



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## Σύστημα Παραγωγής Σημάτων Ραντάρ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Χ. Καβρουλάκης

Επιβλέπων : Νικόλαος Ουζούνογλου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2013





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## Σύστημα Παραγωγής Σημάτων Ραντάρ

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Χ. Καβρουλάκης

**Επιβλέπων :** Νικόλαος Ουζούνογλου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 9<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου 2013.

.....

Ν.Ουζούνογλου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Δ.Κακλαμάνη

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....

Μ.Γαργαλάκος

Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2013

.....  
Γεώργιος Χ. Καβρουλάκης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright ©Γεώργιος Χ. Καβρουλάκης, 2013.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



## Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και ανάλυση ενός συστήματος παραγωγής σημάτων ραντάρ (παρεμβολέας ραντάρ). Γίνεται αναφορά στον τρόπο λειτουργίας μιας τέτοιας διάταξης καθώς επίσης και που δύναται να χρησιμοποιηθεί.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε ορισμένους τύπους ραντάρ, στα χαρακτηριστικά αυτών καθώς επίσης και σε κάποιες βασικές αρχές λειτουργίας τους. Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε ραντάρ με χαμηλή ισχύ και μειωμένη πιθανότητα υποκλοπής-αναχαίτησης. Στο τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται ο παρεμβολέας ραντάρ που κατασκευάστηκε, το ηλεκτρονικό κύκλωμα αυτού και σε τι αποσκοπεί η λειτουργία του.

### ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ραντάρ, Παρεμβολέας ραντάρ, Ραντάρ με χαμηλή ισχύ, Υποκλοπή, Αναχαίτηση, Ραντάρ διάταξης φάσης.

## ABSTRACT

The scope of this thesis is the study and analysis of a production system radar signals (radar jammer). Reference is made in the way of such a device is working properly as well as may be used.

The first chapter refers to certain types of radar, the characteristics of them as well as some basic operating principles. The next chapter refers to radar with low power and reduced probability of interception. Finally the last chapter of the thesis presents the radar jammer which build, the electronic circuit and the aim of this construction.

## KEY WORDS

Radar, Radar jamming, Radar with low probability of interception, Abstraction, Interception, Phased-array radar.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή Κο Νικόλαο Ουζούνογλου για τις γνώσεις που μου μετέδωσε σε όλη την διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας με σκοπό την ολοκλήρωση αυτής καθώς επίσης και τον Κο Στρατάκο Γεώργιο (Επιστημονικός Συνεργάτης Ε.Μ.Π.) για τις πολύτιμες πληροφορίες που μου προσέφερε όσον αφορά την επίλυση αποριών που μου δημιουργήθηκαν.

Η διπλωματική αυτή εργασία αφιερώνεται στην οικογένεια μου.

## Σχήματα

Σχήμα 1.1: Βασική αρχή λειτουργίας συστήματος ραντάρ

Σχήμα 1.1: Παράμετροι ραντάρ

Σχήμα 1.2: Παλμικό ραντάρ

Σχήμα 1.3: Διάγραμμα παλμικού ραντάρ

Σχήμα 1.4: Διάγραμμα Doppler ραντάρ

Σχήμα 1.5: Κυματομορφή FM ραντάρ

Σχήμα 1.6: Διάγραμμα FM ραντάρ

Σχήμα 1.7: SLAR ραντάρ

Σχήμα 1.8: MTI ραντάρ

Σχήμα 1.9: CW ραντάρ

Σχήμα 1.10: Συχνότητα Doppler

Σχήμα 2.1: Ραντάρ χαμηλής πιθανότητας υποκλοπής

Σχήμα 2.2: Ραντάρ διάταξης φάσης

Σχήμα 3.1 Παρεμβολή ενός Ραντάρ

Σχήμα 3.2 Παρεμβολέας ραντάρ

Σχήμα 3.3 Ηλεκτρονικό κύκλωμα παρεμβολέα ραντάρ

Σχήμα 3.4 Ειδικό προστατευτικό κουτί παρεμβολέα

Σχήμα 3.5 Μη επανδρωμένο αεροσκάφος στο οποίο δύναται να τοποθετηθεί ο παρεμβολέας

## Πίνακες

Πίνακας 1.1: Ζώνες συχνοτήτων για εφαρμογές ραντάρ

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΡΑΝΤΑΡ

1.1 Εισαγωγή.....	11
1.2 Η εξίσωση του Ραντάρ.....	14
1.3 Τύποι Ραντάρ.....	16
1.4 Ενεργός Επιφάνεια Ραντάρ(RCS).....	25
1.5 Φαινόμενο Doppler.....	26
1.6 Βασικά Χαρακτηριστικά Θορύβου.....	29

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΡΑΝΤΑΡ ΜΕ ΧΑΜΗΛΗ ΙΣΧΥ ΚΑΙ ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΥΠΟΚΛΟΠΗΣ-ΑΝΑΧΑΙΤΗΣΗΣ

2.1 Εισαγωγή.....	32
2.2 Ραντάρ με χαμηλή ισχύ.....	32
2.3 Ραντάρ διάταξης φάσης.....	35

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΗΜΑΤΩΝ ΡΑΝΤΑΡ(ΠΑΡΕΜΒΟΛΕΑΣ ΡΑΝΤΑΡ)

3.1 Εισαγωγή .....	36
3.2 Παρεμβολές σε δίκτυο επικοινωνιών .....	37
3.3 Μέθοδος αναπήδησης συχνότητας .....	40
3.4 Παρεμβολή Συστημάτων Ραντάρ από Γεννήτριες Σημάτων εγκατεστημένων σε Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (UAV) .....	43
3.5 Κατασκευή Παρεμβολέα Ραντάρ.....	46

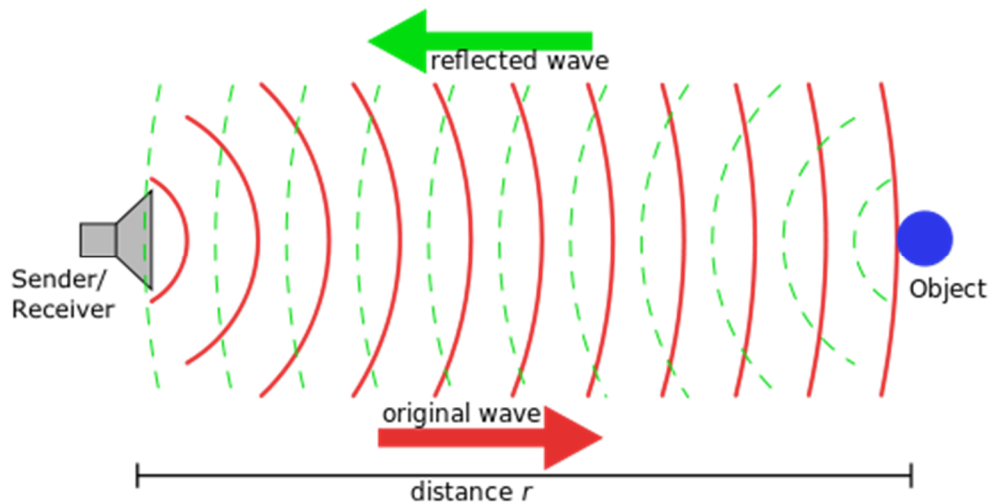
## Κεφάλαιο 1

### ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΡΑΝΤΑΡ

#### 1.1 Εισαγωγή

Ο Ραδιοεντοπιστής ή γνωστότερο με το διεθνές όνομα Ραντάρ που προέρχεται από σύντμηση των αγγλικών λέξεων "RAdio Detection And Ranging" και σημαίνει "ανίχνευση με ηλεκτρομαγνητικά κύματα και μέτρηση αποστάσεως", αποτελεί ένα βασικό ηλεκτρονικό σύστημα ηλεκτρομαγνητικού εντοπισμού, παρακολούθησης ακίνητων και κινητών στόχων, σε αποστάσεις και συνθήκες φωτισμού απαγορευτικές για τον απευθείας οπτικό εντοπισμό, δηλαδή με το ανθρώπινο μάτι ή και οπτικά όργανα.

Η αρχή λειτουργίας των συστημάτων ραντάρ στηρίζεται στην εκπομπή ενός σήματος και στη συνέχεια τη λήψη των ανακλάσεων από τα διάφορα αντικείμενα που φωτίζονται από το σήμα εκπομπής, όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



## Σχήμα 1.1 Βασική αρχή λειτουργίας συστήματος ραντάρ

Ένα στοιχειώδες ραντάρ αποτελείται από μια κεραία εκπομπής που εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία παραγόμενη από ταλαντωτή κάποιας μορφής, μια κεραία δέκτη και μια συσκευή ανίχνευσης ενέργειας ή δέκτης. Μέρος του μεταδιδόμενου σήματος επανεκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις προσπίπτοντας σε ένα αντικείμενο αντανάκλασης(στόχος). Η ενέργεια που αντανακλάται πίσω είναι αυτή που ενδιαφέρει το ραντάρ. Η κεραία του δέκτη συλλέγει την επιστρεφόμενη ενέργεια και την στέλνει στον δέκτη, όπου γίνεται η επεξεργασία για να ανιχνευθεί η παρουσία του αντικειμένου και να εξαχθούν η θέση και η σχετική ταχύτητά του. Η απόσταση μέχρι το αντικείμενο προσδιορίζεται μετρώντας τον χρόνο που χρειάζεται το σήμα να ταξιδέψει μέχρι τον στόχο και πίσω. Η κατεύθυνση ή η γωνιακή θέση μπορεί να προσδιορισθεί από την διεύθυνση του μετώπου του κύματος που αντανακλάται από το ραντάρ. Η συνήθης μέθοδος μέτρησης της διεύθυνσης του σήματος επιστροφής είναι με χρήση κεραίας εκπομπής με μικρό εύρος λοβών. Αν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ του αντικειμένου και του ραντάρ, η ολίσθηση στη συχνότητα του φέροντος σήματος ανάκλασης (φαινόμενο Doppler) είναι ένα μέτρο της σχετικής (ακτινικής) ταχύτητας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διακρίνει τα κινητά από τα σταθερά αντικείμενα.

Η σημερινή τεχνολογία των συστημάτων ραντάρ χρησιμοποιεί το φάσμα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που αρχίζει από τις συχνότητες VHF (-100MHz) και επεκτείνεται μέχρι τις συχνότητες EHF(-100GHz). Οι χαμηλές συχνότητες του φάσματος αυτού επηρεάζονται ελάχιστα από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και έτσι η ορατότητα που παρέχουν τα ραντάρ από πλευράς εμβέλειας ανίχνευσης είναι ασύγκριτα μεγαλύτερη από την ανθρώπινη όραση. Παρακάτω παραθέτουμε τον πίνακα με τις συχνότητες λειτουργίας και χρήσεις των ραντάρ.



ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ & ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ RADAR (για τις πλέον σημαντικές εφαρμογές)			
<i>Σύμβολο</i>	<i>Ζώνη Συχνοτήτων</i>	<i>Μήκη Κύματος</i>	<i>Τύπος Radar</i>
<i>Ζώνης</i>	<i>F (GHz)</i>	<i>λ (cm)</i>	<i>(εφαρμογές)</i>
L	1,35 - 1,40	22,2 - 21,4	διάφορα στρατιωτικά Radar
S	2,45 - 2,69	12,3 - 11,2	Radar για πολιτικές χρήσεις
S	2,70 - 2,90	11,1 - 10,4	επιτήρηση στρατιωτικών αεροδρομίων
S	2,90 - 3,10	10,4 - 9,7	Radar για τη ναυσιπλοΐα
S	2,90 - 3,70	10,4 - 8,1	Radar για ποικίλες χρήσεις
C	4,2 - 4,4	7,1 - 6,8	διάφορα υψομετρικά Radar
C	5,35 - 5,47	5,6 - 5,5	Radar καιρού (μετεωρολογικά)
C	5,25 - 5,925	5,7 - 5,1	Radar για ποικίλες χρήσεις
X	8,5 - 10,55	3,53 - 2,84	Radar για ποικίλες χρήσεις
X	9,0 - 9,2	3,33 - 3,26	Radar για προσέγγιση ακριβείας
X	9,3 - 9,5	3,23 - 3,16	Radar καιρού και ναυσιπλοΐας
X	10,525	2,85	Radar για την

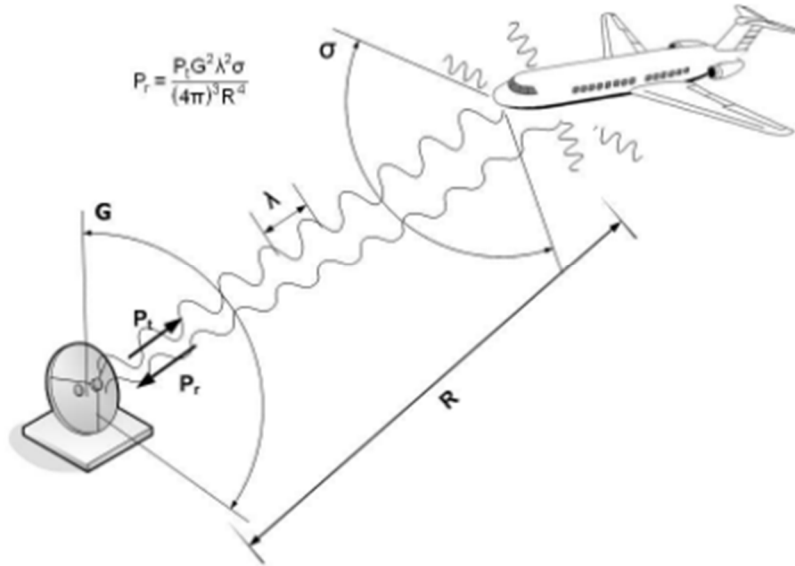
			αστυνομία
X	8,5 - 10,55	3,53 - 2,84	Radar για ποικίλες χρήσεις
Ku	15,7 - 17,7	1,91 - 1,70	Radar για ποικίλες χρήσεις
K	24,15	1,24	Radar για την αστυνομία
K	24,25 - 25,25	1,24 - 1,19	Radar για την αεροπλοΐα
Ka	31,8 - 33,4	0,94 - 0,90	Radar για την αεροπλοΐα
Ka	33,4 - 36,0	0,90 - 0,83	Radar για ποικίλες χρήσεις
V	43,0 - 48,0	0,70 - 0,63	Radar για ποικίλες χρήσεις

Πίνακας 1.1 Ζώνες συχνοτήτων για εφαρμογές ραντάρ.

## 1.2 Η εξίσωση του Ραντάρ

Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα ισχύς  $P_t$  μεταδίδεται προς ένα ιπτάμενο αντικείμενο, για παράδειγμα προς ένα αεροπλάνο και ένα μέρος του ανακλάται πίσω στην κεραία με την λαμβανόμενη ισχύς  $P_r$ . Από τον χρόνο καθυστέρησης ανάμεσα στην εκπομπή και λήψη του σήματος, μπορεί να υπολογιστεί η απόσταση προς το αεροπλάνο. Επιπλέον πληροφορίες μπορούν να ληφθούν από την μετατόπιση συχνότητας του σήματος λήψης,

όπου είναι ανάλογη με την ταχύτητα του αεροπλάνου. Η βασική αρχή του ραντάρ και οι παράμετροι του απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.2:Παράμετροι ραντάρ

Λαμβάνοντας ένα σήμα επαρκούς ισχύς με κατάλληλη αναλογία ισχύς-θορύβου αποτελεί την μεγαλύτερη πρόκληση των συστημάτων ραντάρ. Η εξίσωση του ραντάρ όπως αυτή απεικονίζεται στο παραπάνω σχήμα μας παρέχει πληροφορίες μεταξύ της ισχύς και του συστήματος.

$$P_r = \frac{P_t * G^2 * \lambda^2 * \sigma}{(4\pi)^3 * R^4}$$

Όπου:

- $P_t$  : Η ισχύς που μεταδίδεται από την κεραία μετρούμενη σε dBm. Αριθμητικά παραδείγματα: 63 dBm για πραγματικές εφαρμογές ραντάρ, 13 dBm για εργαστηριακές εφαρμογές.
- $G$  : Το κέρδος που μεταδίδεται από την κεραία μετρούμενο σε dBi. Η παράμετρος καθορίζει πόσο δέσμη ακτινοβολίας της κεραίας εστιάζεται στην κατεύθυνση του στόχου

- $\lambda$ : Το μήκος κύματος του μεταδιδόμενου σήματος, μετρούμενο σε μέτρα. Το μήκος κύματος μπορεί να υπολογισθεί απευθείας από την συχνότητα. Αριθμητικά παραδείγματα: 0.03m για ένα 10GHz σήμα και 0.12m για ένα 2.54GHz σήμα.
- $\sigma$ : Διατομή του ραντάρ(RCS), είναι μια εικονική περιοχή που αντιπροσωπεύει την ένταση της αντανάκλασης.
- R: Η απόσταση μεταξύ κεραίας και αντικειμένου σε μέτρα.

### 1.3 Τύποι Ραντάρ

Ανάλογα με την αρχή σχεδίασης τους διακρίνουμε τους παρακάτω τύπους ραντάρ. Κάθε ένα από αυτά τα είδη ραντάρ συνήθως χρησιμοποιεί ένα χαρακτηριστικό είδος κύματος και επεξεργασία σήματος που το διαφοροποιεί από τα άλλα ραντάρ.

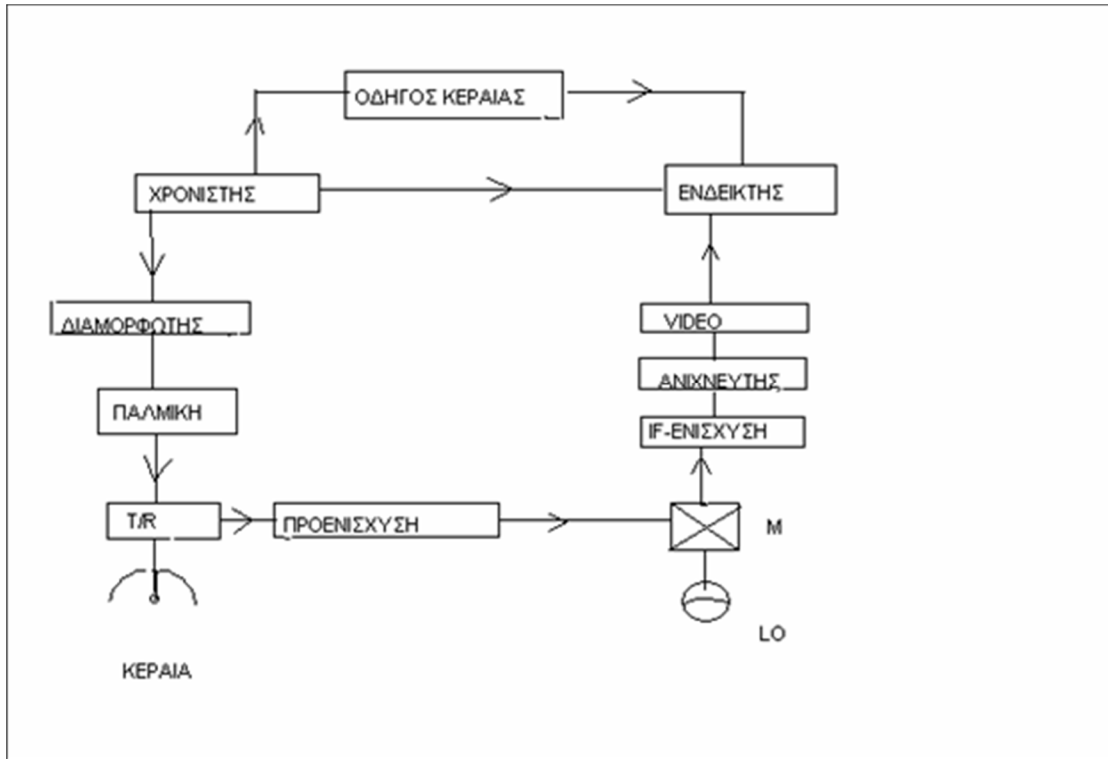
#### i) Παλμικό Ραντάρ

Η αρχή λειτουργίας του ραντάρ βασίζεται στην εκπομπή και λήψη (επιστροφών) των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μετά από ανάκλαση σε κάποιο αντικείμενο. Λέγεται παλμικό γιατί εναλλάσσει διαδοχικά κύκλους εκπομπής-λήψης, οι οποίοι καθορίζονται από ένα σημαντικότατο σήμα που παράγεται συνήθως στο πομπό του ραντάρ και λέγεται σήμα trigger. Το παλμικό ραντάρ λέγεται και *ασύμφωνος ανιχνευτής* επειδή η σχετική φάση εκπεμπόμενου και λαμβανόμενου σήματος δεν λαμβάνεται υπόψη, αλλά μόνον η χρονική διαφορά  $\Delta t$ . Κλασσικά παραδείγματα είναι τα ραντάρ εναέριας κυκλοφορίας και τα ραντάρ καιρού.



Σχήμα 1.2: Παλμικό ραντάρ

Το βασικό δομικό διάγραμμα του παλμικού ραντάρ είναι το ακόλουθο:

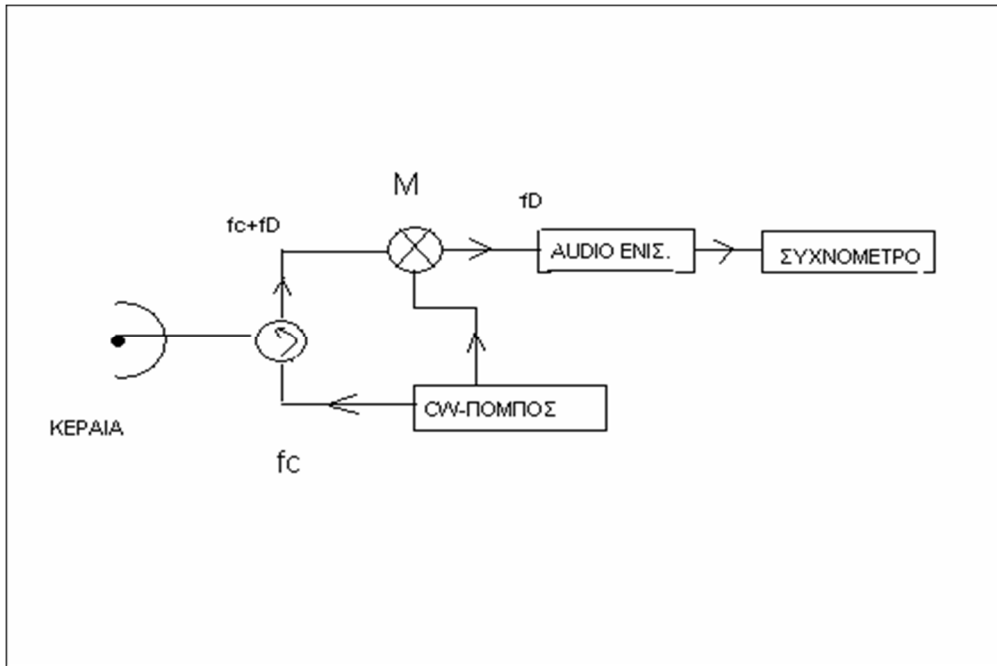


Σχήμα 1.3: Διάγραμμα παλμικού ραντάρ

- Ο χρονιστής παράγει περιοδική παλμοσειρά διέγερσης που οδηγείται στον διαμορφωτή, στον οδηγό της κεραίας και στον τελικό ενδείκτη για λόγους συσχέτισης.
- Ο διαμορφωτής παράγει διαμορφωμένους παλμούς υψηλής ισχύος που οδηγούνται και διαμορφώνουν την φέρουσα, RF ή μικροκυματική συχνότητα του πομπού.
- Το σήμα οδηγείται στον ηλεκτρονικό διακόπτη T/R και τελικά προς τον πομπό, όπου και ακτινοβολείται.
- Η ηχώ από τον στόχο φτάνει πίσω στην κεραία και στον δέκτη. Ενισχύεται σε προενισχυτή χαμηλού θορύβου και οδηγείται στον μείκτη ενός δέκτη, όπου προσάγεται και η έξοδος ενός τοπικού ταλαντωτή.
- Η έξοδος που είναι στην περιοχή IF (300-3000KHz), οδηγείται σε IF-ενισχυτή.
- Στον ανιχνευτή αποχωρίζεται η περιβάλλουσα του σήματος (απόκριση στόχου) από την φέρουσα συχνότητα. Ενισχύεται στον video-ενισχυτή και οδηγείται τελικά σε οθόνη-ενδείκτη.
- Στον ενδείκτη οδηγείται, για λόγους συσχέτισης, κομμάτι του σήματος εκπομπής. Επίσης οδηγείται και σήμα από την στιγμιαία κίνηση της κεραίας, για χρονισμό της απεικόνισης με την θέση της κεραίας, την στιγμή της εκπομπής.

## ii) Doppler ραντάρ

Το παλμικό ραντάρ προσδιορίζει την απόσταση του στόχου, μέσω της χρονικής καθυστέρησης μεταξύ εκπεμπόμενου και λαμβανόμενου σήματος. Για τον προσδιορισμό της ταχύτητας του στόχου δεν χρειάζεται διαμόρφωση και χρησιμοποιείται το φαινόμενο και το ραντάρ Doppler και η σύγκριση είναι ανάμεσα σε συχνότητες. Το λειτουργικό διάγραμμα του Doppler ραντάρ είναι το ακόλουθο:



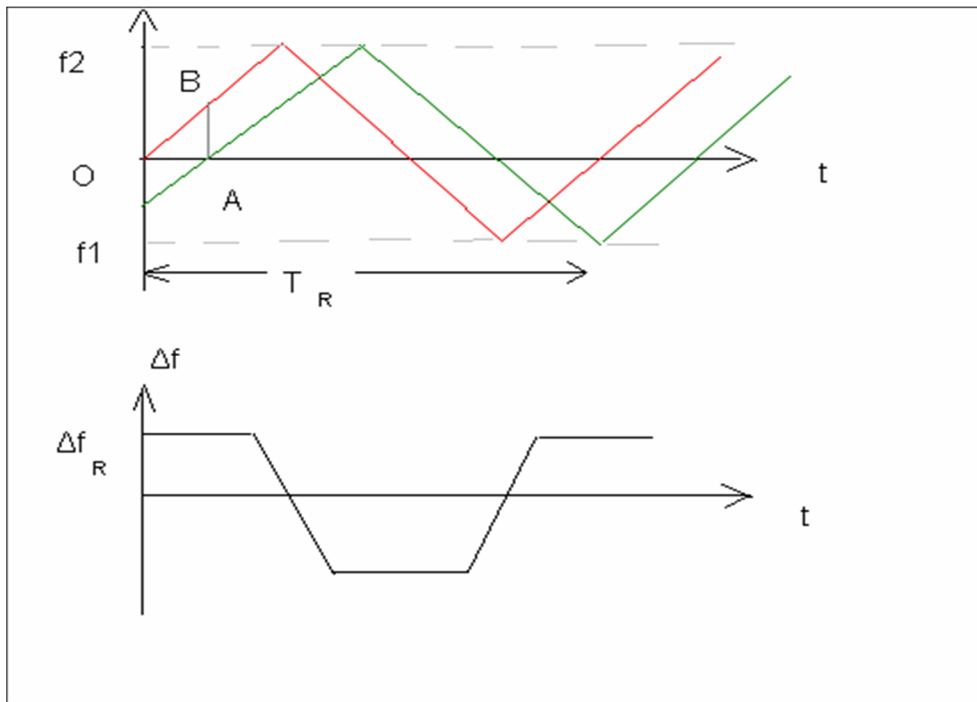
Σχήμα 1.4: Διάγραμμα Doppler ραντάρ

- Πηγή συνεχούς κύματος (CW), φέρουσας συχνότητας ( $f_c$ ) και μη-διαμορφωμένου πλάτους, παράγει σήμα που ακτινοβολείται.
- Η ηχώ περιέχει σήμα συχνότητας ( $f_c+f_D$ ), το οποίο μαζί με δείγμα του εκπεμπόμενου σήματος ( $f_c$ ), οδηγείται σε μείκτη, απ όπου προκύπτουν οι συχνότητες  $(f_c+f_D) \pm f_c$ . Η μεγαλύτερη, σχεδόν διπλάσια της ( $f_c$ ), κόβεται από κατωδιαβατό φίλτρο.
- Η συχνότητα ( $f_D$ ) είναι στην ακουστική (audio) ζώνη (30Hz-30KHz), ενισχύεται και οδηγείται σε συχνόμετρο ή αναλυτή φάσματος. Η μετατόπιση συχνότητας που καταγράφεται και οδηγεί σε προσδιορισμό της ταχύτητας του στόχου, δίνεται από την

$$f_D = \frac{2\vec{v} \cdot \vec{R}}{\lambda R}$$

### iii) FM ραντάρ

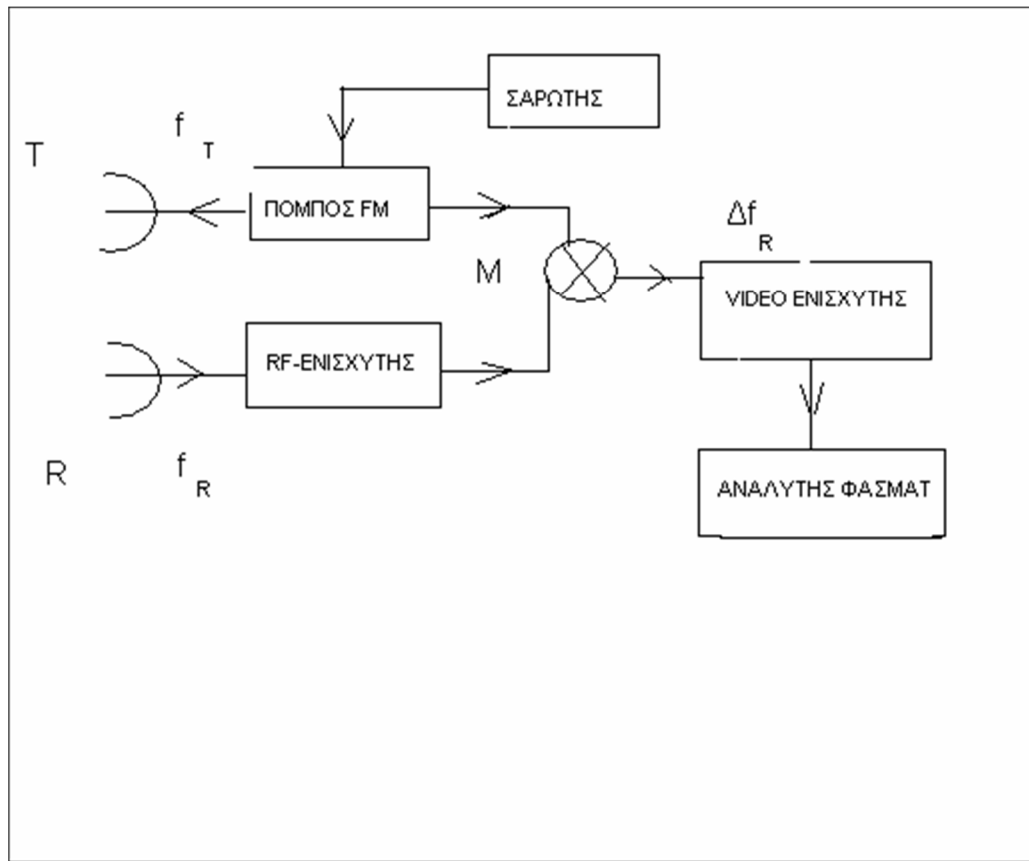
Προσδιορισμός της θέσης του στόχου μπορεί να γίνει και μέσω της τεχνικής του FM-ραντάρ που θα περιγράψουμε εδώ. Εδώ έχουμε μία RF-φέρουσα συχνότητα η οποία διαμορφώνεται κατά συχνότητα. Η εκπεμπόμενη κυματομορφή, σταθερού πλάτους, σαρώνει γραμμικά την ζώνη συχνοτήτων  $f \in [f_1, f_2]$ , με περίοδο σάρωσης  $T_R$ .



Σχήμα 1.5: Κυματομορφή FM ραντάρ



Το δομικό διάγραμμα του FM-ραντάρ είναι το ακόλουθο:

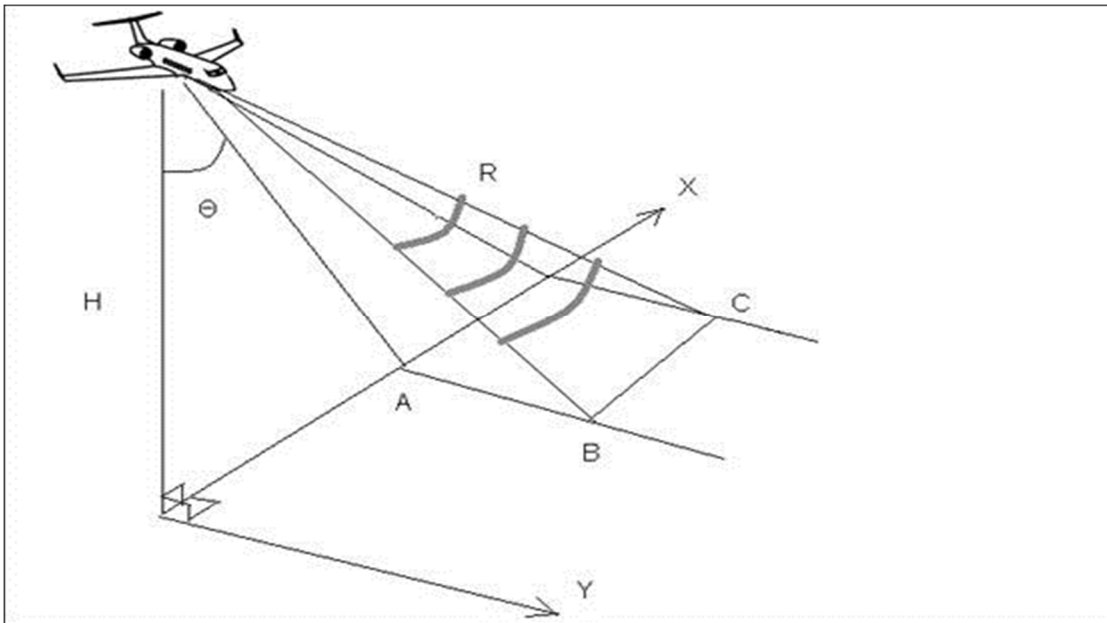


Σχήμα 1.6: Διάγραμμα FM ραντάρ

Η γεννήτρια σάρωσης παράγει περιοδική τριγωνική κυματομορφή που διαμορφώνει την συχνότητα του φορέα ( $f_c$ ). Η τελευταία ακτινοβολείται προς τον στόχο. Αφού ανακλαστεί στον στόχο, επιστρέφει, ενισχύεται και με δείγμα του εκπεμπόμενου σήματος οδηγείται σε μείκτη. Στην έξοδο του τελευταίου λαμβάνεται η διαφορά συχνοτήτων, η οποία οδηγείται τελικά σε video-ενισχυτή (30Hz-30MHz). Στο παραπάνω ραντάρ, όπως και στο ραντάρ Doppler έχουμε σύγκριση της φάσης μεταξύ εκπεμπόμενου σήματος και ηχούς, οπότε καλείται και *σύμφωνος ανιχνευτής*.

#### iv) SLAR ραντάρ

Το απλούστερο ραντάρ απεικόνισης είναι το SLAR (Side-Looking Airborne Radar) ή Πλευρικά Εποπτεύον Εναέριο Ραντάρ. Τα πλέον σημαντικά χαρακτηριστικά του είναι ότι κατά την παράλληλη προς την διεύθυνση πτήσης κατεύθυνση ή διαμήκη διεύθυνση η δέσμη ακτινοβολίας είναι στενή. Κατά την εγκάρσια διεύθυνση το επίγειο ίχνος είναι πλατύ λόγω του ότι υπάρχει κίνηση σάρωσης της κεραίας (με μηχανικό ή ηλεκτρονικό τρόπο) για την κάλυψη όσο το δυνατόν μεγαλύτερης έκτασης. Το SLAR είναι παλμικό ραντάρ και η καταγραφή της επιστρεφόμενης ηχούς, οδηγείται τελικά σε δισδιάστατη οθόνη απεικόνισης με την σχετική ένταση κάθε εικονοστοιχείου ανάλογη της ισχύος επιστροφής. Η αναγνώριση της υφής του στόχου γίνεται μέσω εμπειρίας, με χρήση της θεωρίας σκέδασης, κ.ο.κ. και έτσι απεικονίζονται οι διάφοροι στόχοι όπως π.χ. κτήρια, βλάστηση, υδάτινες επιφάνειες κ.ο.κ. Η σχετική ένταση κάθε εικονοστοιχείου (pixel) της απεικόνισης (τόνοι του γκρι, 0-255) είναι ανάλογη της επιστρεφόμενης ισχύος από το αντίστοιχο κομμάτι του στόχου, και έτσι σχηματίζονται μικροκυματικοί χάρτες της επιτηρούμενης επιφάνειας.



Σχήμα 1.7: SLAR ραντάρ

## ν) SAR ραντάρ

Εξελιγμένη μορφή του SLAR είναι και το SAR ραντάρ που είναι ακρωνύμιο των όρων Synthetic Aperture Radar (Ραντάρ Συνθετικού Διαφράγματος). Με την ίδια γεωμετρία και φυσικό μήκος κεραίας  $l$ , με αυτήν του SLAR, πετυχαίνει κατά τεχνητό τρόπο συνθετικό μήκος-διάφραγμα κεραίας πολύ μεγαλύτερο του φυσικού και έτσι βελτιώνει σημαντικά την διαμήκη αναλυτικότητα του SLAR. Αυτό πετυχαίνεται με σύμφωνη αποθήκευση της επιστροφής από τον ίδιο στόχο, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

## vi) Σύμφωνο-παλμικό ραντάρ (CHIRP-RADAR)

Το συγκεκριμένο ραντάρ χρησιμοποιεί τόσο διαμόρφωση πλάτους όσο και διαμόρφωση συχνότητας για βελτίωση της διακριτικής ικανότητας ή αναλυτικότητας.

## vii) Ραντάρ ένδειξης κινούμενου στόχου (MTI)

Αυτό είναι ένα παλμικό ραντάρ που εξάγει την Doppler συχνότητα για να εντοπίσει κινούμενους στόχους υπό την παρουσία δυνατών ανεπιθύμητων θορύβων. Το είδος κύματος του είναι μια κλασική σειρά δονήσεων με μια χαμηλή συχνότητα επαναλαμβανόμενων δονήσεων για να αποφύγει ασάφειες στην επιθυμητή κατεύθυνσή.

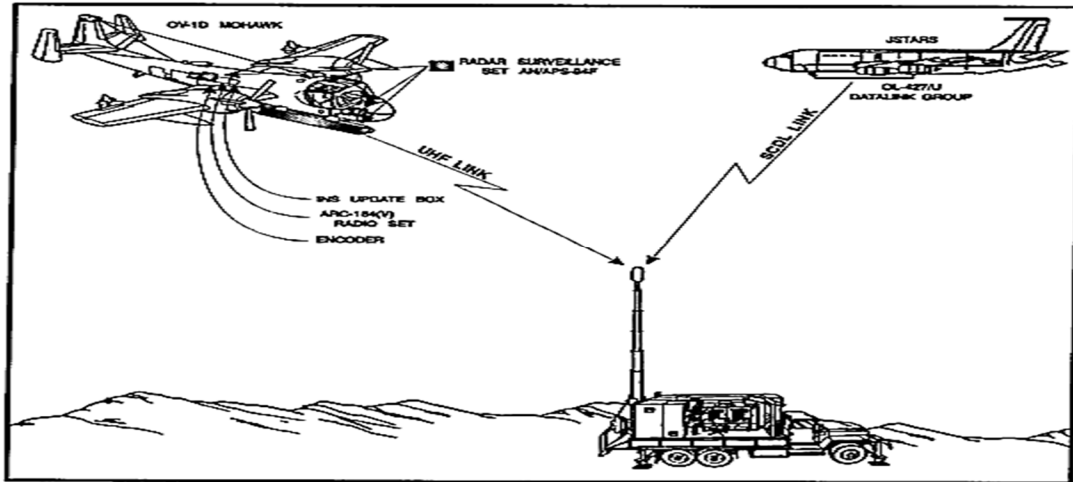
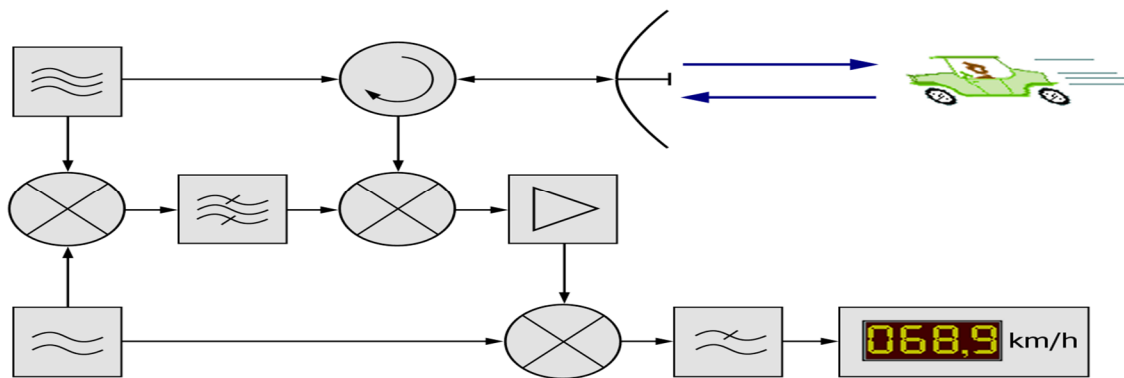


Figure 2-10. IGSM Interfaces.

Σχήμα 1.8: MTI ραντάρ

viii) Ραντάρ συνεχούς κύματος (CW)

Το συγκεκριμένο ραντάρ μεταδίδει συνεχώς ένα σήμα υψηλής συχνότητας. Το σήμα αντήχησης λαμβάνεται και επεξεργάζεται μόνιμα. Θα πρέπει όμως να αποφευχθεί μια άμεση σύνδεση της μεταφερόμενης ενέργειας στον δέκτη (σύνδεση feedback), η οποία επιτυγχάνεται με χωρικό διαχωρισμό της κεραίας εκπομπής και της κεραίας λήψης είτε μέσω της συχνότητας Doppler κατά την μέτρηση των ταχυτήτων.



Σχήμα 1.9: Διάγραμμα CW ραντάρ

Οι παραπάνω αποτελούν ορισμένους τύπους ραντάρ και όχι όλους. Επίσης μπορούμε να διαχωρίσουμε τα ραντάρ ανάλογα με την ύπαρξη πομπού ή όχι σε ενεργητικά, παθητικά ή υβριδικά. Καθώς επίσης και ανάλογα με την θέση και το πλήθος των δεκτών σε μονοστατικά, διστατικά και πολυστατικά.

#### 1.4 Ενεργός Επιφάνεια Ραντάρ (RCS)

Η ενεργός επιφάνεια RADAR(RCS) είναι μια μετρούμενη ποσότητα που σχετίζεται αποκλειστικά με τα γεωμετρικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του στόχου. Μπορεί να χαρακτηριστεί ως η συνολική ενεργός επιφάνεια του στόχου, που ανακλά το προσπίπτον σήμα του RADAR. Για το λόγο αυτό η μονάδα του RCS εκφράζεται ανά τετραγωνικά μέτρα.

Σύμφωνα με τον IEEE ορισμό, το RCS είναι ένα μέτρο της ανακλαστικής ισχύος του στόχου και ορίζεται ως 4 π φορές ο λόγος της ισχύος ανά μοναδιαία στερεά γωνία που σκεδάζεται προς δεδομένη κατεύθυνση, προς την ισχύ ανά μοναδιαία επιφάνεια ενός επιπέδου κύματος προσπίπτοντος στον σκεδαστή υπό δεδομένη κατεύθυνση.

$$\sigma = \frac{\text{power reflected toward source/unit solid angle}}{\text{Incident power density}/4\pi} = 4\pi R^2 \times \frac{|E_r|^2}{|E_i|^2}$$

Η έννοια του RCS μπορεί να συμπυκνωθεί στα εξής:

**Γεωμετρικό μέγεθος:** Η μετωπική επιφάνεια που το αντικείμενο παρουσιάζει, ως προς το RADAR.

**Ανακλαστικότητα:** Είναι το μέτρο του ποσοστού της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που ανακλάται και δεν απορροφάται από την επιφάνεια του «φωτιζόμενου» από το RADAR αντικειμένου.

**Κατευθυντικότητα :** Το σχήμα της επιφάνειας ορίζει την κατεύθυνση προς την οποία η ενέργεια ανακλάται.

Όπως καταλαβαίνουμε σύμφωνα και με τις βασικές ιδιότητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, το RCS είναι ένα μέγεθος που μεταβάλλεται με τη γωνία παρατήρησης, τη συχνότητα της ακτινοβολίας κ.α.

## 1.5 Φαινόμενο Doppler

Το φαινόμενο Doppler είναι το φαινόμενο κατά το οποίο η συχνότητα ενός κύματος την οποία αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής και το οποίο κύμα εκπέμπεται από μία πηγή η οποία κινείται σε σχέση με τον παρατηρητή εμφανίζεται μετατοπισμένη. Συγκεκριμένα όταν η πηγή, η οποία εκπέμπει σήμα συχνότητας  $f$ , πλησιάζει τον παρατηρητή τότε ο παρατηρητής λαμβάνει ένα σήμα μεγαλύτερης συχνότητας. Το αντίθετο συμβαίνει όταν η πηγή απομακρύνεται.

Η μετατόπιση της συχνότητας κατά Doppler  $f_d$  για την περίπτωση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας δίνεται από την σχέση:

$$f_d = 2 \frac{v_r}{c} f$$

όπου  $f$  η συχνότητα εκπομπής της πηγής,  $v$  η ταχύτητα της πηγής σε σχέση με τον παρατηρητή και  $c$  η ταχύτητα του φωτός.

Ένα ραντάρ εκπέμπει ένα σήμα με συγκεκριμένη συχνότητα  $f_1$ . Αυτό ανακλάται στον στόχο και επιστρέφει, λόγω της κίνησης του στόχου, με μια συχνότητα  $f_2 = f_1 \pm f_d$ . Στην προηγούμενη σχέση το (+) αντιστοιχεί στην περίπτωση που ο στόχος πλησιάζει το ραντάρ (απόσταση παρατηρητή-πηγής μειώνεται) και το (-) στην περίπτωση που απομακρύνεται (απόσταση παρατηρητή-πηγής αυξάνεται).

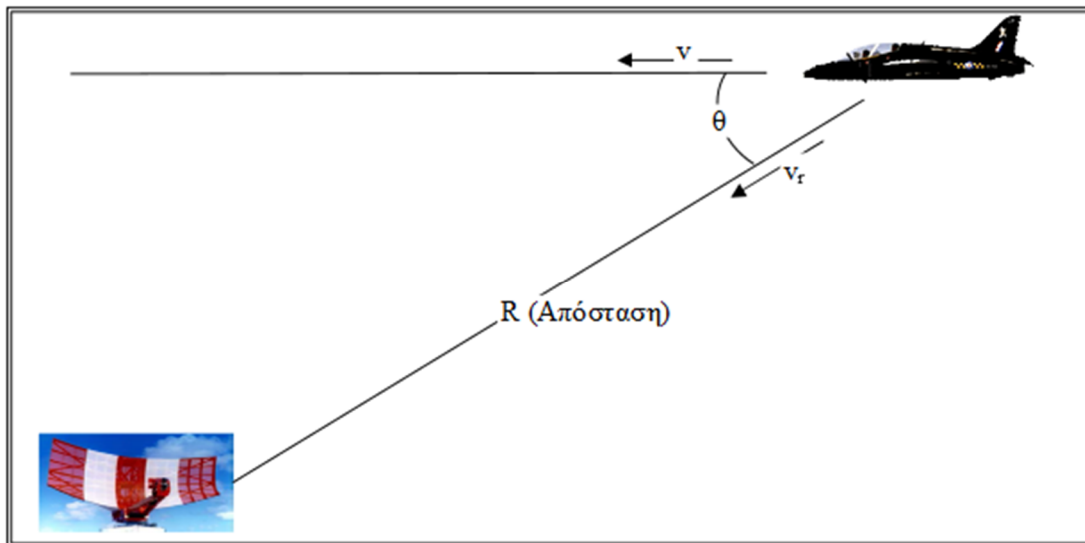
Εάν το ραντάρ εκπέμπει σε μια συχνότητα  $f_0$  με αντίστοιχο μήκος κύματος  $\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$ , τότε η συνολική διαδρομή του κύματος από και προς τον στόχο θα προσθέσει μια μεταβολή φάσης ίση με  $2\pi$  επί των αριθμό των μηκών κύματος, δηλαδή  $2R/\lambda_0$ . Άρα μπορούμε να πούμε ότι παρεμβάλλεται μια φάση  $\varphi = 2\pi \cdot \frac{2R}{\lambda_0}$ . Ο στόχος όμως δεν είναι σταθερός οπότε δημιουργείται μια μεταβολή στη φάση που ισοδυναμεί με μια νέα κυκλική συχνότητα σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{df}{dt} = \omega_d = 2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{dR}{dt} = -2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda_0} v_r = 2\pi \cdot f_d$$

Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι η Doppler συχνότητα που επιστρέφει λόγω της σχετικής κίνησης του στόχου είναι:

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda_0} = -2 \frac{f_0}{c} \cdot v_r$$

Όπου  $v_r$  είναι η ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας κατά την διεύθυνση της ευθείας που ενώνει το ραντάρ και τον στόχο. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα όπου η  $v_r$  αντιστοιχεί στην προβολή της ταχύτητας του αεροσκάφους στην ευθεία θέασης.(LOS)



Σχήμα 1.10: Η συνιστώσα της ταχύτητας του στόχου που καθορίζει την συχνότητα Doppler.



Όταν ο στόχος πλησιάζει προς το ραντάρ η απόσταση ελαττώνεται, η ταχύτητα είναι αρνητική, ενώ αντίστοιχα όταν απομακρύνεται θα είναι θετική. Κατά συνέπεια από την εξίσωση Doppler καταλαβαίνουμε ότι η συχνότητα θα είναι θετική και αρνητική αντίστοιχα.

## 1.6 Βασικά Χαρακτηριστικά Θορύβου

Ο θόρυβος μπορεί να οριστεί με την ηλεκτρονική έννοια ως κάποιο ανεπιθύμητο είδος ενέργειας που τείνει να αναμειχθεί με το επιθυμητό σήμα κατά την διάρκεια λήψης και αναπαραγωγής του σήματος. Πολλές διαταραχές που προκαλούνται στην φύση μπορούν να εμφανίσουν θόρυβο στους δέκτες, τροποποιώντας ανεπιθύμητα το σήμα. Επομένως αντιμετωπίζουμε τον θόρυβο σαν το μέσο ώστε να μειωθεί η λειτουργία των συστημάτων για μια δεδομένη μεταφερόμενη ισχύς. Μπορεί επίσης να επηρεάσει την ευαισθησία των δεκτών, βάζοντας ένα όριο ενίσχυσης στα ασθενέστερα σήματα. Ορισμένες φορές μπορεί και να προκαλέσει μείωση στο εύρος ζώνης του συστήματος, όπου θα φανεί στο ραντάρ. Υπάρχουν πολλοί τρόποι ταξινόμησης του θορύβου. Μπορεί να υποδιαιρεθεί ανάλογα με κάποιες προϋποθέσεις σύμφωνα με τον τύπο, την πηγή, την επίδραση ή την σχέση με τον δέκτη. Είναι ωστόσο πιο εύκολο να χωρίσουμε τον θόρυβο σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στο θόρυβο του οποίου οι πηγές βρίσκονται έξω από τον δέκτη (εξωτερικός) και στον θόρυβο που δημιουργείται μέσα στον δέκτη (εσωτερικός).

Η τυχαία κίνηση των ελευθέρων ηλεκτρονίων στα ωμικά τμήματα εισόδου ενός δέκτη προκαλεί το λεγόμενο θερμικό θόρυβο (thermal ή Johnson noise). Η τιμή του θορύβου αυτού, είναι ευθέως ανάλογη της θερμοκρασίας των ωμικών τμημάτων, καθώς επίσης και του εύρους συχνοτήτων (bandwidth) της μάντας λειτουργίας του δέκτη. Είναι δηλαδή:

$$N_i = \kappa T B$$

όπου,  $N_i$  η διαθέσιμη ισχύς θερμικού θορύβου που παράγεται εσωτερικά στην είσοδο του δέκτη (Watt)

$k$  η σταθερά Boltzmann ( $1.380 \times 10^{-23}$  Joule/ $^{\circ}K$ )

$T$  η θερμοκρασία των ωμικών τμημάτων εισόδου του δέκτη ( $^{\circ}K$ )

$B$  το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας του

Η θερμοκρασία θορύβου μιας κεραίας εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τον προσανατολισμό και την συχνότητα λειτουργίας της.

Ένα άλλο μέγεθος που αποδίδει τον εσωτερικό θόρυβο ενός δικτύου είναι ο συντελεστής θορύβου που ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος θορύβου εξόδου του θορυβώδους δικτύου προς την ισχύ θορύβου εξόδου απουσία εσωτερικών πηγών θορύβου, με την υπόθεση ότι η πηγή θορύβου στην είσοδο του δέκτη ισοδυναμεί με αντίσταση θορύβου  $T_0 = 290^{\circ}K$ . Δηλαδή, ως συντελεστής θορύβου  $F$  ορίζεται ο λόγος

$$F = \frac{GkT_0 B + N_n}{GkT_0 B}$$

ή

$$F = 1 + \frac{T_e}{T_0}$$

Εύκολα προκύπτει ότι ο συντελεστής θορύβου είναι ίσος προς

$$F = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}}$$

όπου  $SNR_{in}$  και  $SNR_{out}$  οι σηματοθορυβικοί λογοι στην είσοδο και στην έξοδο του δικτύου, όταν η ισοδύναμη θερμοκρασία του θορύβου εισόδου είναι  $290^{\circ}K$ .

Για την περίπτωση του ραντάρ, ο δέκτης δέχεται σήματα θορύβου από διάφορες πηγές, όπως η θερμική ακτινοβολία των σωμάτων που σκοπεύει η κεραία, ο θόρυβος που παράγεται στην ίδια κεραία και στη γραμμή μεταφοράς. Από πλευράς δέκτη, η κεραία χαρακτηρίζεται από μια φαινόμενη θερμοκρασία  $T_{\varphi}$ . Αν υποθέσουμε ότι έχουμε προσαρμογή στην είσοδο του δέκτη η εισερχόμενη ισχύς θορύβου είναι

$$P_{N,in} = \kappa T_{\varphi} B$$

Εκτός όμως από τον παραπάνω θόρυβο, έχουμε και πρόσθεση θορύβου. Ορίζοντας  $\left(\frac{R_S}{R_N}\right)$  τον λόγο ισχύος σήματος προς θόρυβο στην είσοδο του δέκτη και αντίστοιχα  $\left(\frac{R_S}{R_N}\right)$  στην έξοδο του δέκτη, ορίζουμε τον συντελεστή θορύβου

$$F_N = \frac{P_{S,in}}{P_{S,out}} * \frac{P_{N,out}}{P_{N,in}}$$

και ορίζοντας το κέρδος του δέκτη

$$G_0 = \frac{P_{S,out}}{P_{S,in}}$$

Έχουμε

$$\frac{P_{N,out}}{G_0} = P_{N,in} * F_N = kT_\varphi BF_N$$

που μας δείχνει ότι ο θόρυβος στην είσοδο αυξάνεται κατά τον συντελεστή θορύβου  $F_N(db)$ .

## **Κεφάλαιο 2**

### **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΡΑΝΤΑΡ ΜΕ ΧΑΜΗΛΗ ΙΣΧΥ ΚΑΙ ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΥΠΟΚΛΟΠΗΣ-ΑΝΑΧΑΙΤΗΣΗΣ**

#### **2.1 Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με την περιγραφή ραντάρ με χαμηλή ισχύ. Τα συγκεκριμένα ραντάρ έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό τους την πολύ χαμηλή πιθανότητα αναχαίτισης – υποκλοπής από οποιοδήποτε δέκτη προειδοποίησης.

#### **2.2 Ραντάρ με χαμηλή ισχύ**

Ένα χαμηλής πιθανότητας αναχαίτισης-υποκλοπής ραντάρ (Low Probability of Intercept) έχει σχεδιαστεί για να είναι δύσκολο να ανιχνευθεί από ένα παθητικό εξοπλισμό ανίχνευσης ραντάρ (όπως ένα δέκτη προειδοποίησης ραντάρ-RWR), ενώ ψάχνει για ένα στόχο ή ασχολείται με την παρακολούθηση στόχου. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι επιθυμητό σε ένα ραντάρ, διότι επιτρέπει την εύρεση και την παρακολούθηση στόχου, χωρίς να γίνεται αντιληπτό από τον στόχο η παρουσία του ραντάρ.

Τρόποι μείωσης του <<προφίλ>> ενός ραντάρ περιλαμβάνουν την χρήση εύρους ζώνης ευρείας συχνότητας (wideband), την αναπήδηση συχνότητας (frequency hopping), την χρησιμοποίηση συχνότητας συνεχούς διαμόρφωσης κύματος σήματος (frequency-modulated continuous-wave) και χρησιμοποιώντας μόνο την ελάχιστη ισχύ που απαιτείται για τον συγκεκριμένο σκοπό. Χρησιμοποιώντας συμπίεση παλμού μειώνεται επίσης η πιθανότητα ανίχνευσης, δεδομένου ότι η μέγιστη μεταδιδόμενη ισχύς είναι χαμηλότερη, ενώ το εύρος και η ανάλυση παραμένουν ίδια. Επίσης κατασκευάζοντας ένα ραντάρ με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να εκπέμπει πολύ μικρούς πλευρικούς και οπίσθιους λοβούς, μπορεί να επιτευχθεί μείωση πιθανότητας υποκλοπής όταν δεν είναι στραμμένο στον δέκτη προειδοποίησης ραντάρ. Ωστόσο όταν το ραντάρ σαρώνει ένα μεγάλο όγκο του χώρου για στόχους, είναι πιθανόν ότι ο κύριος λοβός θα δείχνει επανειλημμένα προς τον δέκτη προειδοποίησης ραντάρ. Όλοι οι στρατιωτικοί πομποί, συμπεριλαμβανομένων των μαχητικών αεροσκαφών, πολεμικών πλοίων, καθώς και πυραυλικά συστήματα είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να έχουν μειωμένο ηλεκτρομαγνητικό <<προφίλ>> με σκοπό την βελτίωση της μυστικότητας. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε ένα τέτοιο τύπο στρατιωτικού ραντάρ.



Σχήμα 2.2 Ραντάρ χαμηλής πιθανότητας υποκλοπής (BOR-A 550)

Το παραπάνω ραντάρ είναι στρατιωτικού τύπου επίγειας παρατήρησης, το οποίο ανιχνεύει τους κινούμενους στόχους στο έδαφος, πάνω από το νερό αλλά και χαμηλά ιπτάμενους στόχους. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα οι μη κινούμενοι στόχοι να καταγραφούν και να παρουσιαστούν ως αποκαλούμενοι χάρτες παρεμβολών-παρασίτων. Ο τρόπος λειτουργίας του βασίζεται στην μετατόπιση Doppler, που αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Το σήμα εκπομπής ανακλάται στον στόχο και τότε λαμβάνεται από την κεραία. Η λαμβανόμενη συχνότητα είναι ένας συσχετισμός της μεταδιδόμενης συχνότητας και της μετατόπισης Doppler. Η μετατόπιση Doppler εξαρτάται από την κίνηση του στόχου είτε αυτός πλησιάζει είτε αυτός απομακρύνεται. Η συχνότητα που προκύπτει από τη σύγκριση των διαβιβασθέντων και λαμβανομένων παλμών επεξεργάζεται από τα κυκλώματα δέκτη για να παραχθεί η ένδειξη στόχων και ο τόνος Doppler.

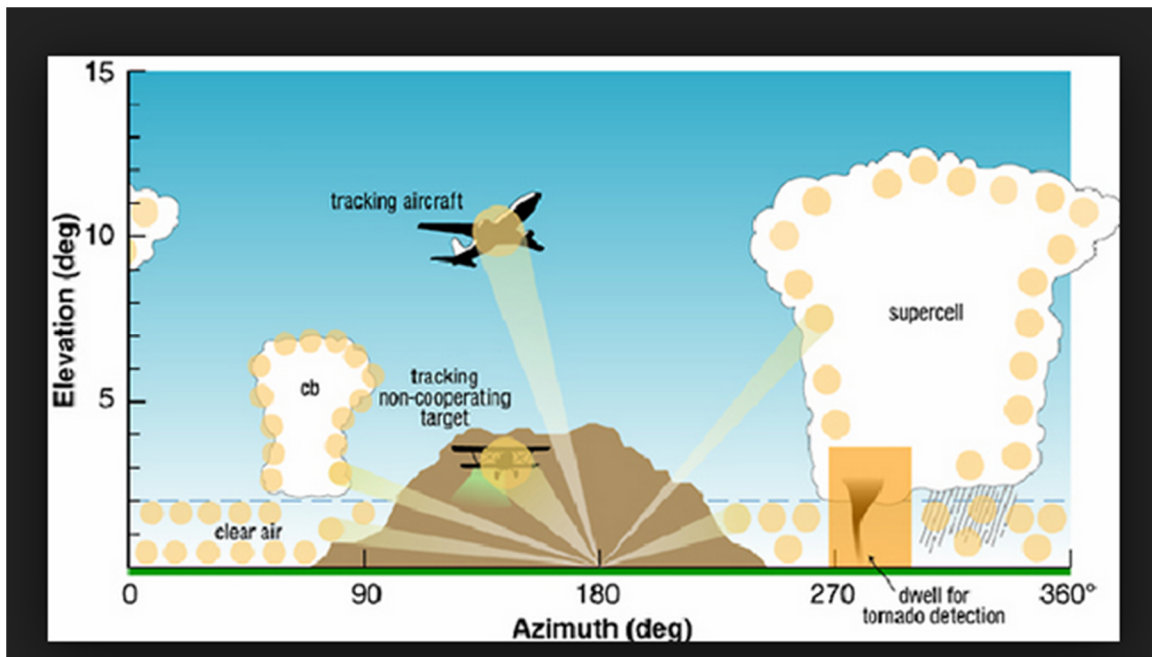
Επιχειρησιακά το συγκεκριμένο ραντάρ έχει την ικανότητα να εκτελέσει:

- Επίγεια παρατήρηση προς ανίχνευση μεμονωμένου προσώπου, ομάδας ανθρώπων, τροχοφόρου οχήματος μεμονωμένου ή ομάδας, και ερπυστριοφόρου οχήματος μεμονωμένου ή ομάδος.
- Εναέρια παρατήρηση κοντά στο έδαφος προς ανίχνευση ελικοπτέρου, ελαφριών αεροσκαφών, ανεμοπτέρων και αλεξιπτώτων.
- Παράκτια παρακολούθηση πάνω από το νερό προς ανίχνευση πλοιαρίου.
- Επιτήρηση για την ασφάλει περιοχής.

Το ραντάρ BOR-A 550 έχει δυνατότητα προστασίας από παρεμβολή με μεταβολή της επανάληψης των μεταδιδόμενων παλμών (PRF stagger) ή με τυχαία αλλαγή συχνότητας στο εύρος της μάντας των 21 καναλιών. Επίσης είναι ευκίνητο λόγω ταχείας αναπτύξεως του και έχει τη δυνατότητα ηχητικής αναγνώρισης στόχου. Σαν μειονέκτημα μπορούμε να αναφέρουμε την κατάλληλη θέση στην οποία πρέπει να τοποθετηθεί για να αποδώσει την μέγιστη εμβέλεια.

### 2.3 Ραντάρ διάταξης φάσης

Σύγχρονα ραντάρ διάταξης φάσης (phased-array radar) δεν ελέγχουν μόνο τους πλαϊνούς λοβούς, αλλά χρησιμοποιούν επίσης πολύ λεπτές και ταχέως κινούμενες δέσμες ενέργειας σε πολύπλοκα μοτίβα αναζήτησης. Αυτή η τεχνική μπορεί να είναι αρκετή για να παραπλανήσει τον δέκτη προειδοποίησης ραντάρ ώστε να μην αναγνωρίζει το ραντάρ σαν στόχο ακόμα και αν το ίδιο το σήμα ανιχνεύεται. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε μια απεικόνιση ενός τέτοιου τύπου ραντάρ.



Σχήμα 2.2 Ραντάρ διάταξης φάσης

Ακολουθεί η ανάπτυξη των ραντάρ διάταξης φάσης ηλεκτρονικής σάρωσης (ESA Electronically Scanned Radar ) σε σταθερή κεραία (fixed phased array) όπως το SPY-1A. Σήμερα τα συστήματα ESA κυριαρχούν είτε με τη μορφή ενεργής διάταξης (AESA

Active Electronically Scanned Radar) είτε με τη μορφή παθητικής διάταξης (PESA Passive Electronically Scanned Radar). Τα ραντάρ ESA διαθέτουν κεραίες διάταξης φάσης με στοιχεία μετατόπισης φάσης τα οποία σχηματίζουν ανεξάρτητες δέσμες ή δέσμη που αλλάζουν ταχύτητα κατεύθυνση και εκτελούν ηλεκτρονική σάρωση σε αζιμούθιο και ανύψωση. Η αλλαγή κατεύθυνσης της δέσμης επιτυγχάνεται ταχύτητα σε διάστημα microsecond χάρις στην αλλαγή φάσης κάθε στοιχείου και έτσι σε διάστημα ενός δευτέρου είναι δυνατή η αλλαγή της θέσης της δέσμης με ρυθμό που μπορεί να μετρηθεί σε χιλιάδες. Η διάταξη αυτή παρέχει την δυνατότητα πολλαπλών λειτουργιών στην ίδια συχνότητα με χρονικό καταμερισμό (timesharing) και την εναλλασσόμενη λειτουργία τους. Στα ραντάρ AESA παρέχεται η δυνατότητα σχηματισμού πολλαπλών ανεξάρτητων κύριων δεσμών που εκτελούν τις διαφορετικές λειτουργίες σε αντίθεση με τον χρονικό καταμερισμό που χρησιμοποιείται στην περίπτωση της μοναδικής κύριας δέσμης. Στο APAR για παράδειγμα, παρέχεται η δυνατότητα σχηματισμού περισσότερων από 1000 ανεξάρτητων δεσμών. Η σύγχρονη λοιπόν τάση στον τομέα αυτό συνδέεται με την δυνατότητα αντιμετώπισης επιθέσεων κορεσμού από εχθρικά αεροσκάφη ή βλήματα που εκδηλώνονται ταυτόχρονα από διαφορετικές κατευθύνσεις και απαιτεί την χρήση αισθητήρων υψηλής ακρίβειας.

## **Κεφάλαιο 3**

### **Σύστημα Παραγωγής Σημάτων Ραντάρ (παρεμβολέας ραντάρ)**

#### **3.1 Εισαγωγή**

Οι παρεμβολές που προκαλούνται στα ραντάρ (radar jamming and deception) αλλά και στα υπόλοιπα ασύρματα μέσα επικοινωνίας με σκοπό την εξαπάτηση τους, προκαλούνται από την εσκεμμένη εκπομπή σημάτων ραδιοσυχνοτήτων, η οποία παρεμβαίνει στην λειτουργία του ραντάρ με <<κορεσμό>> του δέκτη με θόρυβο ή ψευδείς πληροφορίες. Υπάρχουν δύο τύποι παρεμβολής ραντάρ: Μηχανική και Ηλεκτρονική παρεμβολή.



Η μηχανική παρεμβολή προκαλείται από συσκευές που αντανακλούν την ενέργεια του ραντάρ με σκοπό την παραγωγή ψευδών στόχων προς το πεδίο δράσης του χειριστή. Συσκευές μηχανικών παρεμβολών περιλαμβάνουν ανεμίδια (chaff) τα οποία αποτελούνται από μικρά τμήματα αλουμινίου, επιμεταλλωμένες ίνες γυαλιού ή πλαστικού τα οποία είτε εμφανίζονται ως ένα σύμπλεγμα από δευτερεύοντες στόχους στις οθόνες του ραντάρ ή κατακλύζουν την οθόνη με πολλαπλές επιστροφές. Επίσης περιλαμβάνουν ανακλαστήρες γωνίας (corner reflectors), οι οποίοι είναι πολλαπλών όψεων αντικείμενα που επανεκπέμπουν την ενέργεια του ραντάρ πίσω προς την πηγή του αλλά και κράχτες (decoys) τα οποία είναι εύελικτα ιπτάμενα αντικείμενα που προορίζονται να παραπλάνησουν ένα ραντάρ ότι πρόκειται για πραγματικό αεροσκάφος.

Η ηλεκτρονική παρεμβολή είναι μια μορφή Ηλεκτρονικού Πολέμου όπου παρεμβολείς (jammers) εκπέμπουν σήματα προς τα εχθρικά ραντάρ, μπλοκάροντας τον δέκτη με εξαιρετικά πυκνά ενεργειακά σήματα. Οι δύο κύριες μορφές τεχνικής είναι τεχνικές θορύβου και τεχνικές αναμετάδοσης.

### 3.2 Παρεμβολές σε δίκτυο επικοινωνιών

Η παρεμβολή ενός συμβατικού δικτύου επικοινωνιών που χρησιμοποιεί σταθερή (μη μεταβαλλόμενη) φέρουσα συχνότητα γίνεται εύκολα κατανοητή αν σκεφτούμε το παρακάτω σχήμα, όπου δύο ασύρματοι Α και Β επικοινωνούν μεταξύ τους με τη μετάδοση φωνής ή δεδομένων χρησιμοποιώντας διαμόρφωση (αναλογική ή ψηφιακή) με

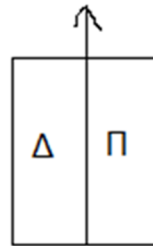
φέρουσα συχνότητα  $f_0$  .



A



B



J

Ο παρεμβολέας αποσκοπεί στην διακοπή (με την εισαγωγή θορύβου) στον δίαυλο λήψης του A ή B δέκτη. Υποθέτουμε την συνηθισμένη διαδικασία “half duplex” δηλαδή, ότι κατά περιόδους ο ασύρματος A μεταπίπτει από πομπό σε δέκτη και βέβαια ακριβώς το αντίθετο συμβαίνει στον B.

Στην παραπάνω αναφερόμενης περίπτωση για να πετύχει η παρεμβολή θα πρέπει το σύστημα J αρχικά να μετρήσει με ικανοποιητική ακρίβεια την φέρουσα συχνότητα  $f_0$  και στη συνέχεια να παραγάγει ένα σώμα με φέρον σήμα όσο το δυνατόν πιο κοντά στην  $f_0$  και το οποίο αφού το διαμορφώσει με ένα σήμα, κατά προτίμηση μορφής θορύβου, να το εκπέμψει προς τον ασύρματο A ή B ανάλογα ποιος από τους δύο βρίσκεται σε κατάσταση λήψης (δέκτης). Η επιτυχία της παρεμβολής εξαρτάται κατά πόσο ο λόγος

της ισχύος σήματος προς την ισχύ παρεμβολής είναι αρκετά μεγάλος. Συνήθως ένας λόγος ισχύος μεγαλύτερος από 5 (δηλαδή 6db) είναι αρκετός να εξουδετερώσει την ζεύξη μεταξύ των σταθμών A και B.

Ο λόγος ισχύων σήματος/παρεμβολής καθορίζεται από την παρακάτω εξίσωση

$$\frac{P_J}{P_S} = \frac{\frac{P_{TJ} G_J h_J^2 h_R^2}{R_{JR}^4}}{\frac{P_{TS} G_T h_R^2 h_T^2}{R_{TR}^4}} = \frac{\text{Ισχύς θορύβου από παρεμβολή}}{\text{Ισχύς σήματος}}$$

Όπου

$P_{TJ}(w)$  Ισχύς εκπεμπόμενης από τον παρεμβολέα

$G_J$  Απολαβή κεραίας παρεμβολέα

$h_J$  Ύψος παρεμβολέα από το μέσο ύψος

$h_R$  Ύψος δέκτη(θύμα)

$R_{JR}$  Απόσταση μεταξύ παρεμβολέα και δέκτη(θύμα)

$P_{TS}$  Ισχύς εκπομπής ασυρμάτου

$G_T$  Απολαβή κεραίας ασυρμάτου

$h_T$  Ύψος δέκτη(= $h_R$ )

$R_{TR}$  Απόσταση μεταξύ ασυρμάτων A και B

Η σχέση (1) μας δίνει

$$\frac{P_J}{P_S} = \frac{P_{TJ}}{P_{TS}} \frac{G_J}{G_T} \left(\frac{h_J}{h_R}\right)^2 \left(\frac{R_{TR}}{R_{JR}}\right)^4$$

Η παραπάνω σχέση καθορίζει τους περιορισμούς του λόγου  $\frac{R_{TR}}{R_{JR}}$ .

Συνηθισμένη περίπτωση είναι:

$$P_{TJ}(w) = 1000$$

$$G_J = 5$$

$$h_J = 100\text{m}$$

$$P_{TS}(w) = 50$$

$$G_T = 1$$

$$h_T = 20\text{m}$$

Οπότε έχουμε :

$$\frac{P_J}{P_S} = 20 \cdot 5 \cdot 25 \cdot \left(\frac{R_{TR}}{R_{JR}}\right)^4 = 4(6\text{db})$$

Οπότε έχουμε :

$$\frac{R_{TR}}{R_{JR}} = \left(\frac{4}{100 \cdot 25}\right)^{1/4} \quad \text{ή} \quad R_{JR} R_{TR} = R_{TR} \cdot \sqrt[4]{625} = 5 \cdot R_{TR}$$

όπου είναι μια ιδιαίτερα ευνοϊκή για τον παρεμβολέα συνθήκη.

### 3.3 Μέθοδος αναπήδησης συχνότητας

Η δυσμενής για τους ασυρμάτους έναντι των παρεμβολέων συνθήκη οδήγησε ακόμα και από τη δεκαετία του 1970 στην ανάπτυξη μεθόδων <<Αναπήδηση συχνότητας <<Frequency Hopping>>. Με την τεχνική αυτή οι ασύρματοι Α και Β στο προηγούμενο παράδειγμα δεν έχουν πλέον σταθερή στον άξονα του χρόνου φέρουσα συχνότητα αλλά οι τοπικοί ταλαντωτές και κατά επέκταση η φέρουσα συχνότητα της ζεύξης αναπηδά πολλές φορές στο ένα δευτερόλεπτο. Τα συστήματα πρώτης γενιάς είχαν

ταχύτητα 8-16Hops/sec, της δεύτερης γενιάς 300-1000Hops/sec, ενώ σήμερα υπάρχουν συστήματα που φθάνουν σε 50.000Hops/sec.

Το θέμα της παρεμβολής δικτύων με αναπήδηση συχνότητας, όπως το ανάλογο για τα ραντάρ με αναπήδηση συχνότητας, υπήρξε ένα από τα δύσκολα θέματα των ηλεκτρονικών αντιμέτρων.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω για τα δίκτυα σταθερής φέρουσας συχνότητας, για να πετύχει η ενέργεια της παρεμβολής, βασική προϋπόθεση είναι η ακριβής μέτρηση της φέρουσας συχνότητας από τον ενεργόντα την παρεμβολή. Όταν η φέρουσα συχνότητα είναι σταθερή η μέτρηση γίνεται από έναν σαρωτικό δέκτη αφού υπάρχει αρκετός χρόνος να μετρηθεί η συχνότητα. Όταν όμως το δίκτυο χρησιμοποιεί φέρουσα συχνότητα που παραμένει σταθερή για ένα πεπερασμένο χρόνο  $\tau$  τότε τα πράγματα αλλάζουν. Όσο μικραίνει ο χρόνος  $\tau$  τόσο αυξάνεται η ταχύτητα αναπήδησης που είναι  $1/\tau$ (Hops/sec).

Για να πετύχει η παρεμβολή θα πρέπει σε κλάσμα του χρόνου  $\tau$  να μετρηθεί η τιμή της χρησιμοποιούμενης εκείνη τη στιγμή τιμή της φέρουσας συχνότητας και ο υπόλοιπος χρόνος να αφιερωθεί στην εκπομπή του σήματος παρεμβολής.

Αν υποθέσουμε ότι η φέρουσα συχνότητα  $f$  βρίσκεται στο όριο  $F1$ (χαμηλότερη συχνότητα) και  $F2$ (υψηλότερη συχνότητα) ένας σαρωτικός δέκτης που μετράει με ακρίβεια  $\Delta f$  το φάσμα χρειάζεται ένα χρόνο  $\Delta t$  που ορίζεται από τη σχέση

$$\Delta f \cdot \Delta t \sim 1 \quad \text{δηλαδή} \quad \Delta t \sim 1/\Delta f$$

Ο χρόνος  $\delta t$  που θα παραμείνει σε ένα φασματικό παράθυρο  $\Delta f$  ο σαρωτικός δέκτης θα είναι

$$\delta t = \Delta f \frac{T}{F2 - F1}$$

Επειδή σύμφωνα με την προηγούμενη εξίσωση θα πρέπει  $\delta t = \Delta t$

Προκύπτει ο απαιτούμενος χρόνος σάρωσης ότι πρέπει να είναι  $(\Delta f)^2 \frac{T}{F_2 - F_1} = 1$  ή

$$T = \frac{F_2 - F_1}{(\Delta f)^2}$$

Σαν παράδειγμα για την ζώνη VHF  $F_2 - F_1 = 60.000 \text{ KHz}$  και  $\Delta f = 1 \text{ KHz}$  θα έχουμε:

$$T = \frac{60.000.000}{(1000)^2} = 60 \text{ sec}$$

Δηλαδή χρειαζόμαστε 1 λεπτό της ώρας να μετρήσουμε με ακρίβεια 1 KHz που σημαίνει ότι είναι αδύνατο ένας σαρωτικός δέκτης να παρακολουθεί ένα ασύρματο με αναπήδηση συχνότητας. Αν αναγκάσουμε τον σαρωτικό δέκτη να "σαρώσει" με μεγαλύτερη ταχύτητα η ευαισθησία του θα καταρέει με το λόγο  $10 \log_{10} \frac{T}{T'}$ , όπου  $T'$  είναι η μικρότερη περίοδος. Αν στο προηγούμενο παράδειγμα αν αντί  $T = 60 \text{ sec}$  χρησιμοποιήσουμε  $T' = 0.01 \text{ sec} = 10 \text{ msec}$ , η μείωση της ευαισθησίας θα είναι

$$10 \log_{10} \frac{60}{10^{-2}} = 37,78$$

Και για  $T' = 0.001 \text{ sec} = 1 \text{ msec}$

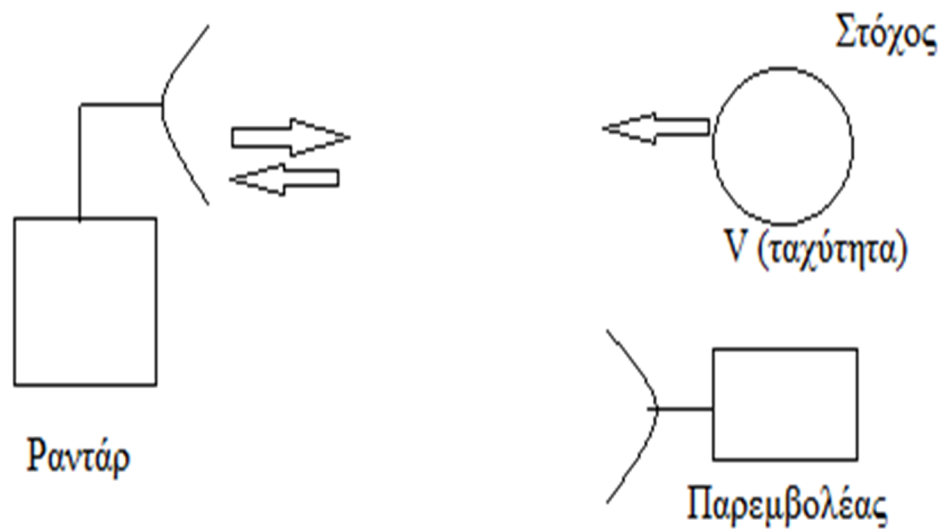
$$10 \log_{10} \frac{60}{10^{-3}} = 47,78$$

Επομένως η δυνατότητα χρήσης σαρωτικού δέκτη είναι μηδενική για χρήση σε παρεμβολές δικτύων αναπήδησης συχνότητας.

### 3.4 Παρεμβολή Συστημάτων Ραντάρ από Γεννήτριες Σημάτων εγκατεστημένων σε Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (UAV)

Η παρεμβολή σημάτων που προκαλούν υποβάθμιση της ικανότητας των ραντάρ να ανιχνεύουν στόχους, είναι μια κλασική μέθοδος στο πεδίο των επιχειρήσεων. Η αρχή παρεμβολής ενός ραντάρ βασίζεται στην εκπομπή ενός σήματος που εισάγει ενέργεια στο δέκτη του ραντάρ επιπρόσθετα στα σήματα που λαμβάνει (ο δέκτης) από το φαινόμενο της ηχούς των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τους προς ανίχνευση στόχους που το ραντάρ έχει σκοπό να ανιχνεύσει την παρουσία τους και να μετρήσει σε ποιο σημείο του χώρου βρίσκονται ( δύο ή μία γωννίες και απόσταση).

Η πλέον απλοποιημένη εικόνα παρεμβολής ενός ραντάρ είναι αυτή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το ραντάρ εκπέμπει σήματα προς τον στόχο και λαμβάνοντας την ηχώ από τον στόχο προσπαθεί να ανιχνεύσει την παρουσία του στόχου και να μετρήσει την απόσταση και την θέση του στο χώρο.



Σχήμα 3.1 Παρεμβολή ενός Ραντάρ

Ο παρεμβολέας προσπαθεί να εκπέμψει σήματα προς το ραντάρ με φασματικό περιεχόμενο που θα είναι μέσα στο φασματικό παράθυρο του δέκτη του ραντάρ ώστε μαζί με το ωφέλιμο σήμα προς το ραντάρ από την ηχώ, να βρεθεί μαζί στην είσοδο του δέκτη το σήμα παρεμβολής. Πολλές φορές επειδή το ραντάρ μεταβάλλει στον άξονα του χρόνου την φέρουσα συχνότητα εκπομπής του μέσα σε ένα φασματικό παράθυρο εύρους  $\Delta F_R$ , ο παρεμβολέας επίσης με κατάλληλη διαμόρφωση FM ή ακόμα και AM διασπύρει το φάσμα του σε ένα εύρος  $\Delta F_J$ . Λαμβάνοντας υπόψη το σχήμα 3.1 μπορούμε να γράψουμε την εξής σχέση για τον λόγο ισχύος του ωφέλιμου σήματος του ραντάρ ( $P_R$ ) προς την ισχύ παρεμβολής στην είσοδο του δέκτη ραντάρ ( $P_J$ ).

$$\frac{P_R}{P_J} = \frac{\frac{P_R * G_R * \sigma * \lambda^2}{4\pi R_{RT}^2 * 4\pi R_{RT}^2} * G_R}{\frac{P_J * G_J * \lambda^2}{4\pi R_{RJ}^2} * G_R} * \frac{\Delta F_R}{\Delta F_J} * \eta \quad (1)$$

Όπου,

- $P_R$  = ισχύς στην είσοδο του δέκτη ραντάρ από την ηχώ του στόχου (w)
- $P_J$  = ισχύς του σήματος παρεμβολής (w)
- $P_R$  = ισχύς εκπομπής του ραντάρ (w)
- $G_R$  = απολαβή της κεραίας του ραντάρ
- $\sigma$  = ενεργός επιφάνεια του στόχου ( $m^2$ )
- $R_{RT}$  = απόσταση ραντάρ-στόχου (m)
- $\lambda$  = μήκος κύματος της ακτινοβολίας
- $\eta$  = κέρδος επεξεργασίας στον δέκτη του ραντάρ με επεξεργασία σήματος
- $\frac{\Delta F_R}{\Delta F_J}$  = λόγος φασματικών ευρών
- $P_J$  = ισχύς εκπομπής του παρεμβολέα (w)
- $G_J$  = απολαβή κεραίας παρεμβολέα
- $R_{RJ}$  = απόσταση παρεμβολέα-ραντάρ (m)



➤ Για να έχουμε ικανοποιητική παρεμβολή θα πρέπει ο λόγος  $P_R/P_J < 0.1$ , δηλαδή

$$P_R/P_J > 10.$$

Στην παραπάνω εξίσωση θέτοντας  $\sigma = 1 \text{ m}^2$  (συνηθισμένη ενεργός επιφάνεια ενός μικρού στόχου),  $n=1000$  (για τα σύγχρονα ραντάρ), η εξίσωση μας δίνει την σχέση

$$0.1 \leq \frac{P_R * G_R}{P_J * G_J} * \frac{10^3}{4\pi} * \frac{R_{RJ}^2}{R_{RT}^4} * \frac{\Delta F_R}{\Delta F_J}$$

Αν υποθέσουμε  $P_R = 1 \text{ w}$ ,  $G_R = 10^3$ ,  $P_J = 10 \text{ mw} = 10^{-2} \text{ w}$ ,  $G_J = 10^2$ ,  $\Delta F_R/\Delta F_J = 0.1$  (ο

παρεμβολέας αναγκάζεται να διασπύρει 10 φορές το φάσμα του προς το στιγμιαίο εύρος ζώνης του ραντάρ  $\Delta F_R$ ) τότε έχουμε

$$0.1 \geq \frac{10^6 R_{RJ}^2}{4\pi R_{RT}^4} * 10^{-1}$$

βρίσκουμε :

$$\frac{R_{RJ}^2}{R_{RT}^4} \leq \frac{4\pi}{10^6} \rightarrow R_{RJ} \leq R_{RT}^2 \sqrt{\frac{4\pi}{10^6}}$$

Έχοντας:

$$R_{RJ} \leq R_{RT}^2 * 1.1 * 10^3$$

υπολογίζουμε τον παρακάτω πίνακα.

$R_{RT}(\text{m})$	$R_{RJ}(\text{m})$
1000	1.100
3000	9.900
10000	110.000

Διαπιστώνουμε ότι αν η απόσταση  $R_{RT} = 1 \text{ km}$  τότε ο παρεμβολέας πρέπει να βρίσκεται σε ίδια απόσταση με τον στόχο, εάν  $R_{RT} = 3 \text{ km}$  τότε ο παρεμβολέας μπορεί να είναι μακριά μέχρι και 10 km ενώ για  $R_{RT} = 10 \text{ km}$  ο παρεμβολέας μπορεί να είναι μακριά μέχρι και 110 km.

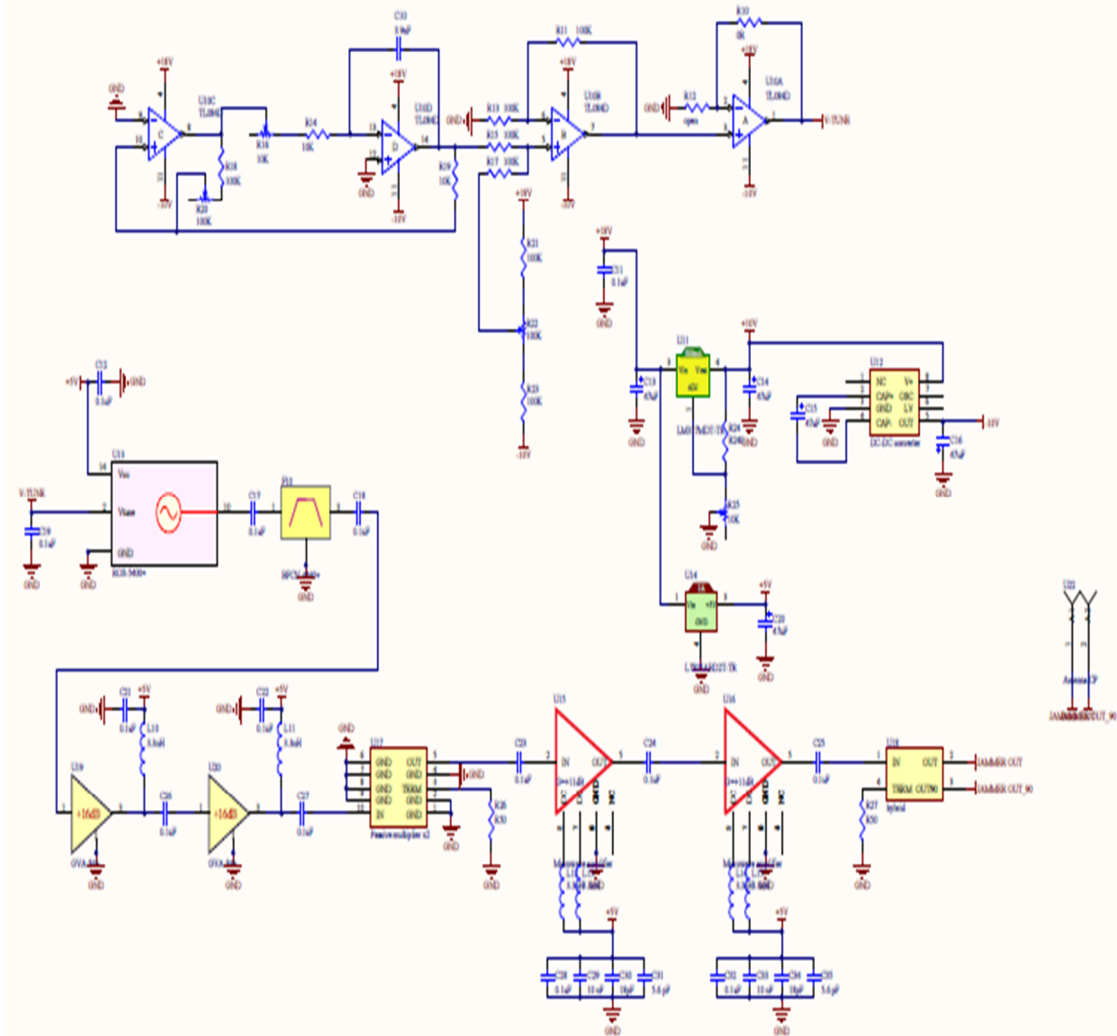
Με βάση τα παραπάνω διαπιστώνει κανείς εύκολα το πλεονέκτημα του παρεμβολέα έναντι του ραντάρ λόγω της σχέσης (1) και επειδή το ραντάρ είναι υποχρεωμένο να χρησιμοποιεί το σήμα της ηχούς που πρέπει να ταξιδέψει δύο φορές έναντι του παρεμβολέα που διανύει μια φορά την απόσταση. Στην περίπτωση μας επειδή ο παρεμβολέας μικρής ισχύος μπορεί να προσεγγίζει τον στόχο, βρισκόμενος πάνω στο μη επανδρωμένο αεροσκάφος (UAV), φαίνεται εύκολα η μεγάλη αποτελεσματικότητά του.

### 3.5 Κατασκευή παρεμβολέα ραντάρ

Παρακάτω σας παραθέτουμε τον παρεμβολέα ραντάρ που κατασκευάστηκε ο οποίος δύναται να τοποθετηθεί σε μη επανδρωμένο αεροσκάφος (UAV) καθώς επίσης και το ηλεκτρονικό διάγραμμα του. Ο σκοπός της κατασκευής του είναι η δημιουργία παρεμβολών σε ραντάρ κατά την χρήση του σε ένα επιχειρησιακό περιβάλλον έχοντας σαν τελικό αποτέλεσμα τον <<αποπροσανατολισμό>> αυτών από τους πιθανούς στόχους.

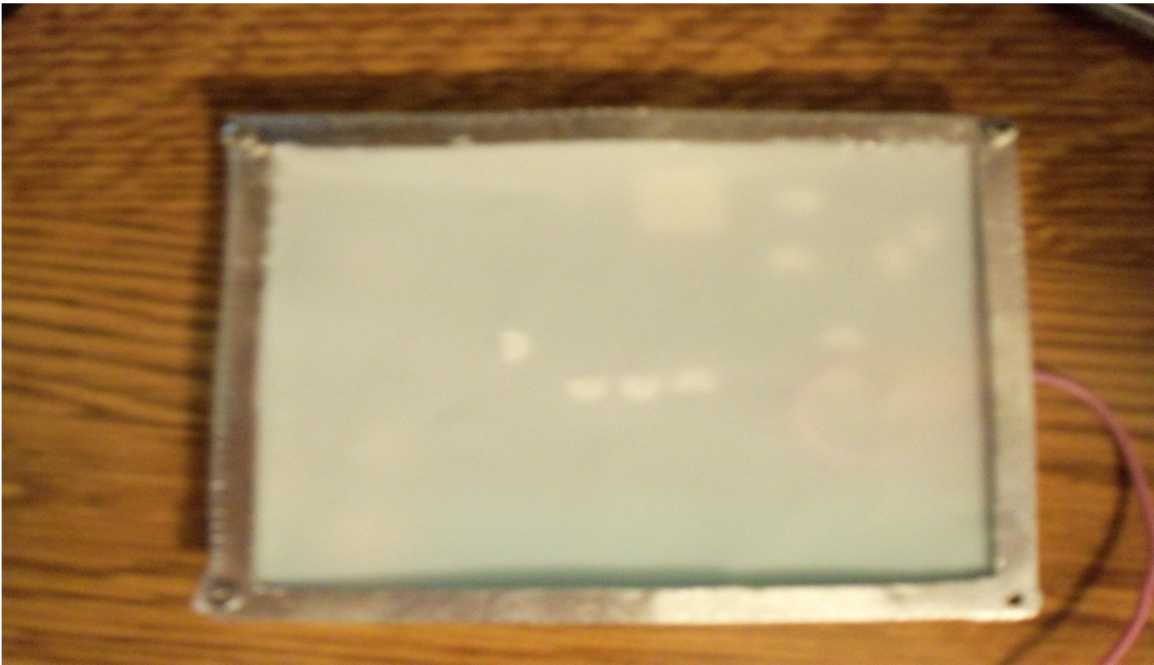


Σχήμα 3.2 Παρεμβολέας Ραντάρ



Σχήμα 3.3 Ηλεκτρονικό κύκλωμα παρεμβολέα ραντάρ

Στο επόμενο σχήμα βλέπουμε το ειδικό μεταλλικό προστατευτικό κουτί που κατασκευάστηκε για την τοποθέτηση του παρεμβολέα. Στην πάνω πλευρά του μεταλλικού κουτιού έχει τοποθετηθεί λεπτό φύλλο από τεφλόν έτσι ώστε να επιτρέπει την διέλευση των συχνοτήτων.



Σχήμα 3.4 Ειδικό προστατευτικό κουτί παρεμβολέα



Τέλος στα παρακάτω σχήματα φαίνεται ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος τύπου Cessna 177 Thunder Tiger στο οποίο δύναται να τοποθετηθεί ο παρεμβολέας που κατασκευάστηκε.



Σχήμα 3.5 Μη επανδρωμένο αεροσκάφος στο οποίο δύναται να τοποθετηθεί ο παρεμβολέας

## Βιβλιογραφία

1. <http://www.ekke.gr/estia/Cooper/Radar.html>
2. <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A1%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%AC%CF%81>
3. <http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse/stef/hlk/2001/TouroutoglouGiorgos/attached-document/2001touroutogloy.pdf>
4. <http://gun.teipir.gr/DSAE LAB/Ergastiriakes/radartheory.pdf>
5. [http://anamorfosi.teiser.gr/ekp\\_yliko/e-notes/Data/radio/main.htm](http://anamorfosi.teiser.gr/ekp_yliko/e-notes/Data/radio/main.htm)
6. Σημειώσεις καθηγητή κ.Ουζούνογλου Νικόλαου
7. <http://www.radartutorial.eu/02.basics/rp06.en.html>
8. [http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/5148/3/Nimertis\\_Papadopoulos%28Phys%29.PDF](http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/5148/3/Nimertis_Papadopoulos%28Phys%29.PDF)
9. <http://www.ceid.upatras.gr/faculty/alex>
10. [http://www.rohde-schwarz.de/file\\_18640/1MA207\\_0e.pdf](http://www.rohde-schwarz.de/file_18640/1MA207_0e.pdf)  
[iou/ahts/notes/kef02.pdf](http://www.rohde-schwarz.de/file_18640/1MA207_0e.pdf)
11. [ab.BDK\\_YxthP\\_Y&pbx=1&bav=on.2,or.r\\_qf.&bvm=bv.47008514,d.bGE&fp=4e946baf8212dc84&biw=1429&bih=747](http://www.rohde-schwarz.de/file_18640/1MA207_0e.pdf)
12. [http://en.wikipedia.org/wiki/Low\\_probability\\_of\\_intercept\\_radar](http://en.wikipedia.org/wiki/Low_probability_of_intercept_radar)
13. [http://www.interception.gr/app/webroot/contentupload/224articles\\_pdfs\\_2interception.pdf](http://www.interception.gr/app/webroot/contentupload/224articles_pdfs_2interception.pdf)
14. <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA340188>
15. [http://www.ales.sk/wm/products\\_fls/C3I%20systems%20-%20ASTRA%20-%20SHORAD%20System%20Upgrade%20of%20SA-13%20GOPHER.pdf](http://www.ales.sk/wm/products_fls/C3I%20systems%20-%20ASTRA%20-%20SHORAD%20System%20Upgrade%20of%20SA-13%20GOPHER.pdf)
16. <http://www.radartutorial.eu/19.kartei/karte403.en.html>
17. [http://en.wikipedia.org/wiki/Radar\\_jamming\\_and\\_deception](http://en.wikipedia.org/wiki/Radar_jamming_and_deception)
18. [https://en.wikipedia.org/wiki/Chaff\\_%28countermeasure%29](https://en.wikipedia.org/wiki/Chaff_%28countermeasure%29)
19. <http://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?t=1485673>
20. Συστήματα ραντάρ (σημειώσεις) Ν.Κ. Ουζούνογλου Καθηγητής ΕΜΠ