμα είναι σαφώς συγκεντρωμένο γύρω από μια συγκεκριμένη γωνία, αυτό υποδηλώνει ότι η πηγαία πηγή βρίσκεται σε αυτήν την κατεύθυνση. Εάν το σήμα είναι διασκορπισμένο ή ασαφές, αυτό μπορεί να υποδηλώνει πολλαπλές πηγές, προβλήματα στην ανίχνευση ή παρεμβολές. Το Polar Plot επίσης μπορεί να αποκαλύψει πληροφορίες σχετικά με το πόσο σταθερό είναι το σήμα καθώς αλλάζει η γωνία. Αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο για την εκτίμηση της αξιοπιστίας των δεδομένων και την αξιολόγηση της ποιότητας της ανίχνευσης. Στα παρακάτω διαγράμματα, στον άξονα των x (τον οριζόντιο), έχουμε την "True angle" που αντιπροσωπεύει την απόλυτη γωνία του αντικειμένου ως προς τον γεωγραφικό βορρά. Στον

άξονα των γ (τον κάθετο), έχουμε το PWD dbm , που αντιπροσωπεύει την ισχύ του σήματος στην πραγματική γωνία (true angle). Στην πρώτη τοποθεσία έχουμε ένα ασθενές σήμα, βέβαια στις γωνίες κοντά στις 150 και 330 μοίρες με -59 dbm μπορούμε να πούμε ότι έχουμε το πιο ισχυρό σήμα. Στη δεύτερη τοποθεσία έχουμε ένα ακόμα πιο ασθενές σήμα, στις γωνίες 55 και 200 μοίρες έχουμε -64 dbm το πιο ισχυρό σήμα. Τέλος στη Τρίτη τοποθεσία έχουμε το λιγότερο ασθενές σήμα, όπου στη γωνία 26 μοιρών με -53 dbm το πιο ισχυρό. Οπότε στις γωνίες που έχουμε την υψηλότερη ισχύ, θα λέγαμε ότι έχουμε καλύτερες πιθανότητες για την εύρεση του σημείου ενδιαφέροντος με μεγαλύτερη ακρίβεια από τις άλλες θέσεις με χαμηλότερη ισχύ.

1^η τοποθεσία

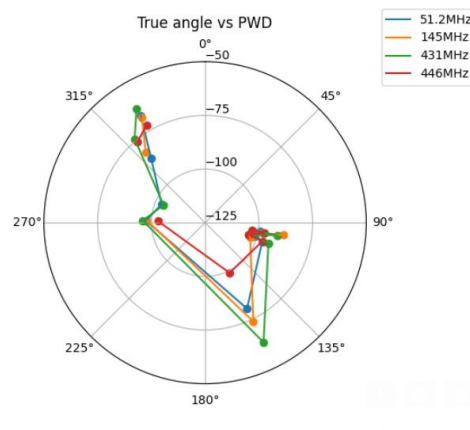


Figure 13. Διάγραμμα Polar plot PWD 1^η τοποθεσία

2^η τοποθεσία

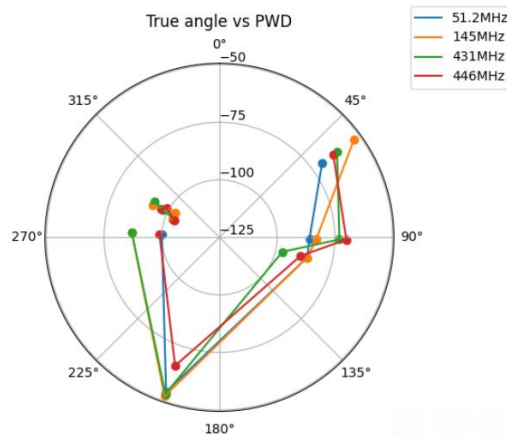


Figure 14. Διάγραμμα Polar plot PWD 2η τοποθεσία

3^η τοποθεσία

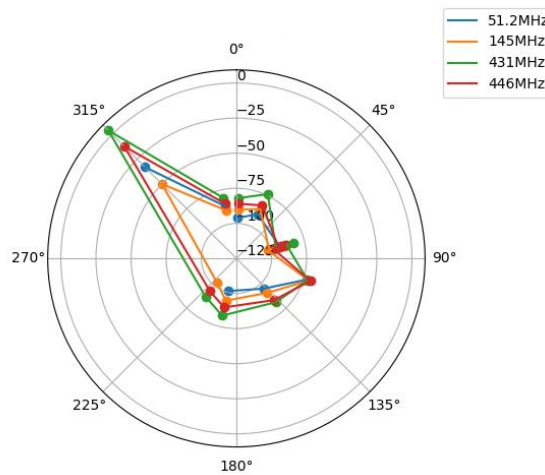


Figure 15. Διάγραμμα Polar plot PWD 3η τοποθεσία

Οι μετρήσεις από την τρίτη τοποθεσία φαίνονται να είναι γενικά οι πιο ολοκληρωμένες. Ακόμα και τις true angle αν κοιτάξουμε καλύπτουν πιο συνολικά το εύρος 0-360° και φαίνεται και αρκετά σε αυτά τα διαγράμματα. Αν και όλα έχουν μια γωνία που παρουσιάζουν "Μέγιστο" στο πολικό διάγραμμα της 3^{ης} τοποθεσίας, φαίνεται πολύ πιο καθαρά. Από την άλλη οι μετρήσεις της 2^{ης} είναι οι πιο αποσπασματικές και της 1^{ης} καλύπτουν το μικρότερο εύρος γωνιών (με σχετικά μικρή διαφορά από την 2^η).

8.5.2 Polar Plot True angle vs Correction Value

Στη περίπτωση μας χρειάζεται να διορθωθεί και να συγκριθεί η γωνία του αντικειμένου που εντοπίσαμε σε σχέση με την πραγματική (true) γωνία.

Πρώτα απ' όλα για τους δύο αξονικούς συντεταγμένους στο διάγραμμα : Στον άξονα των x (τον οριζόντιο), έχουμε την "True angle" που αντιπροσωπεύει την απόλυτη γωνία του αντικειμένου ως προς τον γεωγραφικό βορρά. Στον άξονα των y (τον κάθετο), έχουμε την γωνία διόρθωσης (Correction value), που αντιπροσωπεύει την απόκλιση της γωνίας από την πραγματική γωνία (true angle). Όπως ξέρουμε η σχέση μεταξύ της "True angle" και της "Correction value" αντιπροσωπεύει τον τρόπο με τον οποίο τα συστήματα γεωεντοπισμού διορθώνουν ή προσαρμόζουν την κατεύθυνση που πρέπει να ακολουθηθεί, ώστε να είναι συμβατή με την πραγματική κατεύθυνση προς τον προορισμό. Οι διαφορές μεταξύ της "True angle" και της "Correction value" επηρεάζουν την κατεύθυνση του αντικειμένου και πώς αυτές οι διορθώσεις είναι σημαντικές για την ασφάλεια και την ακρίβεια του γεωεντοπισμού.

1^η τοποθεσία

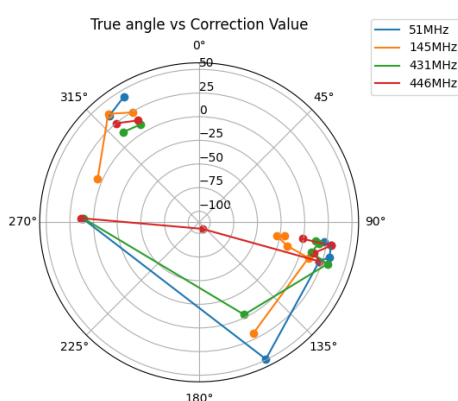


Figure 16. Διάγραμμα Polar plot CV 1ης τοποθεσίας

2^η τοποθεσία

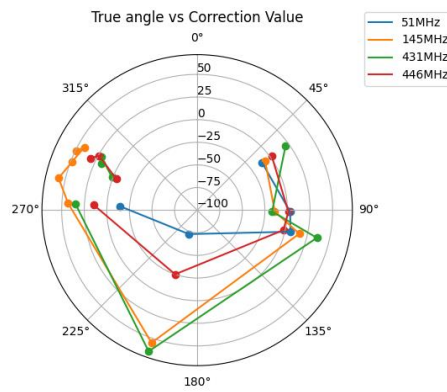


Figure 17. Διάγραμμα Polar plot CV 2ης τοποθεσίας

3^η τοποθεσία

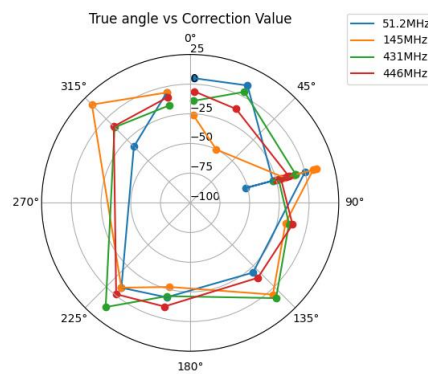


Figure 18. Διάγραμμα Polar plot CV 3ης τοποθεσίας

Συμπεράσματα

Για τις μετρήσεις στην 1^η τοποθεσία συνολικά, παρατηρείται μια πτώση της μέσης τιμής και της διαμέσου των μετρήσεων όσο ανεβαίνει η τιμή της συχνότητας. Αντίθετα η τυπική απόκλιση αυξάνεται (σχεδόν) γραμμικά με την συχνότητα. Η αύξηση αυτή μπορεί να

οφείλεται σε δύο μετρήσεις της τιμής διόρθωσης, συγκεκριμένα για γωνία 293° η τιμή της διόρθωσης στα 431MHz είναι 136 και για γωνία 154° η διόρθωση είναι -104. Αν επιλέξουμε να αγνοήσουμε αυτές τις τιμές η Τυπική απόκλιση παίρνει μια μορφή όμοια του μέσου όρου και της διαμέσου. Κάτι τέτοιο δεν παρατηρείται για τις τιμές PWD. Οι μορφές των καμπυλών τους αν και σε διαφορετικό ύψος έχουν την ίδια μορφή. Όλα τα διαγράμματα που παρουσιάζονται παρακάτω είναι συγκεντρωτικά για μέση τιμή, διάμεσο και τυπική απόκλιση. Οπότε ο άξονας γ εδώ λειτουργεί ως κλίμακα, δεν έχει κάποια "φυσική" σημασία ή ερμηνεία.

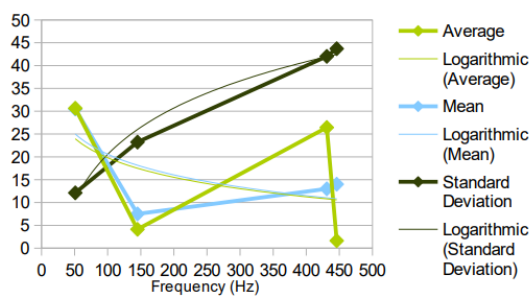


Figure 19. Διάγραμμα αρχική διόρθωση

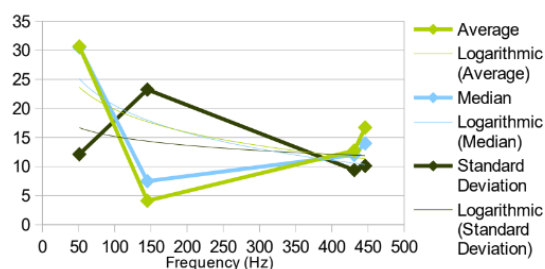


Figure 20. Διάγραμμα διόρθωση χωρίς τις τιμές που προκαλούν μεγάλη τυπική απόκλιση

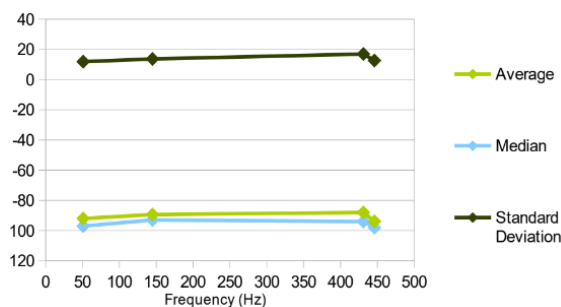


Figure 21. Διάγραμμα PWD (Μέση τιμή, Διάμεσος και τυπική απόκλιση)

Η μέση τιμή της διόρθωσης, καθώς και η διάμεσος και η τυπική απόκλιση παρουσιάζουν μέγιστο στις 293° και η μέση τιμή παρουσιάζει ελάχιστο στις 154 μοίρες. Η τάση και των τριών είναι αυξητική.

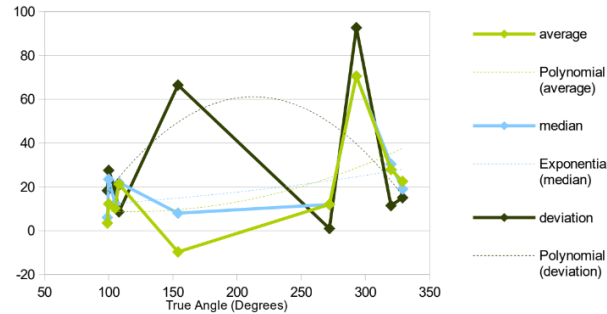


Figure 22. Διάγραμμα Μέση τιμή, Διάμεσος και τυπική απόκλιση για τη διόρθωση

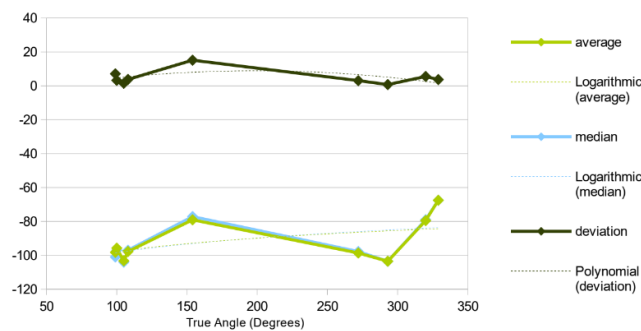


Figure 23. Διάγραμμα Μέση τιμή, Διάμεσος και τυπική απόκλιση για την PWD

Για την τιμή PWD η μέση τιμή, η διάμεσος και η τυπική απόκλιση έχουν την ίδια μορφή και μάλιστα η μέση τιμή και η διάμεσος έχουν σχεδόν ίδιες τιμές και ίδια (αυξητική) τάση. Η τυπική απόκλιση παραμένει στο πεδίο της περίπου σταθερή με μια μικρή μειωτική τάση. Παρουσιάζεται μέγιστο στις 329° και ελάχιστο στις 293°.

Για τις μετρήσεις στην **2^η τοποθεσία** παρατηρείται μια αύξηση της μέσης τιμής και της διαμέσου των μετρήσεων και παρουσιάζεται μέγιστο για την συχνότητα των 145MHz. Η

τυπική απόκλιση παρουσιάζει μια μικρή πτώση. Για την διόρθωση σε όλες τις συχνότητες παρατηρούμε την μεγαλύτερη απόκλιση στις 199°, ενώ η μέση τιμή έχει μια ελαφρώς αυξητική τάση. Για την τιμή PWD η τυπική απόκλιση παραμένει σχεδόν σταθερή, με τοπικές διακυμάνσεις ενώ η καμπύλη της μέσης τιμής παρουσιάζει περιοχές στις οποίες είναι αύξουσα και περιοχές στις οποίες είναι φθίνουσα.

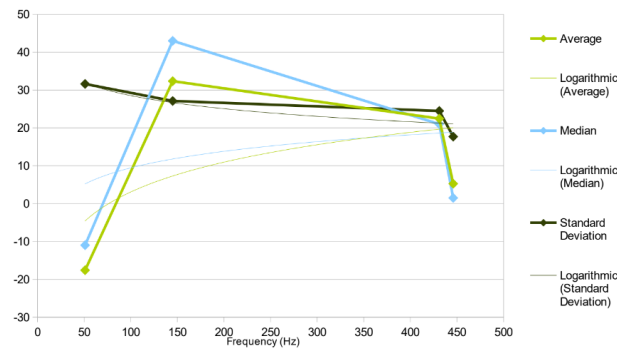


Figure 24.Διάγραμμα αρχική διόρθωση

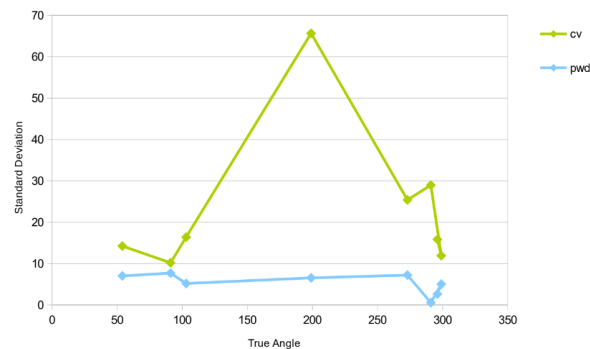


Figure 25.Διάγραμμα τυπικής απόκλισης σε σχέση με true angle

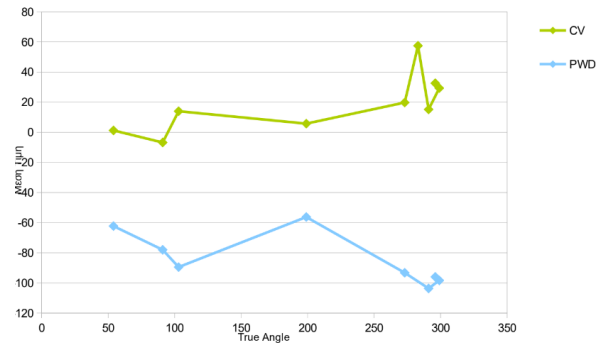


Figure 26. Διάγραμμα μέσης τιμής σε σχέση με την true angle

Επίσης για τη **3^η τοποθεσία** μας, παρατηρείται μέγιστο της μέσης τιμής της διόρθωσης στην συχνότητα των 145MHz, αλλά δεν μπορούμε να βγάλουμε κάποιο συμπέρασμα για την τάση της. Η διάμεσος έχει μια μειωτική τάση και παρουσιάζει ελάχιστο στα 431MHz. Η τυπική απόκλιση έχει μειωτική τάση με μέγιστο στα 51,2 MHz και ελάχιστο στα 431MHz.

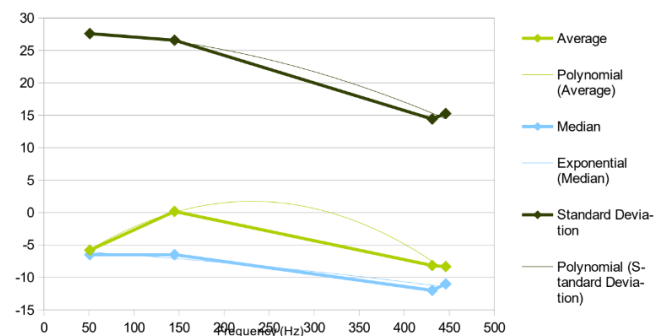


Figure 27. Διάγραμμα Μέση τιμή, διάμεσος και τυπική απόκλιση για διόρθωση

Επίσης για την διόρθωση όσο αυξάνεται η True Angle αν εξαιρέσουμε την μέτρηση στις 6° η μέση τιμή και η διάμεσος έχουν αυξητική τάση. Επειδή υπάρχουν 4 μετρήσεις με True Angle = 75° παρουσιάζεται μια “συσσωρευση” τιμών σε εκείνο το σημείο του διαγράμματος. Μέγιστο η μέση τιμή παρουσιάζει στις 315°, η διάμεσος στις 138° ενώ η τυπική απόκλιση 194°. Ελάχιστο η μέση τιμή και η διάμεσος παρουσιάζουν στις 194° ενώ η τυπική απόκλιση 107°.

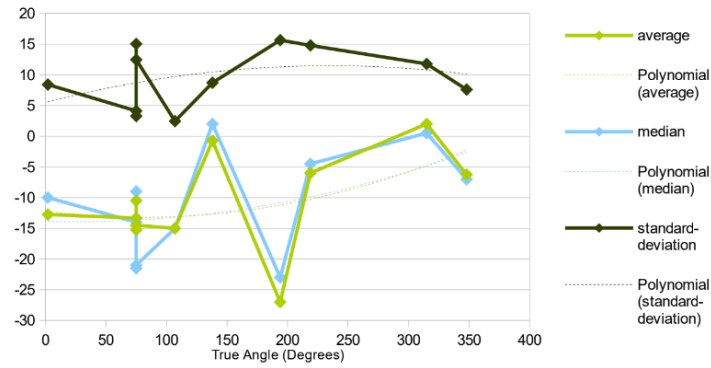


Figure 28. Διάγραμμα Μέση τιμή, διάμεσος και τυπική απόκλιση για διόρθωση

Για την τιμή PWD παρατηρείται ότι η τάση, η διάμεσος και η απόκλιση έχουν την ίδια περίπου μορφή. Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση παρουσιάζουν ελάχιστο στα 145 MHz και μέγιστο στα 431MHz. Η διάμεσος παρουσιάζει και αυτή μέγιστο στα 431MHz αλλά ελάχιστο στα 51,2MHz.

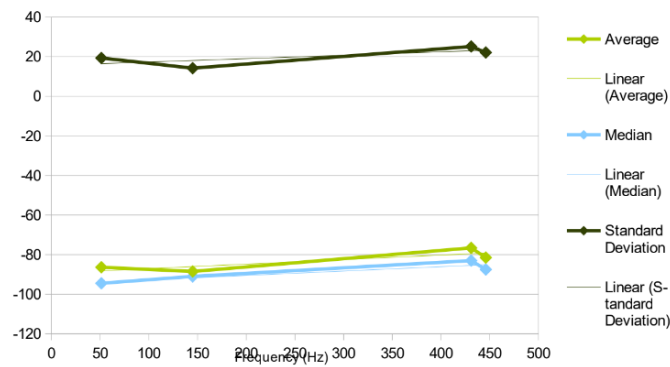


Figure 29. Διάγραμμα Μέση τιμή, διάμεσος και τυπική απόκλιση για PWD

Επίσης η μέση τιμή και η διάμεσος είναι φθίνουσες από την αρχή του πεδίου τους μέχρι τις 219° και αύξουσες από τις 219° μέχρι το τέλος του πεδίου τους. Η τυπική απόκλιση με μικρές διακυμάνσεις κυρίως στην αρχή του πεδίου της μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Παρουσιάζουν και οι τρεις μέγιστο στις 6 μοίρες. Παρουσιάζουν ελάχιστο η μέση τιμή και η διάμεσος στις 107°, ενώ η τυπική απόκλιση στις 75° (Σε μία από τις μετρήσεις όπου η true angle είναι ίση με 75°)

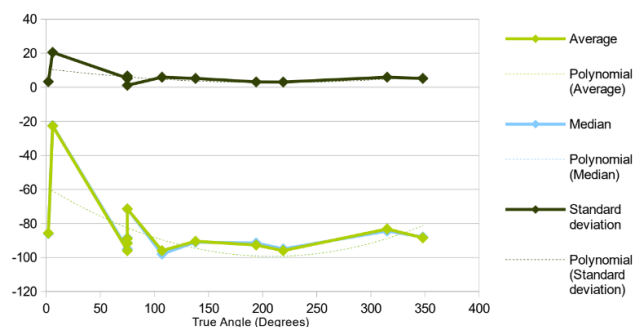


Figure 30. Διάγραμμα Μέση τιμή, διάμεσος και τυπική απόκλιση για PWD

Συνεπώς σαν τελικό συμπέρασμα από τις πειραματικές μετρήσεις μας όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και από τα διαγράμματα του Error και του CV σε συνάρτηση με τη true angle, για κάθε τοποθεσία δεν πήγαν και τόσο καλά όσο θα περιμέναμε, μιας και παρατηρείται μεγάλη διόρθωση και διακύμανση του λάθους με μικρή εξαίρεση την 3^η τοποθεσία που είναι σχετικά καλύτερα τα αποτελέσματα. Το λόγο που δεν πήραμε σωστές μετρήσεις μπορούμε να τον αποδώσουμε στις άστατες και άσχημες καιρικές συνθήκες τη μέρα που πραγματοποιήθηκαν τα calibrations, καθώς είναι αδύνατο να λάβουμε σωστές μετρήσεις με μεγάλες ριπές ανέμου και έντονη βροχή. Επίσης μεγάλο ρόλο έπαιξε τόσο το ανάγλυφο των τοποθεσιών που επιλέξαμε αφού η περιοχή διακρίνεται για το ανώμαλο έδαφος της με πολλούς λόφους, όσο και οι μεγάλες αποστάσεις που γινόντουσαν οι εκπομπές, γεγονός που φαίνεται και από τα διαγράμματα pwd με true angle καθώς έχουμε ασθενή ισχύ των σημάτων, μιας και όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, για να έχουμε σωστές μετρήσεις χρησιμοποιώντας τη μέθοδο AoA, ιδανικά οι αποστάσεις από το σημείο αναφοράς (κεραίες) και τον πομπό πρέπει να είναι πολύ μικρότερες των 500 μέτρων, ενώ στη περίπτωση μας οι αποστάσεις αυτές δεν τηρήθηκαν. Συνεπώς, μπορούμε να καταλήξουμε ότι ιδανικά οι μετρήσεις έπρεπε να πραγματοποιηθούν σε περιβάλλον με καλύτερες συνθήκες (τόσο καιρικές, όσο και τοπολογίας της περιοχής, αλλά και πιο κοντινές αποστάσεις) προκειμένου να λάβουμε σωστά αποτελέσματα χωρίς σφάλματα.

6

Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας την εργασία μου με τίτλο «σύγχρονες τεχνολογίες εντοπισμού θέσης» με τη χρήση των μεθόδων AoA, TDoA και του υβριδικού μοντέλου που συνδυάζει αυτές τις δύο, καταλήγουμε σε ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα. Ο γεωεντοπισμός θέσης (Geolocation) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για να αναγνωρίσει ή να εκτιμήσει την πραγματική γεωγραφική θέση ενός αντικειμένου. Ο γεωγραφικός εντοπισμός περιλαμβάνει τις συντεταγμένες όπως το γεωγραφικό πλάτος, το γεωγραφικό μήκος, και το ύψος, συνδεδεμένες συνήθως με συστήματα εντοπισμού θέσης. Ο γεωεντοπισμός θέσης είναι σημαντικός σε πολλούς τομείς, όπως οι μεταφορές, η παρακολούθηση του κλίματος, η επιστήμη του περιβάλλοντος, η ασφάλεια, και η άμυνα. Ο γεωεντοπισμός και εύρεση κατεύθυνσης (DF - Direction Finding) είναι δύο στενά συνδεδεμένες τεχνικές στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών. Ο γεωεντοπισμός χρησιμοποιεί την ανίχνευση κατευθύνσεων για να προσδιορίσει τη θέση του ασύρματου πομπού, είτε για ασφάλεια είτε για παρακολούθηση κινούμενων αντικειμένων. Για την ορθή λειτουργία ενός συστήματος εύρεσης κατεύθυνσης, απαιτούνται υψηλή ακρίβεια και ευαισθησία, ανοχή στην παραμόρφωση του λαμβανόμενου πεδίου κύματος λόγω ανακλάσεων, σταθερή απόδοση σε περίπτωση συνδιαυλικών παρεμβλλόμενων σημάτων, μικρή ελάχιστη διάρκεια σήματος και υψηλή ταχύτητα αναζήτησης και αναχαίτισης σε ανιχνευτές κατεύθυνσης σάρωσης. Αυτοί οι παράγοντες είναι κρίσιμοι για ακριβείς μετρήσεις κατεύθυνσης και την αποτελεσματική ανίχνευση πηγών σημάτων. Ο γεωεντοπισμός και η εκτίμηση κατεύθυνσης άφιξης (DOA) είναι ουσιαστικοί σε πολλές εφαρμογές, όπως τον εντοπισμό πηγών σημάτων και τη δημόσια ασφάλεια. Παράλληλα ο αλγόριθμος MUSIC είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος εκτίμησης DOA, αλλά απαιτεί προσεκτική μοντελοποίηση και είναι ευαίσθητος στο θόρυβο. Είναι ευρέως χρησιμοποιούμενος σε εφαρμογές όπως τα ραντάρ, ασύρματες επικοινωνίες και στον εντοπισμό ηχητικών πηγών. Ακόμη και ο αλγόριθμος ESPRIT είναι επίσης ένας πολύ αποδοτικός τρόπος εκτίμησης DOA και χρησιμοποιείται σε παρόμοιες εφαρμογές όπως ο MUSIC προσφέροντας υψηλή ανάλυση, ανθεκτικότητα στο θόρυβο και αποδοτικότητα. Μπορεί να αντιμετωπίσει πολλαπλές πηγές σήματος, ακόμη και σε δύσκολες συνθήκες. Και οι δύο αυτοί αλγόριθμοι επιλέγονται ανάλογα με το περιβάλλον της εφαρμογής που χρειάζεται. Επιπλέον κρίσιμα στοιχεία στον γεωεντοπισμό για την ακρίβεια και την απόδοση των συστημάτων αυτών παίζουν οι κεραίες-αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση και λήψη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και ραδιοσημάτων για τον εντοπισμό και

την τοποθέτηση αντικειμένων ή πηγών σήματος. Οι αισθητήρες κατεύθυνσης είναι σημαντικοί για τον προσδιορισμό της γωνίας άφιξης του σήματος και απαιτούν συγκεκριμένα κριτήρια επιλογής τοποθεσίας όπως γεωγραφική κάλυψη, την παρουσία εμποδίων και το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον της περιοχής. Οι προδιαγραφές που χαρακτηρίζουν τους ανιχνευτές κατεύθυνσης περιλαμβάνουν ακρίβεια, ευαισθησία, ανοχή σε παραμορφωμένα κύματα και άλλους παράγοντες. Οι κεραίες σχεδιάζονται και προσαρμόζονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, συμπεριλαμβανομένων των διαστάσεων, του σχήματος και της απόδοσης.

Οι τεχνικές γεωεντοπισμού που μελετήθηκαν στη παρούσα διπλωματική είναι η Angle of Arrival, Time Difference of Arrival και η Υβριδική μέθοδος. Σίγουρα κάθε μία από τις μεθόδους έχει τα πλεονεκτήματά της και το πεδίο εφαρμογής της, ταυτόχρονα όμως έχει μειονεκτήματα και κάποιους περιορισμούς που πρέπει να λάβουμε υπόψιν. Όπως διαπιστώσαμε, η υβριδική μέθοδος αναδείχθηκε ως η πλέον αποτελεσματική από τις τρεις μιας και μας παρέχει τα πλεονεκτήματα και των δύο μεθόδων σε μία. Έχει σαφώς μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα γεωεντοπισμού από τις άλλες δύο, καθώς η εμβέλεια της μπορεί να καλύψει χιλιόμετρα. Επιπλέον είναι πολύ περισσότερο πιο ανθεκτική σε παρεμβολές και φαινόμενα που επηρεάζουν τη μετάδοση του σήματος. Μπορεί σαν κόστος η Υβριδική τεχνική να κοστίζει περισσότερο μιας και τα κόστη εγκατάστασης και λειτουργίας είναι μεγαλύτερα, αλλά η ακρίβεια των μετρήσεων είναι πολύ μεγαλύτερη και πιο σωστή.

Επιπροσθέτως, από την προσωπική εμπειρία μου στο πλαίσιο του Nestor Project με τη χρήση του φορητού ανιχνευτή σήματος και ανάλυσης συχνότητων SignalShark, καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος AoA ναι μεν είναι η λιγότερο κοστοβόρα και η πιο απλή μιας και απαιτεί λιγότερες κεραίες-αισθητήρες προς εγκατάσταση, όμως μπορεί να παρουσιάσει σημαντικά προβλήματα, όπως σφάλματα μέτρησης, λόγω καιρικών συνθηκών, ανάγλυφου του εδάφους και μεγάλων αποστάσεων μεταξύ των σταθμών και του πομπού. Αυτά τα προβλήματα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή της κατάλληλης τεχνικής για μελλοντικές εφαρμογές εντοπισμού θέσης.

Τέλος, η εργασία αυτή αναδεικνύει τη σημασία της συνεχούς έρευνας και ανάπτυξης στον τομέα των τεχνολογιών εντοπισμού θέσης, προκειμένου να ξεπεραστούν τα προβλήματα και να βελτιωθεί η ακρίβεια και η αξιοπιστία των συστημάτων. Η διπλωματική αυτή εργασία αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προς την κατεύθυνση αυτή και παρέχει βαθύτερη κατανόηση των προκλήσεων και των ευκαιριών σε αυτόν τον σημαντικό τομέα της τεχνολογίας.

7

Βιβλιογραφία

- [1] T. Engin Tuncer, Benjamin Friedlander - Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation-Academic (2009)
- [2] Yiqiang Yu, Z. Chen, Gopal Gokeda - Introduction to Direction-Of-Arrival Estimation(2010)
- [3] Comparison of time-difference-of-arrival and angle-of-arrival methods of signal geolocation / Report ITU-R SM.2211-2 (06/2018)
- [4] Camillo Gentile , Nayef Alsindi , Ronald Raulefs , Carole Teolis - Geolocation Techniques Principles and Applications (2013)
- [5] R. Peng και M. L. Sichitiu, «Angle of Arrival Localization for Wireless Sensor Networks,» 2006
- [6] K. Pahlavan, X. Li, M. Ylianttila, R. Chana και M. Latva-aho, «An Overview of Wireless Indoor Geolocation,» 2000.
- [7] D. Musicki and W. Koch, "Geolocation using TDOA and FDOA measurements," 2008 11th International Conference on Information Fusion, Cologne, Germany, 2008, pp. 1-8.
- [8] Ilir Progi - Geolocation of RF Signals Principles and Simulations
- [9] Handbook , spectrum monitoring , edition 2011 , Radiocommunication Bureau
- [10] C. Yang, Y. Huang and X. Zhu, "Hybrid TDOA/AOA method for indoor positioning systems," The Institution of Engineering and Technology Seminar on Location Technologies, London, UK, 2007, pp. 1-5.

- [11] www.narda-sts.com
- [12] www.motorolasolutions.com
- [13] www.yaesu.com
- [14] www.decodio.com
- [15] www.nestor-project
- [16] Y. Gu, A. Lo και I. Niemegeers, «A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks,» 2009