



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
Π.Μ.Σ. «ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ»

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΡΑΝΤΑΡ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΝΑΕΡΙΑΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Ν. Πανέλλη

Επιβλέποντες : Γεώργιος Τσούλος
Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου Πελοποννήσου

Τρίπολη, Ιούλιος 2012

Copyright © Μαρία Ν. Πανέλλη, 2012
Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Προηγμένα Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα και Δίκτυα» της σχολής Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου του τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας Τηλεπικοινωνιών. Η εργασία αφορά στη μελέτη της λειτουργίας ενός δευτερεύοντος ραντάρ επιτήρησης που χρησιμοποιείται στον έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας. Βασικός άξονας ανεύρεσης πηγών για το θέμα υπήρξε η βιβλιογραφική αναζήτηση συγγραμμάτων, καθώς επίσης και η διερεύνηση πηγών από το διαδίκτυο. Επιπλέον, σημαντικές πληροφορίες αντλήθηκαν από εκδόσεις του Διεθνή Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO) σχετικές με το δευτερεύον ραντάρ.

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γεώργιο Τσούλο για την πολύτιμη βοήθειά του και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με τα ραντάρ ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας. Ιδιαίτερα, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην κα. Δήμητρα Ζαρμπούτη για την αμέριστη συμπαράσταση και καθοδήγησή της κατά τη διεξαγωγή της παρούσας εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Κατερίνα Αθανασίου για τις πολύ χρήσιμες συμβουλές της και τον χρόνο που μου αφιέρωσε κατά τη διεκπεραίωση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου για την υποστήριξή της κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και τη συμπαράσταση σε κάθε βήμα της ζωής μου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΡΑΝΤΑΡ	
1. 1 ΓΕΝΙΚΑ.....	11
1. 2 Η ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΟΥ RADAR.....	13
1. 3 ΘΟΡΥΒΟΣ.....	16
1. 4 ΔΟΜΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΑΝΤΑΡ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ.....	17
1. 5 ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΡΑΝΤΑΡ.....	19
1. 6 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΡΑΝΤΑΡ.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΕΠΙΤΗΡΗΣΗ	
2. 1 ΕΠΙΤΗΡΗΣΗ.....	23
2. 1. 1 ΕΥΡΟΣ ΔΕΣΜΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ.....	23
2. 1. 2 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΠΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΑΛΜΩΝ (PRF).....	24
2. 1. 3 ΔΙΑΤΟΜΗ ΡΑΝΤΑΡ (RCS).....	25
2. 1. 4 ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΡΟΦΕΣ (CLUTTER).....	27
2. 2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΝΑΕΡΙΑΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ.....	28
2. 2. 1 ΡΑΝΤΑΡ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗΣ.....	29
2. 2. 2 ΡΑΝΤΑΡ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΩΝ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ.....	31
2. 2. 3 ΡΑΝΤΑΡ ΚΙΝΗΣΕΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟΥ.....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝ ΡΑΝΤΑΡ	
3. 1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	33
3. 2 ΔΟΜΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ SSR.....	34
3. 3 ΔΟΜΗ ΕΡΩΤΗΣΗΣ.....	36
3. 4 ΔΟΜΗ ΑΠΑΝΤΗΣΗΣ.....	39
3. 4. 1 ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΤΑΥΤΟΤΗΤΑΣ.....	41
3. 4. 2 ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΥΨΟΥΣ.....	42
3. 5 INTERROGATOR.....	42
3. 6 TRANSPONDER.....	43
3. 7 PLOT EXTRACTOR.....	43
3. 8 ΚΕΡΑΙΕΣ SSR.....	44
3. 8. 1 ΚΕΡΑΙΑ INTERROGATOR.....	45

3. 8. 2 ΚΕΡΑΙΑ TRANSPONDER.....	46
3. 9 ΕΞΙΣΩΣΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ SSR.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ SSR	
4. 1 ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΛΟΒΩΝ.....	50
4. 2 ΑΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ (FRUIT).....	52
4. 3 GARBLING.....	54
4. 4 ΑΝΑΚΛΑΣΕΙΣ.....	55
4. 4. 1 ΑΝΑΚΛΑΣΕΙΣ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	55
4. 4. 2 MULTIPATH.....	56
4. 5 ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΧΡΟΝΟΥ.....	57
4. 6 CAPTURE.....	58
4. 7 ΣΚΙΑΣΗ ΚΕΡΑΙΑΣ.....	58
4. 8 ΥΠΕΡΦΟΡΤΩΣΗ TRANSPONDER.....	59
4. 9 ΑΛΛΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ.....	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ / ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ SSR	
5. 1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ.....	61
5. 2 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ.....	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΜΟΝΟΠΑΛΜΙΚΟ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝ ΡΑΝΤΑΡ	
6. 1 ΣΚΟΠΟΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ.....	64
6. 2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	64
6. 3 PLOT EXTRACTOR.....	66
6. 4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ MSSR.....	67
6. 5 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ MSSR.....	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – MODE S	
7. 1 ΣΚΟΠΟΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ.....	70
7. 2 ΔΟΜΗ ΕΡΩΤΗΣΗΣ MODE S.....	71
7. 2. 1 ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ INTERMODE.....	72
7. 2. 2 ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ MODE S.....	73
7. 3 ΔΟΜΗ ΑΠΑΝΤΗΣΗΣ MODE S.....	73
7. 4 ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ΙΣΟΤΙΜΙΑΣ.....	75
7. 5 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ.....	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	
8. 1 ΣΚΟΠΟΣ.....	77

8. 2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	78
8. 3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	79
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	84
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	85
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	86
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	91

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ

<i>Διάγραμμα 1.1 Κατηγορίες Ραντάρ.....</i>	<i>22</i>
<i>Διάγραμμα 2.1 Κατηγορίες Ραντάρ ATC.....</i>	<i>29</i>
<i>Διάγραμμα 8.1 Πιθανότητα εντοπισμού P_d ως συνάρτηση του SNR και της πιθανότητας εσφαλμένου συναγερμού P_{fa}.....</i>	<i>79</i>
<i>Διάγραμμα 8.2 Προσομοίωση S-band, ραδιοδιατομή.....</i>	<i>80</i>
<i>Διάγραμμα 8.3 Προσομοίωση L-band, ραδιοδιατομή.....</i>	<i>81</i>
<i>Διάγραμμα 8.4 Προσομοίωση S-band, κέρδος.....</i>	<i>82</i>
<i>Διάγραμμα 8.5 Προσομοίωση L-band, κέρδος.....</i>	<i>83</i>
<i>Πίνακας 1.1 Ζώνες Συχνότητων</i>	<i>20</i>
<i>Πίνακας 2.1 Τιμές Ραδιοδιατομής.....</i>	<i>27</i>
<i>Πίνακας 2.2 Σύγκριση τιμών En Route και Terminal Ραντάρ.....</i>	<i>30</i>
<i>Πίνακας 2.3 Βασικά Χαρακτηριστικά Ραντάρ ATC.....</i>	<i>33</i>
<i>Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά των Παλμών Ερώτησης.....</i>	<i>37</i>
<i>Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά των Παλμών Ερώτησης.....</i>	<i>40</i>
<i>Πίνακας 3.3 Παράδειγμα Κωδικών Mode A.....</i>	<i>42</i>
<i>Πίνακας 3.4 Ενδεικτικές Τιμές Χαρακτηριστικών Interrogator.....</i>	<i>42</i>
<i>Πίνακας 3.5 Τυπικές Τιμές Χαρακτηριστικών Transponder.....</i>	<i>43</i>
<i>Πίνακας 6.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά MSSR.....</i>	<i>69</i>
<i>Πίνακας 8.1 Παράμετροι προσομοίωσης.....</i>	<i>78</i>
<i>Πίνακας 8.2 Τιμές Ισχύος για S-band PSR, ραδιοδιατομή.....</i>	<i>80</i>
<i>Πίνακας 8.3 Τιμές Ισχύος για L-band MSSR, ραδιοδιατομή.....</i>	<i>81</i>
<i>Πίνακας 8.4 Τιμές Ισχύος για S-band PSR, κέρδος.....</i>	<i>82</i>
<i>Πίνακας 8.5 Τιμές Ισχύος για L-band MSSR, κέρδος.....</i>	<i>83</i>

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της λειτουργίας ενός συστήματος ραντάρ ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας και συγκεκριμένα του δευτερεύοντος ραντάρ επιτήρησης (SSR). Το δευτερεύον ραντάρ, εκτός από τον υπολογισμό της απόστασης ενός αεροσκάφους, παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την ταυτότητα του αεροσκάφους και για το ύψος στο οποίο πετάει. Εξασφαλίζει επιτήρηση σε μεγάλες αποστάσεις, έχει μειωμένη ισχύ εκπομπής, προσφέρει μεγάλη ακρίβεια στην ανίχνευση και αναγνώριση των στόχων, ενώ ταυτόχρονα καταφέρνει να μειώσει σε μεγάλο βαθμό τις παρεμβολές κάθε είδους.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στις θεμελιώδεις αρχές λειτουργίας των ραντάρ, όπου αναφέρονται βασικές έννοιες όπως η εξίσωση ραντάρ, η επίδραση του θορύβου στον υπολογισμό της απόστασης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο εξετάζονται οι επιμέρους παράμετροι ενός συστήματος επιτήρησης που λαμβάνονται υπ' όψιν κατά το σχεδιασμό του, όπως είναι το εύρος δέσμης της κεραίας στο σταθμό εδάφους, η συχνότητα επανάληψης παλμών και η ραδιοδιατομή των στόχων, καθώς επίσης και οι παρασιτικές επιστροφές που επηρεάζουν αρνητικά τη λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στα είδη ραντάρ που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο της εναέριας κυκλοφορίας και τα βασικά τους τεχνικά χαρακτηριστικά.

Στο τρίτο κεφάλαιο μελετάται η λειτουργία ενός δευτερεύοντος συστήματος ραντάρ. Γίνεται αναλυτική περιγραφή του τρόπου επικοινωνίας του σταθμού εδάφους με τον πομποδέκτη ενός αεροσκάφους και της δομής των σημάτων που ανταλλάσσουν μεταξύ τους. Επίσης, μελετώνται οι βασικές οντότητες ενός τέτοιου συστήματος, αλλά και η λειτουργία των κεραιών που χρησιμοποιούνται στο σταθμό εδάφους και στα αεροσκάφη.

Στο κεφάλαιο 4 εξετάζονται όλοι οι πιθανοί περιορισμοί που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την αποτελεσματική λειτουργία ενός δευτερεύοντος ραντάρ, αλλά και τρόποι αντιμετώπισής τους. Στη συνέχεια, στο πέμπτο

κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα ενός τέτοιου ραντάρ.

Στα κεφάλαια 6 και 7 μελετώνται τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για τη βελτίωση της λειτουργίας του δευτερεύοντος ραντάρ επιτήρησης, οι οποίες παρέχουν αξιόπιστα αποτελέσματα με επιτυχή αντιμετώπιση των παρεμβολών και μεταφορά περισσότερων δεδομένων και πληροφοριών στην επικοινωνία σταθμού εδάφους και αεροσκαφών.

Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο συγκρίνονται οι απαιτήσεις ενός συστήματος ραντάρ που λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων L με αυτές ενός ραντάρ που λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων S.

ABSTRACT

The aim of this thesis was the study of an air traffic control radar system and specifically of the secondary surveillance radar (SSR). The secondary radar calculates the distance of an aircraft and obtains important information concerning the identity of the aircraft and the height of its flight. It provides supervision over long distances with reduced transmission power, it offers great accuracy in targets detection and identification, while simultaneously reduces any kind of the interference.

The first chapter is an introduction to the fundamental principles of radar operation, which includes concepts such as the radar equation and the effect of noise in the calculation of distance.

The second chapter discusses the various aspects of a surveillance system that are taken into consideration during its design. Design parameters such as the beamwidth of the antenna on the ground station, the pulse repetition frequency and the radar cross section of the targets, as well as the parasitic returns known as clutter adversely affecting the operation of such a system are described. Later in this chapter, the radar types used in air traffic control along with their basic characteristics are presented.

The third chapter describes the operation of a secondary radar system. There is a detailed description of how the ground station and the transponder of an aircraft communicate and of the structure of the signals exchanged between them. The basic entities of such a system along with the ground station and aircraft antennas are also studied.

The fourth chapter examines all possible limitations that could affect the efficient operation of a secondary radar, and ways to overcome them. Following, in the fifth chapter the advantages and disadvantages of such a radar system are presented.

In chapters 6 and 7, the techniques that have been developed to improve the operation of the secondary surveillance radar are studied. These techniques provide far more reliable results, they overcome interference and carry more

data and information via the communication path between the ground station and an aircraft.

Finally, the eighth chapter compares, via simulation, the power requirements of a radar system operating in the L band to a radar operating in the S band.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΡΑΝΤΑΡ

1. 1 ΓΕΝΙΚΑ

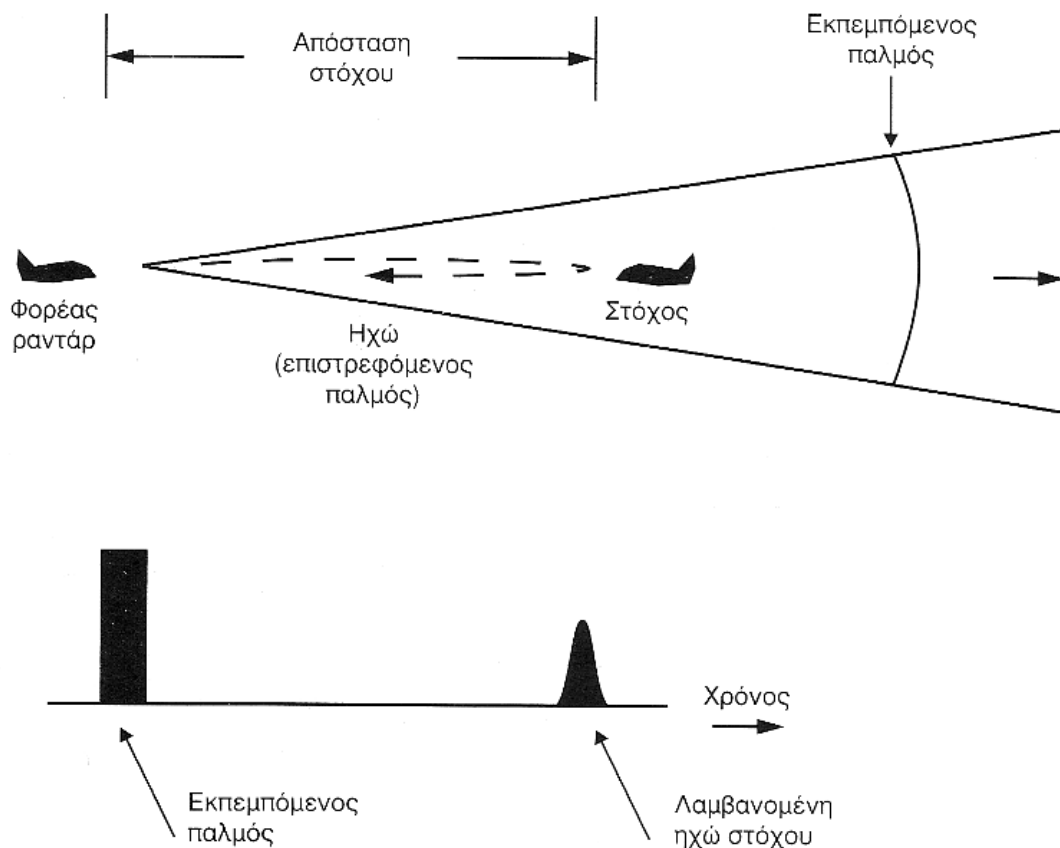
Η ονομασία RADAR προέρχεται από τη σύντμηση των λέξεων RAdio Detection And Ranging και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1940 από το πολεμικό ναυτικό των ΗΠΑ. Το RADAR αποτελεί βασικό ηλεκτρονικό σύστημα ηλεκτρομαγνητικού εντοπισμού και παρακολούθησης κινητών και ακίνητων στόχων, σε αποστάσεις και συνθήκες φωτισμού απαγορευτικές για τον απλό εντοπισμό με το ανθρώπινο μάτι. Η μεγάλη αξία του οφείλεται στις σημαντικές δυνατότητες ανίχνευσης και παρακολούθησης στόχων σε μεγάλες αποστάσεις και με μεγάλη ακρίβεια. Χρησιμοποιεί τα ραδιοκύματα για να καθορίσει το εύρος, το υψόμετρο, την κατεύθυνση και την ταχύτητα των αντικειμένων.

Ένα σύστημα RADAR έχει ένα πομπό που εκπέμπει τα ραδιοκύματα σε προκαθορισμένη κατεύθυνση. Όταν αυτά έρχονται σε επαφή με ένα αντικείμενο, ανακλώνται ή διασκορπίζονται σε πολλές κατευθύνσεις. Τα ανακλώμενα σήματα είναι αυτά που επιστρέφουν πίσω στο RADAR και είναι σημαντικά για την ανίχνευση και την παρακολούθηση ενός στόχου. Ο δέκτης συλλέγει την επιστρεφόμενη ενέργεια και από την επεξεργασία της προκύπτουν πληροφορίες ύπαρξης αντικειμένου, της θέσης του και της σχετικής του ταχύτητας. Ο εντοπισμός γίνεται καθορίζοντας τη θέση του αντικειμένου στο χώρο, δηλαδή τη γωνία αζιμουθίου σε σχέση με τον μαγνητικό Βορρά, και την απόσταση και το ύψος του σε σχέση με τη θέση του RADAR.

Η πιο κοινή κυματομορφή radar είναι μια αλληλουχία από στενούς, ορθογώνιους παλμούς που διαμορφώνουν ένα ημιτονοειδές κύμα. Η βασική μέθοδος μέτρησης της απόστασης είναι αυτής της χρονικής καθυστέρησης επιστροφής (ηχούς) του εκπεμπόμενου παλμού. Η απόσταση από το στόχο καθορίζεται από τον υπολογισμό του χρόνου t_R (round-trip time) που απαιτείται από τον παλμό να ταξιδέψει προς το στόχο και από εκεί πίσω στη θέση του

radar. Αν c είναι η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στον αέρα, τότε η απόσταση R του στόχου από το ραντάρ είναι

$$R = \frac{ct_R}{2}$$

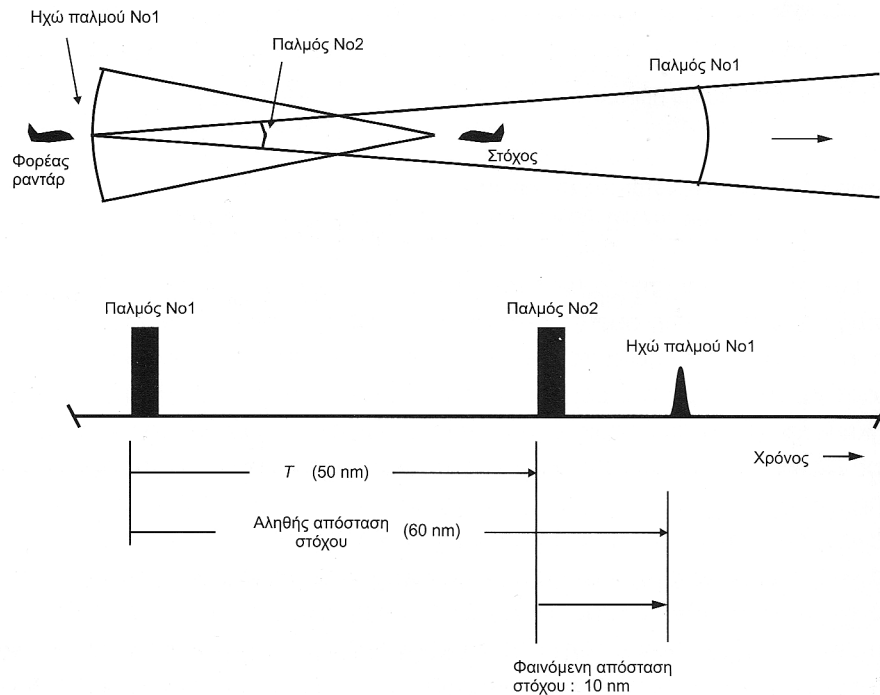


Εικόνα 1.1 Υπολογισμός Απόστασης Στόχου [1]

Ο συντελεστής 2 εμφανίζεται στον παρονομαστή λόγω της αμφίδρομης διάδοσης.

Αφού ο μεταδιδόμενος παλμός εκπεμφθεί, πρέπει να παρέλθει ένα επαρκές χρονικό διάστημα, ώστε να επιτραπεί σε τυχόν σήματα ηχούς να επιστρέψουν και να ανιχνευθούν, πριν από την εκπομπή του επόμενου παλμού. Συνεπώς, ο ρυθμός με τον οποίο μεταδίδονται οι παλμοί καθορίζεται από το μέγιστο χρονικό εύρος στο οποίο αναμένονται στόχοι. Αν η συχνότητα επανάληψης παλμών (PRF) είναι πολύ υψηλή, τα ανακλώμενα σήματα από

κάποιους στόχους μπορεί να φτάσουν μετά την εκπομπή του επόμενου παλμού, κι έτσι μπορεί να προκύψουν ασάφειες κατά τον υπολογισμό της απόστασης.



Εικόνα 1.2 Ασάφεια Απόστασης [1]

Επιπλέον, αν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ στόχου και radar, η μετατόπιση της συχνότητας του φορέα του ανακλώμενου κύματος (φαινόμενο Doppler) αποτελεί μέτρο της σχετικής (ακτινικής) ταχύτητας του στόχου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διακρίνει κινούμενους στόχους από στατικά αντικείμενα.

1. 2 Η ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΟΥ RADAR

Η εξίσωση ραντάρ συνδέει την απόσταση με τα χαρακτηριστικά του πομπού, του δέκτη, της κεραίας, του στόχου και του περιβάλλοντος. Είναι χρήσιμη όχι μόνο ως μέσο για τον καθορισμό της μέγιστης απόστασης από το

ραντάρ στο στόχο, αλλά μπορεί να χρησιμεύσει τόσο ως εργαλείο για την κατανόηση της λειτουργίας των ραντάρ όσο και ως βάση για το σχεδιασμό ραντάρ.

Έστω μια κεραία ραντάρ, η οποία εκπέμπει σήμα ισχύος κορυφής P_t (peak power), προς την κατεύθυνση ενός στόχου που απέχει απόσταση R και έχει ραδιοδιατομή (RCS) σ [1].

Αν θεωρήσουμε ότι η κεραία είναι ισοτροπική, τότε η συνολικά εκπεμπόμενη ισχύς κορυφής P_t κατανέμεται ομοιόμορφα πάνω στην επιφάνεια σφαίρας ακτίνας R . Δεδομένου ότι η επιφάνεια της σφαίρας ισούται με $4\pi R^2$, η εκπεμπόμενη επιφανειακή πυκνότητα ισχύος PD (W/m^2) στη θέση του στόχου ισούται με

$$PD = \frac{P_t}{4\pi R^2}$$

που στην περίπτωση κατευθυντικής κεραίας εκπομπής κέρδους G , η επιφανειακή πυκνότητα ισχύος PD του σήματος που φτάνει στη θέση του στόχου είναι

$$PD = \frac{P_t}{4\pi R^2} G$$

Ο στόχος συλλέγει ένα μέρος της ισχύος και την ακτινοβολεί εκ νέου προς διάφορες κατευθύνσεις [2]. Το μέτρο του ποσού της ισχύος που συνελήφθη από το στόχο και ακτινοβολήθηκε πίσω προς την κατεύθυνση του ραντάρ ονομάζεται ραδιοδιατομή ραντάρ σ και ορίζεται από τη σχέση

$$PD = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2}$$

Η ραδιοδιατομή είναι ένα χαρακτηριστικό του στόχου και είναι ένα μέτρο του μεγέθους του όπως αυτό φαίνεται από το ραντάρ. Η κεραία του ραντάρ καταγράφει ένα μέρος της ισχύος της ηχούς. Αν η ενεργή επιφάνεια της κεραίας λήψης συμβολίζεται ως A_e (m^2), τότε το λαμβανόμενο ποσό ισχύος P_r (Watts) του σήματος που εμφανίζεται στην κεραία λήψης του ραντάρ είναι

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

Αντικαθιστώντας την ενεργή επιφάνεια A_e , λόγω της κοινής κεραίας για εκπομπή και λήψη, με τη σχέση

$$A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi}$$

η οποία συνδέει την ενεργή επιφάνεια με το κέρδος της κεραίας και το μήκος κύματος εκπομπής, τότε έχουμε

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

Επιλύοντας την προηγούμενη σχέση ως προς την απόσταση R του στόχου, θα έχουμε

$$R = \left[\frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 P_r} \right]^{\frac{1}{4}}$$

Η μέγιστη απόσταση εντοπισμού R_{\max} είναι η απόσταση πέρα από την οποία ο στόχος δεν μπορεί να εντοπιστεί. Προκύπτει όταν στην τελευταία σχέση το επιστρεφόμενο σήμα P_r λάβει την ελάχιστη τιμή που μπορεί να ανιχνεύσει ο δέκτης του ραντάρ $P_{r,\min}$.

$$R = \left[\frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 P_{r,\min}} \right]^{\frac{1}{4}}$$

Αυτή είναι η θεμελιώδης μορφή της εξίσωσης της εμβέλειας του ραντάρ.

1.3 ΘΟΡΥΒΟΣ

Γενικά, ως θόρυβος μπορεί να θεωρηθεί κάθε είδους ανεπιθύμητη ηλεκτρομαγνητική ενέργεια/παρεμβολή, η οποία μειώνει την απόδοση ενός ηλεκτρονικού συστήματος. Για το ραντάρ, ο θόρυβος μπορεί να προέρχεται είτε από το εξωτερικό περιβάλλον είτε από το ίδιο το σύστημα λήψης. Και στις δύο περιπτώσεις το αποτέλεσμα είναι ότι μειώνεται η ικανότητα του ραντάρ να ανιχνεύσει ασθενή σήματα, δηλαδή μειώνεται η ευαισθησία λήψης [1]. Ακόμα και σε ιδανικές συνθήκες, οι τυχαίες κινήσεις των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας στα ωμικά τμήματα εισόδου ενός δέκτη προκαλούν το λεγόμενο θερμικό θόρυβο, ο οποίος δίνεται από τη σχέση

$$N = kTB$$

όπου N είναι η μέση ισχύς του θερμικού θορύβου που παράγεται στο δέκτη (Watts),

k η σταθερά Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K),

T η θερμοκρασία των ωμικών τμημάτων του δέκτη ($T = 290$ K)

B το εύρος συχνοτήτων της μπάντας λήψης του δέκτη (Hz)

Σε ένα πραγματικό σύστημα λήψης, η συνολική ισχύς του θορύβου που παράγεται είναι μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί απλά και μόνο στον εσωτερικό θερμικό θόρυβο του δέκτη, όπως αυτός παρέχεται από την προηγούμενη σχέση. Η συνολική τιμή ισχύος θορύβου N_o στην έξοδο ενός πραγματικού δέκτη μπορεί να εκφραστεί ως το γινόμενο της ισχύος θορύβου στην έξοδο ενός ιδανικού δέκτη ίδιου κέρδους G που θεωρητικά δεν εισάγει καθόλου θόρυβο, επί κάποιο συντελεστή F_n ο οποίος ονομάζεται συντελεστής θορύβου του συστήματος και ορίζεται ως

$$F_n = \frac{N_o}{NG} = \frac{N_o}{kTBG}$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί και ως

$$F_n = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o}$$

και επομένως, το λαμβανόμενο σήμα εισόδου θα είναι:

$$S_i = \frac{kTBF_n S_o}{N_o}$$

Αν η τιμή S_i εκπροσωπεί την ελάχιστη ανιχνεύσιμη τιμή σήματος εισόδου S_{min} , τότε θα έχουμε:

$$S_{min} = kTBF_n \left(\frac{S_o}{N_o}\right)_{min}$$

Θέτοντας την τιμή S_{min} στην εξίσωση της μέγιστης απόστασης εντοπισμού του ραντάρ, θα έχουμε την ακόλουθη μορφή:

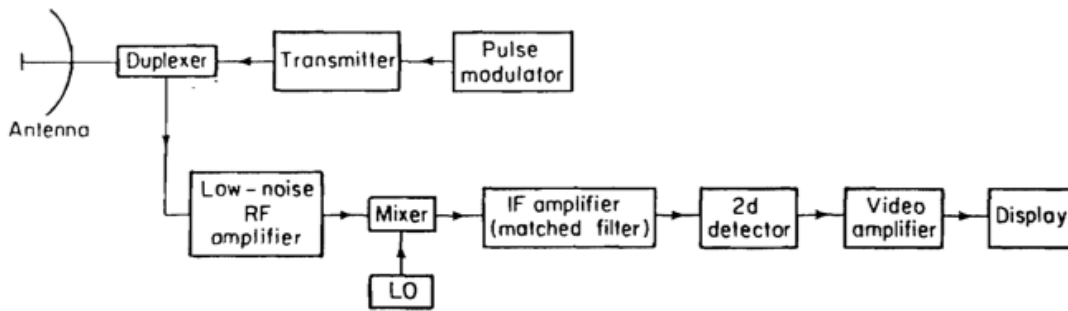
$$R = \left[\frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 kTBF_n L (S_o/N_o)_{min}} \right]^{\frac{1}{4}}$$

όπου L είναι ένας συντελεστής μεγαλύτερος της μονάδας που εκφράζει συνολικά τις απώλειες του σήματος στον πομποδέκτη.

1. 4 ΔΟΜΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΑΝΤΑΡ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

Το παλμικό ραντάρ αποτελεί την πιο βασική και διαδεδομένη μορφή συστήματος ραντάρ. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στον εντοπισμό και προσδιορισμό της θέσης των στόχων μέσω της εκπομπής και λήψης σειράς παλμών σχετικά μικρής διάρκειας.

Στην *Εικόνα 1.3* που ακολουθεί απεικονίζεται το βασικό δομικό διάγραμμα ενός τυπικού παλμικού ραντάρ.



Εικόνα 1.3 Δομικό Διάγραμμα Ραντάρ [2]

Ο πομπός (transmitter) μπορεί να είναι ένας ταλαντωτής ο οποίος πάλεται από τον διαμορφωτή (modulator) για να δημιουργήσει μια σειρά επαναλαμβανόμενων παλμών. Η κυματομορφή που παράγεται από τον πομπό ταξιδεύει μέσω μιας γραμμής μεταφοράς προς την κεραία από όπου εκπέμπεται στο χώρο. Συνήθως, χρησιμοποιείται μία κεραία για εκπομπή και λήψη. Ο δέκτης (receiver) πρέπει να προστατεύεται από βλάβες που μπορεί να προκαλέσει η υψηλή ισχύς του πομπού. Για το λόγο αυτό υπάρχει ο διπλέκτης (duplexer), ο οποίος λειτουργεί και ως διακόπτης που στέλνει το επιστρεφόμενο σήμα στο δέκτη και όχι στον πομπό.

Ο δέκτης είναι συνήθως υπερετεροδύνατος. Στο πρώτο στάδιο υπάρχει ένας RF ενισχυτής (amplifier) χαμηλού θορύβου που αυξάνει την ευαισθησία του δέκτη. Στη συνέχεια, ο μίκτης (mixer) και ο τοπικός ταλαντωτής μετατρέπουν το RF σήμα σε ενδιάμεση συχνότητα IF. Ένας τυπικός IF ενισχυτής για ένα ραντάρ επιτήρησης αέρος (air-surveillance radar) μπορεί να έχει κεντρική συχνότητα 30 ή 60 MHz και εύρος ζώνης της τάξης του ενός MHz.

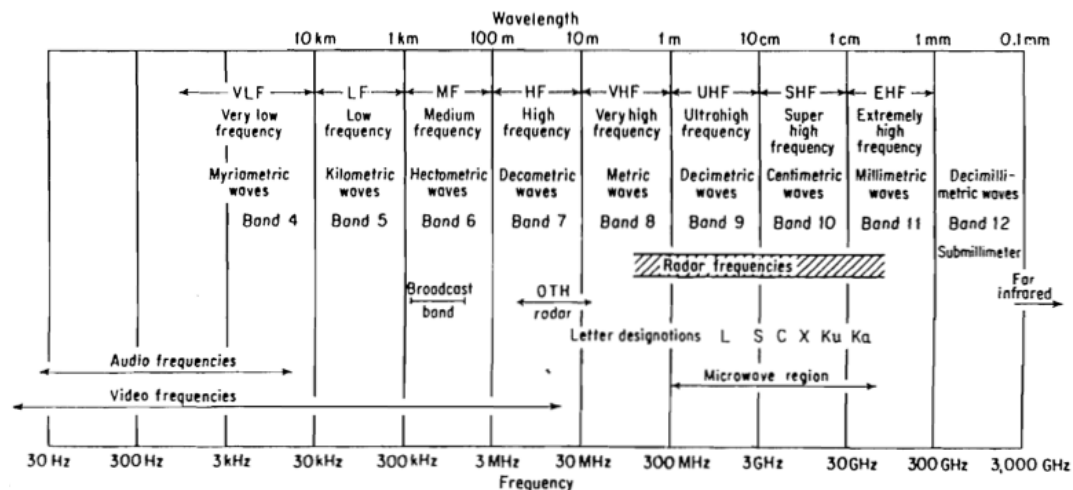
Αφού γίνει μεγιστοποίηση του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) από τον IF ενισχυτή, ο διαμορφωμένος παλμός εξάγεται από τον ανιχνευτή σήματος (detector) και ενισχύεται από τον ενισχυτή σήματος video σε ένα επίπεδο όπου μπορεί να εμφανίζεται κατάλληλα στην οθόνη.

Τέλος, μια μορφή κεραίας ραντάρ μπορεί να είναι ένας ανακλαστήρας με παραβολικό σχήμα ο οποίος τροφοδοτείται από μια πηγή στο σημείο εστίασής του. Το παραβολικό κάτοπτρο εστιάζει την ενέργεια σε μια στενή δέσμη, η οποία σαρώνει το χώρο με μηχανικό προσανατολισμό της κεραίας (περιστρεφόμενη κεραία).

1. 5 ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΡΑΝΤΑΡ

Τα συμβατικά ραντάρ γενικά λειτουργούν σε συχνότητες που εκτείνονται από τα 220 MHz μέχρι τα 35 GHz, αλλά αυτά δεν είναι απαραίτητα και τα όρια. Για παράδειγμα, τα ραντάρ over-the-horizon (OTH) λειτουργούν σε συχνότητες της τάξης των 4 ή 5 MHz, ενώ τα ραντάρ χιλιοστομετρικών κυμάτων (millimeter radars) λειτουργούν στα 94 GHz και τα laser ραντάρ σε ακόμα υψηλότερες συχνότητες.

Στην *Εικόνα 1.4* που ακολουθεί φαίνεται η θέση των συχνοτήτων στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.



Εικόνα 1.4 Συχνότητες Ραντάρ στο Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα [2]

Στον Πίνακα 1.1 παραθέτονται οι συχνότητες ραντάρ με την ονοματολογία που έχει εγκριθεί από την ΙΕΕΕ, οι οποίες σχετίζονται με τις συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων που έχουν ανατεθεί από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) για τα ραντάρ, καθώς και η χρήση τους.

Ονομασία Ζώνης	Εύρος Συχνοτήτων	Χρήση
HF	3-30 MHz	Παράκτια συστήματα ραντάρ, OTH radars, “high frequency”
VHF	30-300 MHz	Πολύ μεγάλου εύρους, “very high

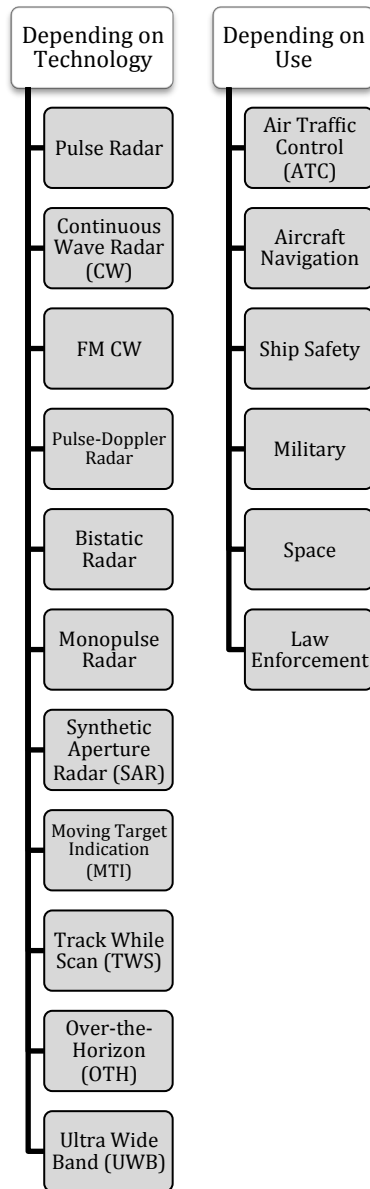
		frequency”
UHF	300-1000 MHz	Πολύ μεγάλου εύρους, “ultra high frequency”
L	1-2 GHz	Μεγάλης εμβέλειας, έλεγχος εναέριας κυκλοφορίας και επιτήρησης, en-route radar, “long”
S	2-4 GHz	Μέτριας εμβέλειας, τερματικό ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας, μεγάλης εμβέλειας ραντάρ καιρού, ραντάρ θαλάσσης, “short”
C	4-8 GHz	Μεγάλης εμβέλειας εντοπισμού, εναέρια ραντάρ καιρού, “compromise”
X	8-12 GHz	Μικρής εμβέλειας παρακολούθηση, καθοδήγηση πυραύλων, χαρτογράφηση, ραντάρ θαλάσσης, X γιατί κατά τον WW2 η συχνότητα ήταν μυστική
K_u	12-18 GHz	Υψηλής ανάλυσης, χαρτογράφηση, δορυφορική υψομετρία
K	18-27 GHz	Περιορισμένης χρήσης λόγω απορρόφησης από υδρατμούς, ανίχνευση νεφών από μετεωρολόγους και εντοπισμός οχημάτων μεγάλης ταχύτητας
K_a	27-40 GHz	Μικρής εμβέλειας, πολύ υψηλή ανάλυση χαρτιγράφησης, επιτήρηση αεροδρομίων
Mm	40-300 GHz	Πειραματική
UWB	1.6-10.5 GHz	Ραντάρ through-the-wall, συστήματα απεικόνισης

Πίνακας 1. 1 Ζώνες Συχνότητων

1. 6 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΡΑΝΤΑΡ

Τα ραντάρ χρησιμοποιούνται σε συστήματα στο έδαφος, επί των αεροσκαφών και των πλοίων, αλλά και σε εφαρμογές για το διάστημα. Τα επίγεια ραντάρ χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για την ανίχνευση, τον εντοπισμό και την παρακολούθηση αεροσκαφών και διαστημικών στόχων. Ραντάρ που βρίσκονται σε πλοία χρησιμοποιούνται ως βοηθήματα πλοήγησης και συστήματα ασφάλειας για τον εντοπισμό ακτογραμμών, άλλων πλοίων, καθώς και την παρατήρηση αεροσκαφών. Τα ραντάρ που βρίσκονται στα αεροσκάφη μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό άλλων αεροσκαφών, πλοίων, οχημάτων εδάφους, ακόμα και για χαρτογράφηση του εδάφους, αποφυγή καταιγίδας και για πλοήγηση. Στο διάστημα, τα ραντάρ έχουν βοηθήσει στην καθοδήγηση των διαστημικών σκαφών και στην τηλεπισκόπηση του εδάφους και της θάλασσας.

Μολονότι τα ραντάρ δημιουργήθηκαν αρχικά για στρατιωτικές εφαρμογές, σήμερα χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολιτικές εφαρμογές στη ναυσιπλοΐα και αεροναυτιλία. Στο *Διάγραμμα 1.1* που ακολουθεί, τα είδη των ραντάρ κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την τεχνολογία στην οποία βασίζεται η λειτουργία τους και με τη χρήση τους.



Διάγραμμα 1.1 Κατηγορίες Ραντάρ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΕΠΙΤΗΡΗΣΗ

2. 1 ΕΠΙΤΗΡΗΣΗ

Τα ραντάρ ναυτιλίας, ο έλεγχος εναέριας κυκλοφορίας, τα εναέρια αμυντικά συστήματα ραντάρ, οι επίγειες συστοιχίες ραντάρ για αναζήτηση δορυφόρων στο διάστημα είναι όλα παραδείγματα συστημάτων ραντάρ επιτήρησης που λειτουργούν σε όλες τις καιρικές συνθήκες και σε όλες τις ώρες της ημέρας. Τα περισσότερα συστήματα ραντάρ επιτήρησης εκτελούν πολλαπλές λειτουργίες, που σημαίνει ότι έχουν τη δυνατότητα να κάνουν κάποιες δραστηριότητες ταυτόχρονα με την ανίχνευση νέων στόχων. Μία από τις λειτουργίες αυτές είναι η παρακολούθηση των υφιστάμενων στόχων μέχρι αυτοί να βρεθούν μέσα σε μια ορισμένη απόσταση από το ραντάρ.

2. 1. 1 ΕΥΡΟΣ ΔΕΣΜΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ

Το ραντάρ πρέπει να σαρώσει ολόκληρο τον ουρανό και να επιστρέψει στο σημείο εκκίνησης το συντομότερο δυνατόν προκειμένου να μη χάσει οποιαδήποτε νέα εξέλιξη. Ωστόσο, το ραντάρ θα πρέπει να έχει τόσο χρόνο στη διάθεσή του για τη σάρωση ώστε να επιτύχει καλά αποτελέσματα.

Συνήθως, για επιτήρηση σε μεγάλες αποστάσεις χρησιμοποιείται η L-band (περίπου 1.3 GHz), γιατί έτσι αποφεύγονται τα προβλήματα που προκαλούνται από κακοκαιρία τα οποία μπορούν να επηρεάσουν υψηλότερες συχνότητες. Κατά το σχεδιασμό της κεραίας, υπάρχουν δύο αντικρουόμενες απαιτήσεις. Πρώτον, υπάρχουν πολλοί καλοί λόγοι για την επιλογή στενής δέσμης [4], γιατί

1. η γωνιακή θέση του στόχου μπορεί να μετρηθεί με μεγάλη ακρίβεια

2. οι ανεπιθύμητες ανακλάσεις μειώνονται
3. ο αριθμός των σημάτων που μπορεί να παρεμβάλουν μειώνεται
4. το κέρδος της κεραίας στην εξίσωση ραντάρ, G , αυξάνεται και κατ'επέκταση ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) βελτιώνεται, κάνοντας πιο εύκολη την ανίχνευση του στόχου.

Στον αντίποδα αυτών των πλεονεκτημάτων, υπάρχει ένα σοβαρό μειονέκτημα. Αν σε μια συγκεκριμένη περιοχή του ουρανού πρέπει να γίνει αναζήτηση, η χρήση στενής δέσμης συνεπάγεται ότι υπάρχουν περισσότερες θέσεις δέσμης στο χώρο αυτόν που πρέπει να διερευνηθούν. Αν πρέπει να διερευνηθεί όλο το ημισφαίριο του ουρανού, αυτό ισούται με 2π της στερεάς γωνίας. Για εύρος δέσμης $\Omega = \Delta\theta\Delta\varphi$, ο αριθμός των θέσεων δέσμης που απαιτείται για να γεμίσει το ημισφαίριο είναι

$$\text{Number of beam positions} = \frac{2\pi}{\Omega} = \frac{2\pi}{\Delta\theta\Delta\varphi}$$

Και επειδή, $G = 4\pi/\Omega$, τότε

$$\text{Number of beam positions} = \frac{G}{2}$$

Αυτό σημαίνει ότι μια κεραία με κέρδος G πρέπει να εξετάσει G κατευθύνσεις για να ερευνήσει μια ολόκληρη σφαίρα.

2. 1. 2 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΠΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΑΛΜΩΝ (PRF)

Όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός κατά τον οποίο εκπέμπονται οι παλμοί από ένα σύστημα ραντάρ, τόσο μεγαλύτερη είναι η μέση ισχύς που ακτινοβολείται. Ο ρυθμός αυτός ονομάζεται συχνότητα επανάληψης παλμών (Pulse Repetition Frequency - PRF) και ορίζεται ως

$$PRF \leq \frac{c}{2R_{max}}$$

όπου R_{max} είναι η μέγιστη σαφής απόσταση. Όσο χαμηλότερη η τιμή PRF, τόσο θα απομακρύνεται ο κίνδυνος ασάφειας απόστασης του στόχου. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την αύξηση της PRF χωρίς τη μείωση της μέγιστης σαφούς απόστασης, όπως με κάποιου είδους χαρακτηρισμό των παλμών ώστε να μπορεί να ξεχωρίζει από τους γειτονικούς του. Αυτό γίνεται εκπέμποντας τους παλμούς σε διαφορετικές συχνότητες, φάσεις ή πολώσεις, που όμως επηρεάζουν τις διακυμάνσεις της διατομής του ραντάρ και την επεξεργασία Doppler. Μια άλλη μέθοδος είναι η χρήση ριπών παλμών σε διαφορετικές τιμές PRF. Κάθε μια από αυτές ανεξάρτητα μπορεί να είναι ασαφής κατά την απόσταση, αλλά όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες οι ασάφειες μπορούν να εξαλειφθούν.

Ένα ραντάρ επιτήρησης θα χρησιμοποιήσει πολλαπλές PRF για την επίλυση ασαφειών Doppler και τυφλών ταχυτήτων (blind speeds), αλλά και για την εξάλειψη ψευδών απαντήσεων δεύτερου χρόνου.

2. 1. 3 ΔΙΑΤΟΜΗ PANTAP (RCS)

Η ραδιοδιατομή (Radar Cross Section – RCS) περιγράφει την εμφανή περιοχή του στόχου όπως αυτή γίνεται αντιληπτή από το ραντάρ και αντιπροσωπεύει το μέτρο της ανακλαστικής ικανότητας ενός στόχου στην προσπίπτουσα σε αυτό ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Για απλά αντικείμενα, όπως μια σφαίρα χαλκού, είναι εύκολο να μετρηθεί μία τιμή της ραδιοδιατομής. Όμως, σε πραγματικούς στόχους όπως τα αεροπλάνα, υπάρχουν πολλές ανακλαστικές επιφάνειες οι οποίες ακτινοβολούν σε φάση και εκτός φάσης με άλλες και μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες διακυμάνσεις της ραδιοδιατομής.

Η ραδιοδιατομή σ ενός στόχου εξαρτάται εν μέρει από το μήκος κύματος λ του ραντάρ. Για στόχους πολύ μεγαλύτερους από το μήκος κύματος ($2\pi a \gg \lambda$) η RCS θα έχει περίπου το ίδιο μέγεθος όσο η πραγματική επιφάνεια του στόχου και σε αυτή την περίπτωση έχουμε τη λεγόμενη οπτική περιοχή ($\sigma = \pi a^2$) γιατί η ραδιοδιατομή πλησιάζει την οπτική/γεωμετρική διατομή του στόχου.

Δεν γίνεται να αποδοθεί μια τιμή για την RCS, γιατί εξαρτάται από τη γωνία στην οποία ο στόχος φωτίζεται, τόσο ως προς το αζιμούθιο όσο και στην ανύψωση, αλλά και από την γωνία πόλωσης του ραντάρ. Αυτό σημαίνει ότι κατά την παρατήρηση ενός στόχου, η ραδιοδιατομή θα έχει διακυμάνσεις, οι οποίες μπορούν να αντιμετωπιστούν υπολογίζοντας τη μέση τιμή της RCS σ_{av} του στόχου και τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $p(\sigma)$ για να περιγράψουν τις διακυμάνσεις γύρω από τη μέση τιμή.

Όταν η ραδιοδιατομή παραμένει θεωρητικά σταθερή από παλμό σε παλμό, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας θα είναι:

$$p(\sigma) = \frac{1}{\sigma_{av}} \exp\left(-\frac{\sigma}{\sigma_{av}}\right), \quad \sigma \geq 0$$

Όταν η ραδιοδιατομή μεταβάλλεται μόνο από σάρωση σε σάρωση, τότε η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας θα είναι:

$$p(\sigma) = \frac{4\sigma}{\sigma_{av}^2} \exp\left(-\frac{2\sigma}{\sigma_{av}}\right), \quad \sigma \geq 0$$

Στον Πίνακα 2.1 που ακολουθεί φαίνονται ενδεικτικές τιμές της ραδιοδιατομής κοινών στόχων.

Είδος Στόχου	RCS (m ²)
Πουλί	0.001 – 0.01
Άνθρωπος	1
Μικρό αεροσκάφος	1
Θαλαμηγός	10
Αυτοκίνητο	100

2. 1. 4 ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΡΟΦΕΣ (CLUTTER)

Ως παρασιτικές επιστροφές στα συστήματα ραντάρ μπορεί να χαρακτηριστεί κάθε μορφή ανεπιθύμητης ηχούς προερχόμενη από διάφορους σκεδαστές της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, όπως λόφοι, κτίρια, θάλασσα, πουλιά, νέφη και άλλα. Το clutter επιδρά αρνητικά στην ανίχνευση των στόχων [4] και διακρίνεται σε:

- επιφανειακό (surface clutter) που αφορά σε παρασιτικές επιστροφές από το έδαφος (clutter ξηράς) ή τη θάλασσα (θαλάσσιο clutter) και ορίζεται ως

$$\sigma^o = \frac{\sigma_c}{A_c}$$

όπου σ_c είναι η ραδιοδιατομή της σκεδάζουσας επιφάνειας με εμβαδό A_c και

- σε χωρικό (volume clutter) που περιλαμβάνει επιστροφές από την ατμόσφαιρα (clutter καιρού, άγγελοι) και ορίζεται ως

$$n = \frac{\sigma_c}{V_c}$$

όπου σ_c είναι η ραδιοδιατομή του σκεδάζοντος τμήματος στο χώρο με γεωμετρικό όγκο V_c .

Τα περισσότερα ραντάρ επιτήρησης διατηρούν χάρτες για τα clutter που μπορεί να είναι είτε στατικοί είτε να τροποποιούνται δυναμικά κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του ραντάρ. Κατ' επέκταση, θα μπορούσε η δέσμη της κεραίας του ραντάρ καθώς και η επεξεργασία του σήματος να μεταβληθεί ώστε να

προσαρμόζει ανάλογα με το περιβάλλον. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως clutter fixing.

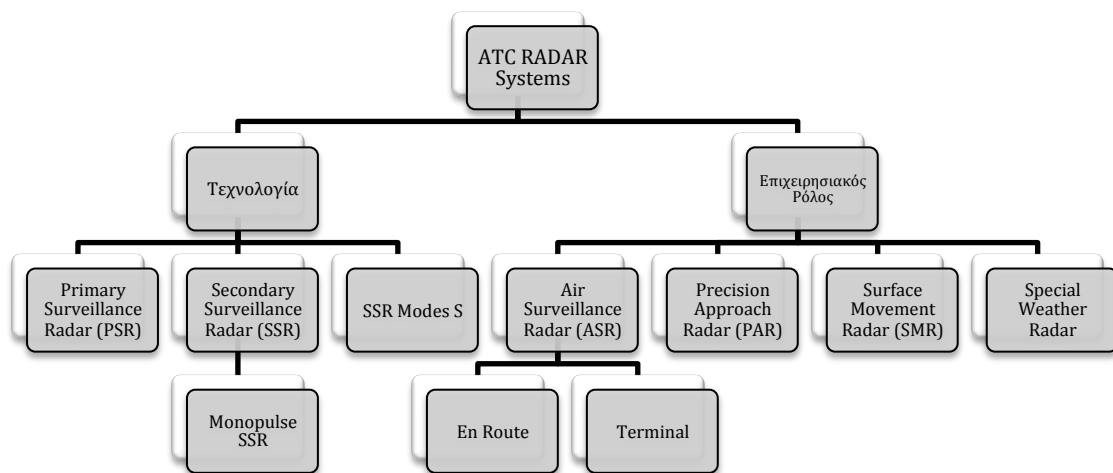
2. 2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΝΑΕΡΙΑΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

Ο Έλεγχος Εναέριας Κυκλοφορίας (Air Traffic Control – ATC) είναι μια υπηρεσία που παρέχεται από τους ελεγκτές εδάφους οι οποίοι κατευθύνουν τα αεροσκάφη στο έδαφος και στον αέρα. Πρωταρχικός σκοπός των συστημάτων ATC είναι ο διαχωρισμός των αεροσκαφών που βρίσκονται είτε σε πτήση είτε στο αεροδρόμιο κατά την προσγείωση και την απογείωση, ώστε να αποτραπούν συγκρούσεις. Επίσης, οργανώνουν και επιταχύνουν τη ροή της κυκλοφορίας, παρέχουν πληροφορίες και οποιαδήποτε άλλη υποστήριξη για τους πιλότους. Πολλά αεροσκάφη διαθέτουν συστήματα αποφυγής σύγκρουσης που χρησιμοποιούνται ως εφεδρικά στον έλεγχο της κυκλοφορίας.

Ο τρόπος της απόκτησης της θέσης ενός αεροσκάφους έτσι ώστε ο ελεγκτής να μπορεί να διατηρήσει τον ελάχιστο διαχωρισμό από ένα άλλο ονομάζεται επιτήρηση (surveillance). Η επιτήρηση περιλαμβάνει όλα τα τεχνολογικά μέσα που παρέχουν πληροφορίες θέσης και άλλα σημαντικά στοιχεία συμπεριλαμβανομένων των συνθηκών καιρού τόσο στον αέρα όσο και στην επιφάνεια του αεροδρομίου. Έτσι, αποκτά μια εικόνα της κατάστασης του χώρου και οι πληροφορίες μεταφέρονται σε συναρτήσεις επεξεργασίας δεδομένων.

Υπάρχουν τρεις μορφές επιτήρησης. Η Independent Surveillance που χρησιμοποιεί δεδομένα που προέρχονται από συσκευές στο έδαφος, όπως είναι το πρωτεύον ραντάρ επιτήρησης (Primary Surveillance Radar – PSR), η Co-operative Independent Surveillance που χρησιμοποιεί δεδομένα από συσκευές των αεροσκαφών αλλά και του εδάφους όπως το δευτερεύον ραντάρ (Secondary Surveillance Radar – SSR), και τέλος η Automatic Dependent Surveillance (ADS) που χρησιμοποιεί δεδομένα μόνο από συσκευές των αεροσκαφών και τα στοιχεία του εδάφους υπάρχουν μόνο για επικοινωνία.

Λόγω του ευρέος φάσματος των απαιτήσεων του ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας, έχει εξελιχθεί ένας αριθμός από διαφορετικά συστήματα ραντάρ, καθένα από τα οποία σχεδιάζεται για να ανταποκριθεί σε ένα συγκεκριμένο σκοπό. Στη συνέχεια ακολουθεί συνοπτικό διάγραμμα (Διάγραμμα 2.1) με τα είδη συστημάτων ραντάρ εναέριας κυκλοφορίας και σύντομη περιγραφή τους ως προς τον επιχειρησιακό τους ρόλο.



Διάγραμμα 2.1 Κατηγορίες Ραντάρ ATC

2. 2. 1 ΡΑΝΤΑΡ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗΣ

Τα ραντάρ επιτήρησης (Air Surveillance Radar – ASR) σαρώνουν τον χώρο περιστρεφόμενα κατά 360 μοίρες ως προς το αζιμούθιο και απεικονίζουν πληροφορίες των αεροσκαφών σε θόνες ραντάρ που τοποθετούνται σε κέντρα ελέγχου περιοχής, σε μονάδες ελέγχου προσεγγίσεως ή σε πύργους ελέγχου αεροδρομίου. Οι πληροφορίες που περιέχουν την απόσταση, το αζιμούθιο και την ταχύτητα εδάφους των στόχων ανανεώνονται περιοδικά και επιτυγχάνουν την απεικόνιση της προόδου της εναέριας κυκλοφορίας σε οριζόντιο επίπεδο. Τα ραντάρ αυτά χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες, τα ραντάρ διαδρομής (En Route) και τα τερματικά (Terminal).

Ένα ραντάρ διαδρομής είναι ένα σύστημα μακράς εμβέλειας, σχεδιασμένο έτσι ώστε να αποδίδει την εικόνα της κυκλοφορίας του εναέριου

χώρου πάνω από μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Τα ραντάρ αυτά συνήθως τοποθετούνται σε απομακρυσμένες περιοχές ώστε να καλύπτουν την κυκλοφορία στους αεροδιαδρόμους.

Ένα τερματικό ραντάρ είναι σύστημα μέσης εμβέλειας, σχεδιασμένο για να παρέχει κάλυψη στον ευρύτερο χώρο που περιβάλλει το αεροδρόμιο και χρησιμοποιείται ως μέσο επιτάχυνσης της κυκλοφορίας μιας τερματικής περιοχής. Η κεραία του εγκαθίσταται μέσα στο χώρο του αεροδρομίου ή κοντά σε αυτό.

Στον Πίνακα 2.2 καταγράφονται οι ενδεικτικές τιμές των χαρακτηριστικών ενός ραντάρ διαδρομής και ενός τερματικού ραντάρ.

Χαρακτηριστικό		En Route Radar	Terminal Radar
Frequency band		L	S
Frequency		1.25 – 1.35 GHz	2.7 – 2.9GHz
Coverage	Range	200 NM	60 NM
	Elevation	040°	030°
	Azimuth	360°	360°
Peak Power		5 MW	1.5 MW
Pulse Length		2 μs	0.8 μs
PRF		300 – 500 pulse/sec	700 – 1200 pulse/sec
Scanning Rate		6 rpm	15 rpm
Antenna Size		(13x7) m ²	(5x3) m ²
Beamwidth		1.2°	1.5°
Resolution	Range	500 m	230 m
	Azimuth	2.5°	3°
Accuracy	Range	± 200 m	± 120 m
	Azimuth	± 0.6°	± 0.3°
Hits per scan		20 - 28	12 - 20
Polarization		Linear, Circular	Linear, Circular

Πίνακας 2.2 Σύγκριση τιμών En Route και Terminal Ραντάρ

2. 2. 2 ΡΑΝΤΑΡ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΩΝ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

Το ραντάρ προσέγγισης ακριβείας (Precision Approach Radar – PAR) χρησιμοποιείται για την εκτέλεση προσεγγίσεων χωρίς τη βοήθεια άλλων ραδιοβοηθημάτων ή σαν όργανο παρακολούθησης προσεγγίσεων που εκτελούνται με βοηθήματα (π.χ. προσέγγιση με ILS). Είναι ένα σύστημα με σχετικά μικρή εμβέλεια, αλλά προσφέρει μεγάλη αξιοπιστία και ακρίβεια. Απεικονίζει πληροφορίες που αφορούν την απόσταση, το αζιμούθιο αλλά και το ύψος των αεροσκαφών. Το PAR χρησιμοποιεί δύο κεραίες, η μία σαρώνει κατακόρυφα και η άλλη οριζόντια. Η εμβέλεια περιορίζεται στα 10 ναυτικά μίλια, το αζιμούθιο στις 20 μοίρες και η υψομετρική γωνία στις 7 μοίρες.

2. 2. 3 ΡΑΝΤΑΡ ΚΙΝΗΣΕΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟΥ

Τα ραντάρ κινήσεων επιφανείας (Surface Movement Radar – SMR) είναι ένα σύστημα μικρής εμβέλειας ειδικά σχεδιασμένο να ανιχνεύει τα αντικείμενα που κινούνται στην επιφάνεια του αεροδρομίου, όπως αεροσκάφη, οχήματα αλλά και τα φυσικά χαρακτηριστικά όπως διαδρόμους, πίστες. Το αποτέλεσμα είναι μια εικόνα φωτογραφικής ακρίβειας, που απεικονίζεται σε ειδική οθόνη του πύργου ελέγχου. Η διακριτική ικανότητα ενός τέτοιου συστήματος είναι τέτοια ώστε να είναι δυνατή ακόμα και η αναγνώριση του τύπου των αεροσκαφών που ανιχνεύονται.

Στον Πίνακα 2.3 που ακολουθεί φαίνονται συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των προαναφερθέντων συστημάτων ραντάρ.

Επιχειρησιακός Ρόλος	Ισχύς	Διάρκεια παλμού σε μs	Διάρκεια περιστροφής της κεραίας σε s	Εμβέλεια σε NM
En Route	2-5 MW	2-4	8-12	>100
Terminal	0.5-1.5 MW	0.5-1.5	4-6	μέχρι 60
PAR	20 kW	0.2	1	10
SMR	10-20 kW	0.02-0.05	1 ή λιγότερο	3-5

Πίνακας 2.3 Βασικά Χαρακτηριστικά Ραντάρ ATC

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝ ΡΑΝΤΑΡ

3. 1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Το δευτερεύον ραντάρ επιτήρησης (Secondary Surveillance Radar – SSR) είναι ένα σύστημα που προέκυψε από τις διαδικασίες IFF (Identify Friend or Foe) κατά τη διάρκεια πολέμου και τώρα υποστηρίζει επιπλέον λειτουργίες ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας.

Ένα σύστημα SSR απαιτεί κάθε αεροσκάφος να είναι εξοπλισμένο με ένα ειδικό πομποδέκτη που ονομάζεται transponder. Ο σταθμός SSR που βρίσκεται στο έδαφος εκπέμπει παλμούς από μια περιστρεφόμενη κεραία με τον ίδιο τρόπο όπως ένα πρωτεύον ραντάρ, αλλά με πολύ χαμηλότερη ισχύ. Με τη λήψη του σήματος από το σταθμό εδάφους, ο transponder εκπέμπει μια απάντηση σε διαφορετική συχνότητα, έτσι ώστε να μειώνεται η επίδραση των παρασιτικών επιστροφών (clutter) και να μη συγχέεται η απάντηση με ανακλάσεις από την ατμόσφαιρα ή το έδαφος. Η απόσταση των αεροσκαφών από το ραντάρ καθορίζεται από τον υπολογισμό της χρονικής καθυστέρησης ανάμεσα στην εκπομπή και τη λήψη της απάντησης του transponder, ενώ η κατεύθυνσή τους προκύπτει από την κατεύθυνση της κεραίας κατά τη στιγμή που ανιχνεύεται το αεροσκάφος, όπως ακριβώς γίνεται και σε ένα πρωτεύον ραντάρ.

Εκτός από τις πληροφορίες της απόστασης και της διόπτεισης του αεροσκάφους, το SSR μπορεί να λάβει επιπλέον πληροφορίες της ταυτότητας και του υψόμετρου του αεροσκάφους. Ο σταθμός εδάφους, που ονομάζεται interrogator, εκπέμπει κωδικοποιημένη παλμοσειρά με τη μορφή ερώτησης προς το στόχο ρωτώντας «Ποιος είσαι;» και «Σε τι υψόμετρο βρίσκεσαι;». Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται αυτόματη πρόκληση εκπομπής σήματος κωδικοποιημένης απάντησης από τον transponder, με σκοπό τη λήψη της αντίστοιχης απόκρισης από τον interrogator, την αυτόματη αποκωδικοποίηση και την απεικόνιση αυτού. Η απάντηση από τον transponder έχει τη μορφή πολλαπλών παλμών που φέρουν την πληροφορία ταυτότητας ή ύψους. Οι

απαντήσεις οδηγούνται στον ψηφιακό επεξεργαστή που ονομάζεται plot extractor, ο οποίος τις αποκωδικοποιεί και τις στέλνει στους ελεγκτές εναέριας κυκλοφορίας μαζί με τη μέτρηση της απόστασης και της διόπτρευσης. Επίσης, το SSR εξασφαλίζει την επιτήρηση σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις από την εμβέλεια του πρωτεύοντος ραντάρ, γιατί η διαδρομή του σήματος από το σταθμό εδάφους SSR στο στόχο είναι μίας κατεύθυνσης (one-way path), σε αντίθεση με τη διαδρομή που διανύει το σήμα από το πρωτεύον ραντάρ (το σήμα εκπέμπεται και ανακλάται πίσω). Επομένως, οι απώλειες είναι λιγότερες στην περίπτωση του SSR και για το λόγο αυτό έχει μεγαλύτερη εμβέλεια.

Συνήθως, το πρωτεύον και το δευτερεύον ραντάρ χρησιμοποιούνται μαζί, με τις κεραίες τους να είναι η μία τοποθετημένη πάνω στην άλλη και περιστρέφονται μαζί. Το σύστημα του πρωτεύοντος ραντάρ χρησιμοποιείται για να παρέχει στους ελεγκτές εναέριας κυκλοφορίας έναν χάρτη δεικτών θέσεων στόχων σε μια οθόνη όπου προβάλεται οτιδήποτε υπάρχει στον ουρανό της περιοχής τους. Το SSR από την πλευρά βασίζεται στη συνεργασία με τους στόχους από τους οποίους λαμβάνει πληροφορίες, τις οποίες παρουσιάζει στην οθόνη.

Στους σημερινούς συνωστισμένους αεροδιαδρόμους αυτές οι πληροφορίες είναι πολύτιμες αφού έχει κατατεθεί το σχέδιο πτήσης, συμπεριλαμβανομένου και του αριθμού αναγνώρισης της πτήσης. Τα αεροσκάφη παρακολουθούνται αυτόματα κατά μήκος της διαδρομής τους χωρίς την ανάγκη ερωτήσεων από το ATC.

3. 2 ΔΟΜΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ SSR

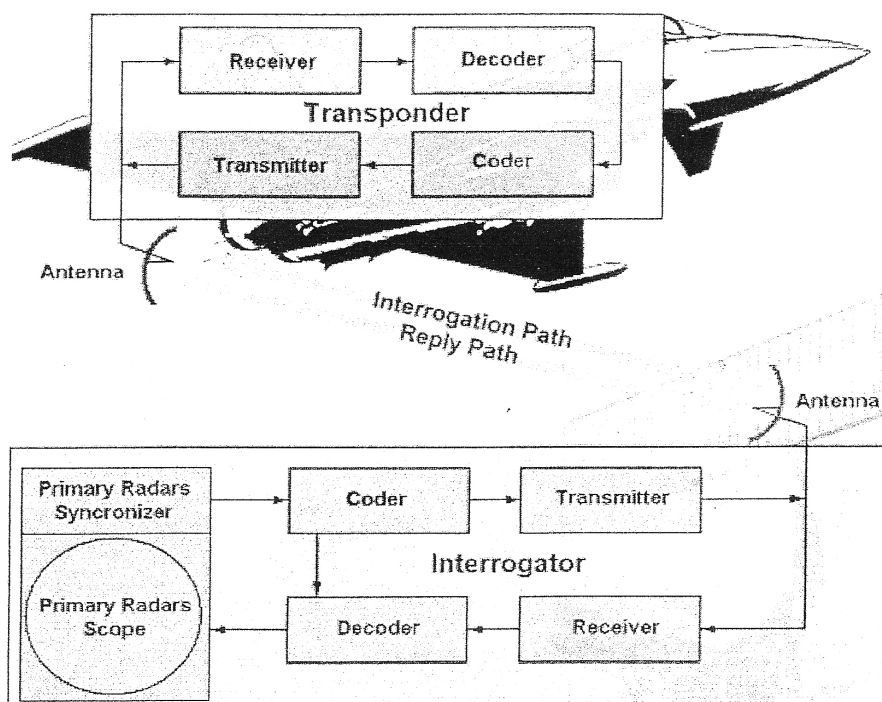
Ο σταθμός εδάφους αποτελείται από μια περιστρεφόμενη κεραία, τον interrogator και έναν επεξεργαστή των απαντήσεων που λέγεται plot extractor. Τα σήματα ερώτησης εκπέμπονται σε μια συχνότητα των 1030 MHz με ανοχή ± 0.2 MHz και λαμβάνει τις απαντήσεις από το αεροσκάφος σε μια συχνότητα των 1090 MHz με ανοχή ± 3 MHz. Ο plot extractor μετατρέπει τις απαντήσεις σε

αναφορές στόχων, τις οποίες στέλνει στις οθόνες στο κέντρο ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας.

Ο εξοπλισμός του αεροσκάφους περιλαμβάνει μια κεραία που είναι τοποθετημένη στο κάτω μέρος της ατράκτου, τον transponder, μια μονάδα ελέγχου στην οποία ο πιλότος θέτει την ταυτότητα του αεροσκάφους που έχει δωθεί από το ATC και ένα βαρόμετρο που δείχνει το υψόμετρο.

Στον transponder του αεροσκάφους, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 3.1*, ο δέκτης (receiver) ενισχύει και αποδιαμορφώνει τους παλμούς που έφτασαν από το interrogation path, ο decoder αποκωδικοποιεί την ερώτηση σύμφωνα με την επιθυμητή πληροφορία που του ζητήθηκε και επάγει τον coder να προετοιμάσει την κατάλληλη απάντηση. Ο coder κωδικοποιεί την απάντηση και στη συνέχεια ο πομπός ενισχύει το σήμα και το διαμορφώνει με την RF συχνότητα απάντησης, εκπέμποντας την απάντηση στο reply path.

Στον interrogator που βρίσκεται στο έδαφος, ο receiver ενισχύει και αποδιαμορφώνει το σήμα που λαμβάνει από το reply path. Ο decoder αποκωδικοποιεί την απάντηση και παίρνει τις πληροφορίες, οι οποίες προβάλλονται στην οθόνη του ελεγκτή. Οι παρεμβολές (jamming) ή σήματα που παρεμβάλλουν φιλτράρονται.



Εικόνα 3.1 Δομικό Διάγραμμα SSR, Πηγή: www.radartutorial.eu

3. 3 ΔΟΜΗ ΕΡΩΤΗΣΗΣ

Ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας ICAO (International Civil Aviation Organization) έχει ορίσει 4 τρόπους (modes) ερώτησης με τα ονόματα A, B, C και D. Οι τρόποι που χρησιμοποιούνται από το στρατό είναι οι 1, 2, 3 και 4, όπου ο mode 3 εκτελεί την ίδια λειτουργία με τον πολιτικό mode A. Στην πολιτική αεροπορία χρησιμοποιούνται μόνο οι modes A (ταυτότητα αεροσκάφους) και C (πληροφορίες ύψους). Οι modes B και D έχουν δημιουργηθεί για έρευνα και για μελλοντική ανάπτυξη. Επίσης, ο ρυθμός των ερωτήσεων εξαρτάται από το απαιτούμενο εύρος λειτουργίας, αφού η απάντηση πρέπει να φτάσει στο δέκτη του σταθμού εδάφους πριν την εκπομπή της επόμενης σειράς παλμών. Επομένως, το επιθυμητό εύρος λειτουργίας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη πριν καθοριστεί η συχνότητα επανάληψης παλμών (PRF). Όμως, ο ICAO έχει καθορίσει μια μέγιστη PRF στα 400 Hz για να μειώσει την επίδραση διαφόρων προβλημάτων που προέρχονται από υψηλότερους ρυθμούς ερώτησης.

Η ερώτηση που εκπέμπει ο interrogator περιλαμβάνει ένα ζευγάρι παλμών P1 και P3, διάρκειας 0.8 μ s ο καθένας. Το διάστημα μεταξύ τους είναι αυτό που καθορίζει αν η πληροφορία που ζητήθηκε ήταν ταυτότητας ή υψόμετρου. Ο transponder υπολογίζει την καθυστέρηση μεταξύ των δύο παλμών και στέλνει την απάντηση. Αν η καθυστέρηση είναι 8 μ s, τότε η ερώτηση αφορούσε στην ταυτότητα του αεροσκάφους (mode A), ενώ αν είναι 21 μ s, τότε ήταν ερώτηση για το ύψος (mode C) στο οποίο βρίσκεται το αεροσκάφος.

Μετά από 2 μ s αφού έχει εκπεμφθεί ο παλμός P1, εκπέμπεται άλλος ένας παλμός, ο P2, επίσης διάρκειας 0.8 μ s (*Εικόνα 3.2*). Ο παλμός αυτός είναι παλμός ελέγχου και χρησιμοποιείται για την απόρριψη ερωτήσεων από τους πλευρικούς λοβούς. Το πλάτος του P2 θα πρέπει να είναι ίσο ή μεγαλύτερο από τον P1 των πλευρικών λοβών της κύριας δέσμης και κατά 9 dB κάτω από τον P1. Οι παλμοί P1 και P3 εκπέμπονται στην κύρια δέσμη και αποτελούν παλμούς πλαισίου, ενώ ο P2 εκπέμπεται στη δέσμη ελέγχου (*Εικόνα 3.3*). Κάθε ερώτηση ξεκινάει με έναν παλμό P1, στη συνέχεια ακολουθεί ο παλμός P2 και στο τέλος ο παλμός P3.

Στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της δομής μιας ερώτησης, όπως αυτά έχουν καθοριστεί στο Annex 10 του ICAO [6].

Χαρακτηριστικά Παλμών Ερώτησης	Διάρκεια
Διάστημα P1 – P3 σε mode A	8 $\mu\text{s} \pm 0.2 \mu\text{s}$
Διάστημα P1 – P3 σε mode C	21 $\mu\text{s} \pm 0.2 \mu\text{s}$
Διάστημα P1 – P2	2 $\mu\text{s} \pm 0.15 \mu\text{s}$
Διάρκεια P1, P2, P3	0.8 $\mu\text{s} \pm 0.1 \mu\text{s}$
Rise Time P1, P2, P3	0.05 $\mu\text{s} - 0.1 \mu\text{s}$
Decay Time P1, P2, P3	0.05 $\mu\text{s} - 0.2 \mu\text{s}$

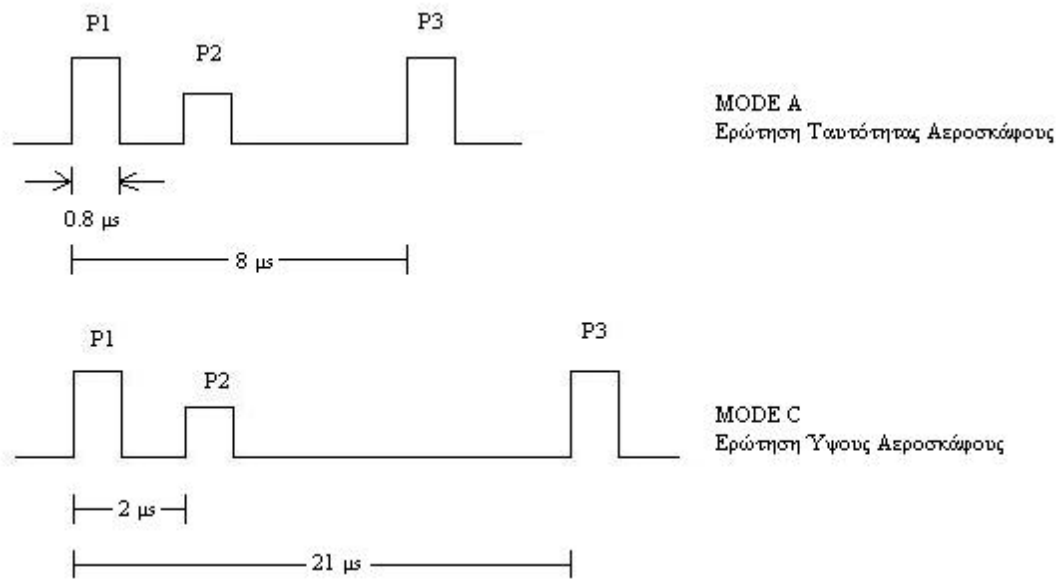
Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά των Παλμών Ερώτησης

Ο transponder ενός αεροσκάφους θα μετρήσει την ισχύ κάθε παλμού και θα τις συγκρίνει. Έτσι, όπως καθορίζεται από το ICAO Annex 10 [6] θα απαντήσει όταν:

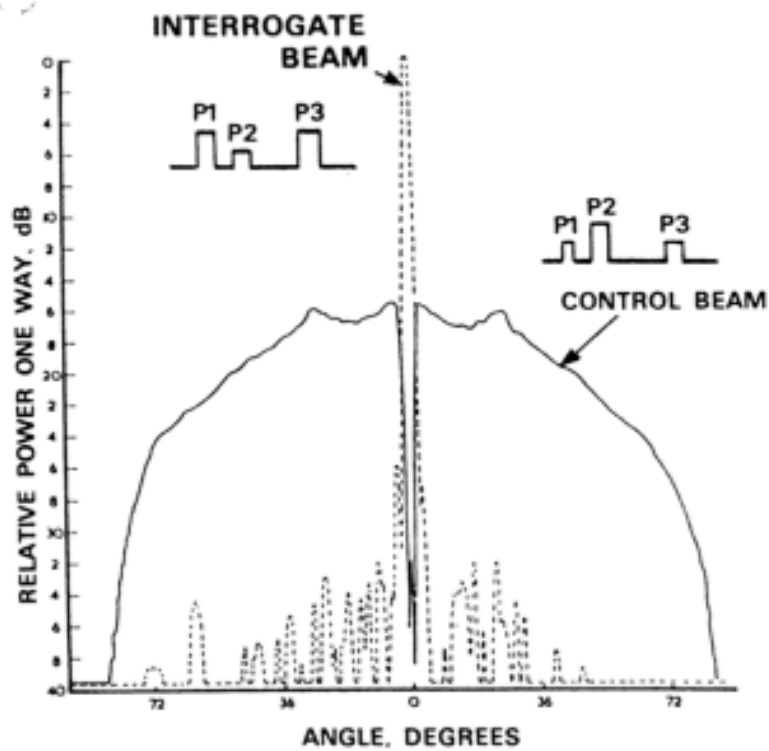
- Το πλάτος του P3 είναι ± 1 dB το πλάτος του P1, αλλά όχι μεγαλύτερο από 3 dB.
- Κατά τη διάρκεια 1.3-2.7 μs μετά τον παλμό P1 δεν έχει ληφθεί κάποιος παλμός ή ο P1 ξεπερνά κατά 9 dB όποιο παλμό έχει ληφθεί σε αυτό το διάστημα.
- Το πλάτος μιας σωστής ερώτησης είναι μεγαλύτερο από 10 dB από κάθε άλλο παλμό που δεν αναγνωρίζεται ως P1, P2, P3.

Ο transponder δε θα απαντήσει όταν:

- Το διάστημα μεταξύ των παλμών P1 και P3 είναι $\pm 1 \mu\text{s}$.
- Στη λήψη παλμού που δεν πληροί τις προϋποθέσεις όπως αναφέρθηκαν.
- Το πλάτος του P2 είναι μεγαλύτερο ή ίσο του πλάτους του P1 και το μεταξύ τους διάστημα είναι $2 \mu\text{s} \pm 0.15 \mu\text{s}$.



Εικόνα 3.2 Uplink Formats – modes A και C



Εικόνα 3.3 Δέσμες Ερώτησης και Ελέγχου [5]

Όταν ζητούνται ταυτόχρονα η ταυτότητα και το ύψος, τα αιτήματα γίνονται εκ περιτροπής και αυτό είναι γνωστό ως mode interlacing. Υπάρχει αρκετός χρόνος για να γίνουν και οι δύο ερωτήσεις, γιατί καθώς η κεραία του SSR περιστρέφεται, η δέσμη φωτίζει ένα αεροσκάφος για περίπου 30 ms και κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου ο transponder ανακρίνεται περίπου 15 φορές.

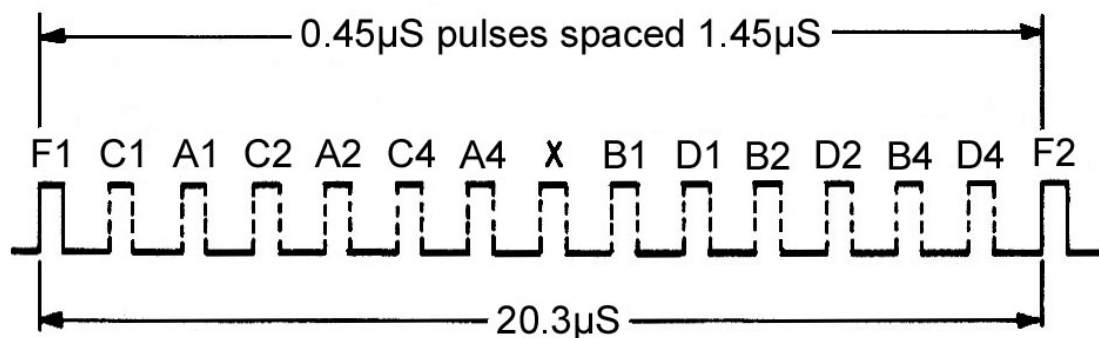
3. 4 ΔΟΜΗ ΑΠΑΝΤΗΣΗΣ

Όταν ο transponder του αεροσκάφους αναγνωρίσει το είδος της ερώτησης που έλαβε από τον interrogator, θα απαντήσει με μια σειρά παλμών καθένας από τους οποίους θα είναι διάρκειας 0.45 μs. Οι παλμοί απέχουν μεταξύ τους 1.45 μs. Αυτή η σειρά παλμών, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.3, θα αποτελείται από δύο παλμούς πλαισίου F1, F2 οι οποίοι απέχουν 20.3 μs και υπάρχουν σε κάθε απάντηση του transponder. Μεταξύ αυτών των παλμών, είναι οι δώδεκα παλμοί που φέρουν την πληροφορία και χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση την απάντησης που θα εκπεμφθεί. Καθένας από αυτούς έχει τη δική του θέση στην αλυσίδα. Η ποσότητα της πληροφορίας προς εκπομπή είναι 1 bit/pulse. 12 bits μπορούν να παράγουν μέχρι 4096 συνδυασμούς (2^{12}) ή 64 συνδυασμούς (2^6) αν μόνο 6 από τα bit χρησιμοποιηθούν (ομάδες A και B). Οι 12 παλμοί χωρίζονται σε τέσσερις ομάδες των τριών, A, B, C και D με πρόθεμα 1,2 και 4. Οι παλμοί αυτοί θα δώσουν τα bits ενός κώδικα οκταδικής μορφής (ABCD). Ο δείκτης που δίνεται στους παλμούς κάνει την κωδικοποίηση – αποκωδικοποίηση εύκολη. Επίσης, ο μέγιστος αριθμός κωδικών 4096 θα μπορούσε να οριστεί ως 8x8x8x8, όπου το 8 είναι ο αριθμός των συνδυασμών κάθε ομάδας. Η θέση με το όνομα X δεν χρησιμοποιείται σε ερωτήσεις mode A/C, αλλά υπάρχει για μελλοντική χρήση. Σε κάποιες περιπτώσεις, όταν ανιχνεύεται ένας παλμός σε αυτή τη θέση, ο κωδικός θεωρείται μη έγκυρος.

Επιπλέον, υπάρχει μια θέση ταυτότητας του παλμού I, γνωστή ως SPI (Special Pulse for Identification ή Special Position Indicator) και βρίσκεται 4.35 μs μετά τον παλμό πλαισίου F2. Είναι ανεξάρτητη από τον κωδικό που έχει

επιλεγεί και εκπέμπεται μόνο όταν ο ελεγκτής δώσει εντολή στον πιλότο να ενεργοποιήσει τον διακόπτη (switch). Ο παλμός SPI εκπέμπεται αυτόματα για μια μικρή περίοδο των 15-30 sec, κατά την οποία όλες οι απαντήσεις σε mode A φέρουν αυτόν τον παλμό.

Στην *Εικόνα 3.4* φαίνεται η μορφή της παλμοσειράς της απάντησης από τον transponder και στον Πίνακα 3.2 παραθέτονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των παλμών.



Εικόνα 3.4 SSR Downlink Format, Πηγή: en.wikipedia.org

Χαρακτηριστικά Παλμών Απάντησης	Διάρκεια
Διάστημα P3 – F1	3 μs ± 0.5 μs
Διάστημα F1 – F2	20.3 μs
Διάστημα Παλμών Πληροφορίας	1.45 μs
Διάρκεια	0.45 μs ± 0.1 μs
Rise Time	0.05 μs – 0.1 μs
Decay Time	0.05 μs – 0.2 μs

Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά των Παλμών Απάντησης

Έτσι, ο transponder θα απαντήσει με ένα τετραψήφιο κωδικό (σε οκταδικό σύστημα) που είτε θα είναι το αναγνωριστικό του αεροσκάφους (mode A) είτε θα είναι το υψόμετρο στο οποίο πετάει (mode C). Η απάντηση είναι ένα απλό, ψηφιακά κωδικοποιημένο μήνυμα και έτσι ο interrogator αποκτά εύκολα την ταυτότητα και το ύψος του αεροσκάφους. Επειδή ο transponder απαντά πάντα σε συγκεκριμένο χρόνο, ο interrogator μπορεί

επιπλέον να καθορίσει και τη θέση του αεροσκάφους υπολογίζοντας την καθυστέρηση μεταξύ ερώτησης και απάντησης.

Οι πληροφορίες που φέρει η απάντηση δεν περιέχουν κανένα στοιχείο που να υποδεικνύει σε ποιον mode αντιστοιχεί η απάντηση αυτή. Ο interrogator θα υποθέσει ότι η απαντήσεις που έλαβε αφορούν στον τελευταίο mode ερώτησης.

Μετά την εκπομπή ενός κωδικού, υπάρχει μια περίοδος παύσης κατά την οποία ο transponder δεν απαντάει σε καμία ερώτηση (περίπου 125 μs το πολύ). Αυτό συμβαίνει λόγω τεχνικών περιορισμών των transponders, κυρίως λόγω του μειωμένου μεγέθους του εξοπλισμού.

3. 4. 1 ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΤΑΥΤΟΤΗΤΑΣ

Συνήθως, ο πιλότος του αεροσκάφους θα επιλέξει mode A/C και ο transponder είναι προγραμματισμένος να απαντά σε ερωτήσεις από το έδαφος χωρίς την παρέμβαση του πληρώματος. Το όργανο μέτρησης του υψόμετρου (altimeter) θα παρέχει αυτόματα την πληροφορία ύψους στον transponder. Υπάρχουν, όμως, επιπλέον μηνύματα/κώδικες που χρησιμοποιούνται σε έκτακτες καταστάσεις, όπως αεροπειρατεία, αποτυχία ραδιοεπικοινωνίας ή προβλήματα αναγνώρισης αεροσκάφους από το ATC.

Ένα παράδειγμα προσυμφωνημένων κωδικών σε mode A φαίνεται στον Πίνακα 3.3 που ακολουθεί. Στον εξοπλισμό αποκωδικοποίησης του εδάφους υπάρχουν κατάλληλες διατάξεις για την άμεση αναγνώριση τέτοιων κωδικών.

Κωδικός	Mode	Σημασία
7700	3/A	Γενικού τύπου έκτακτη ανάγκη
7600	3/A	Αποτυχία ραδιοεπικοινωνίας
7500	3/A	Παράνομη παρέμβαση

Πίνακας 3.3 Παράδειγμα Κωδικών Mode A

3. 4. 2 ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΥΨΟΥΣ

Η απάντηση σε μια mode C ερώτηση γίνεται από το μέρος του transponder που ονομάζεται alticoder. Στο έδαφος υπάρχουν υπολογιστικά συστήματα που μέσω συναρτήσεων μετατρέπουν την πληροφορία ύψους σε υψόμετρο. Εδώ χρησιμοποιούνται μόνο 11 bits για κωδικοποίηση (D_1 δεν χρησιμοποιείται), κάτι που επιτρέπει την κωδικοποίηση υψομέτρων από 100 έως 126.750 ft.

3. 5 INTERROGATOR

Ο interrogator είναι η συσκευή στον σταθμό ραντάρ του εδάφους, η οποία παράγει ερωτήσεις χρησιμοποιώντας τον mode A για ερωτήσεις ταυτότητας του αεροσκάφους και τον mode C για ερωτήσεις υψόμετρου. Η συχνότητα κατά την οποία εκπέμπει ερωτήσεις (interrogation repetition frequency) πρέπει να διατηρείται όσο πιο χαμηλή γίνεται, με μέγιστη τιμή τις 450 ερωτήσεις ανά δευτερόλεπτο.

Τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε συστήματος SSR αλλάζουν ανάλογα με τις ανάγκες. Μερικές τυπικές προσεγγιστικές τιμές αυτών των χαρακτηριστικών φαίνονται στον Πίνακα 3.4.

Χαρακτηριστικά	Τυπικές Τιμές
Frequency	1030 MHz
Receiver Sensitivity	-85 dBm
Power Output	μέχρι 2 kW
Antenna Gain	25 dB

Πίνακας 3.4 Ενδεικτικές Τιμές Χαρακτηριστικών Interrogator

3. 6 TRANSPONDER

Ο transponder είναι μια συσκευή που αναλαμβάνει να απαντήσει σε ερωτήσεις του interrogator, εκπέμποντας κωδικοποιημένες πληροφορίες αναφοράς ταυτότητας και ύψους του αεροσκάφους. Η ευαισθησία του δέκτη του transponder, όπως αυτή έχει καθοριστεί από το ICAO Annex 10 [6], είναι στο 90%, που σημαίνει ότι θα πρέπει να μπορεί να απαντάει στο 90% των ερωτήσεων που δέχεται. Επίσης, για να προστατευτεί το σύστημα του transponder από υπερφόρτωση ερωτήσεων (over-interrogation), υπάρχει ένα καθορισμένο εύρος ερωτήσεων στις οποίες μπορεί να απαντήσει. Αυτό το εύρος ελέγχου είναι από 500 μέχρι 2000 απαντήσεις το δευτερόλεπτο.

Τυπικές τιμές παραμέτρων για τη λειτουργία του transponder φαίνονται στον Πίνακα 3.5 που ακολουθεί.

Χαρακτηριστικά	Τυπικές Τιμές
Frequency	1090 MHz
Receiver Sensitivity	-71 dBm
Power Output	24 dBW
Reply Delay	3 μ s
Transmitter Recovery	50 μ s
Reply Rate Threshold	1200
Antenna Gain	0 (max 3 dB)

Πίνακας 3.5 Τυπικές Τιμές Χαρακτηριστικών Transponder

3. 7 PLOT EXTRACTOR

Ο plot extractor είναι μέρος του συστήματος του σταθμού εδάφους και εκτελεί την εξαγωγή των plots τα οποία στη συνέχεια με τη βοήθεια του radar tracker γίνονται τα tracks που εμφανίζονται στις οθόνες του κέντρου ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας. Η εξαγωγή αυτή είναι αποτέλεσμα τριών διαδικασιών, οι

οποίες είναι η ψηφιοποίηση των απαντήσεων mode A και mode C, ο συσχετισμός των σύγχρονων απαντήσεων και ο υπολογισμός της απόστασης και της διόπτρευσης ενός αεροσκάφους.

Πρώτο βήμα είναι η μετατροπή της παλμοσειράς που έλαβε ο δέκτης του ραντάρ σε απαντήσεις και στη συνέχεια να τις αποκωδικοποιήσει ώστε να εξάγει τα δεδομένα. Αυτό γίνεται μέσω του reply decoder, ο οποίος αναγνωρίζει μια απάντηση ελέγχοντας τη δομή του σήματος. Εντοπίζει, δηλαδή, τους παλμούς πλαισίου F1 και F2 και μετράει το μεταξύ τους διάστημα, εξετάζοντας αν πληρούνται οι προϋποθέσεις (Παράγραφος 3.4).

Επόμενο βήμα είναι να καθορίσει τον κωδικό που περιέχουν τα δεδομένα που πήρε από την αποκωδικοποίηση και ουσιαστικά να εξάγει την πληροφορία αναφοράς ταυτότητας και ύψους.

Η λειτουργία του plot extractor είναι πολύ βασική, γιατί είναι αυτός που ελέγχει την εγκυρότητα των σημάτων που λαμβάνονται και κατ'έπекταση την ανίχνευση στόχων, ενώ ταυτόχρονα απορρίπτει αυτά που δεν είναι έγκυρα.

3. 8 ΚΕΡΑΙΕΣ SSR

Αφού το SSR μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύστημα που αποτελείται από μία μονάδα interrogator και μία μονάδα responder, κάθε μια από αυτές θα πρέπει να έχει τη δική του κεραία που να εκτελεί τη μετάβαση των κυμάτων που περιορίζονται στον αγωγό σε κύματα στον ελεύθερο χώρο και το αντίστροφο. Αυτές οι κεραίες πρέπει να κάνουν δύο λειτουργίες. Αρχικά, να εξασφαλίσουν ότι η ισχύς που παράγεται εκπέμπεται στην πραγματικότητα και στη συνέχεια να εγγωηθούν ότι τα κύματα στον ελεύθερο χώρο κινούνται στην ίδια κατεύθυνση που απαιτείται από τη ροή των πληροφοριών (κατευθυντικό πρότυπο).

3. 8. 1 ΚΕΡΑΙΑ INTERROGATOR

Η κεραία του σταθμού εδάφους του συστήματος SSR εκπέμπει δύο βασικές δέσμες, τη δέσμη ερώτησης και τη δέσμη ελέγχου. Η δέσμη ερώτησης (κύρια δέσμη) έχει υψηλό κέρδος και έναν στενό κύριο λοβό, ενώ η δέσμη ελέγχου έχει πιο χαμηλό κέρδος, τόσο ώστε να μην ξεπερνάει την κύρια δέσμη, αλλά μόνο τους πλευρικούς λοβούς αυτής.

Ουσιαστικά, ο interrogator αποτελείται από μία κατευθυντική κεραία με μια κύρια δέσμη που εκπέμπει τους παλμούς P1 και P3 και τη δέσμη ελέγχου που εκπέμπει τον παλμό P2 και καταπιέζει τους πλευρικούς λοβούς. Σύμφωνα με το ICAO Annex 10 [6], το εύρος δέσμης της κατευθυντικής κεραίας του interrogator δε θα πρέπει να είναι πιο ευρύ απότι πρέπει. Συγκεκριμένα, οι πλευρικοί λοβοί και ο πίσω λοβός της κεραίας θα πρέπει να είναι 24 dB κάτω από την κορυφή του κύριου λοβού.

Η κεραία του interrogator εκτελεί βασικές λειτουργίες στο οριζόντιο και στο κάθετο επίπεδο. Στο οριζόντιο επίπεδο πρέπει να έχει πολύ καλή διακριτική ικανότητα αζιμουθίου, ώστε να μπορεί να ξεχωρίζει αεροσκάφη που βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις. Στο κάθετο επίπεδο πρέπει να έχει ευρεία έκταση ώστε να ανιχνεύει αεροσκάφη σε διάφορα ύψη, αλλά και να μειώνει τις ανεπιθύμητες παρεμβολές από ανακλάσεις του εδάφους.

Επιπλέον, η κεραία είναι εξοπλισμένη με ένα διακόπτη RF, ο οποίος αναλαμβάνει να εναλλάσει τις δέσμες που εκπέμπονται. Όταν, λοιπόν, εκπέμπεται ο παλμός P1 γυρίζει στη δέσμη ερώτησης, μετά αλλάζει στη δέσμη ελέγχου για την εκπομπή του παλμού P2 και τέλος γυρίζει στη δέσμη ερώτησης για τον παλμό P3, όπου και παραμένει κατά τη διάρκεια της λήψης των απαντήσεων.

Η κεραία του σταθμού εδάφους ενός SSR είναι μια στοιχειοκεραία αποτελούμενη από μια γραμμική συστοιχία ακτινοβολούμενων διπόλων. Μια τυπική κεραία τύπου LVA (Large Vertical Aperture) του SSR φαίνεται στην *Εικόνα 3.5* που ακολουθεί. Εδώ η κεραία είναι εγκατεστημένη πάνω στην κεραία του πρωτεύοντος ραντάρ.



Εικόνα 3.5 Κεραία SSR πάνω σε πρωτεύον ραντάρ Πηγή: www.radartutorial.eu

3. 8. 2 ΚΕΡΑΙΑ TRANSPONDER

Από την άλλη μεριά, η κεραία του transponder θα πρέπει να είναι σε θέση να δέχεται και να απαντάει σε ερωτήσεις από κάθε κατεύθυνση. Επομένως, το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας τέτοιας κεραίας είναι ομοιοκατευθυντικό στο οριζόντιο επίπεδο. Η κεραία τοποθετείται συνήθως στην κάτω επιφάνεια της ατράκτου του αεροσκάφους.

Ένας βασικός περιορισμός στην επίτευξη του ομοιοκατευθυντικού χαρακτηριστικού λειτουργίας είναι ότι τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται στο SSR είναι πολύ μικρά, της τάξης των 30 cm, με αποτέλεσμα να υφίστανται ανακλασεις και να παραμορφώνεται το διάγραμμα ακτινοβολίας, γιατί η άτρακτος του αεροσκάφους κρύβει ένα μέρος της ιδανικής ακτινοβολίας.

3. 9 ΕΞΙΣΩΣΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ SSR

Η εξίσωση της μέγιστης απόστασης για το uplink κανάλι του SSR, δηλαδή από την κεραία του ραντάρ μέχρι την κεραία του αεροσκάφους, θα είναι:

$$R_i^2 = \frac{P_i G_i G_t \lambda_i^2}{(4\pi)^2 S_{tmin}}$$

όπου,

R_i η απόσταση του στόχου από την κεραία του ραντάρ

P_i η ισχύς που εκπέμπει η κεραία του interrogator (peak power)

G_i το κέρδος της κεραίας του πομπού του interrogator

G_t το κέρδος της κεραίας του δέκτη του transponder

λ_i το μήκος κύματος του interrogator (29.13 cm για συχνότητα 1030 MHz)

S_{tmin} η ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς που λαμβάνει ο transponder ώστε να δημιουργήσει μια απάντηση

Λαμβάνοντας υπόψη και τις απώλειες του συστήματος, η παραπάνω εξίσωση θα είναι:

$$R_i^2 = \frac{P_i G_i G_t \lambda_i^2}{(4\pi)^2 S_{tmin} L_i L_t L_a}$$

όπου,

L_i οι απώλειες μεταξύ του interrogator και της κεραίας

L_t οι απώλειες μεταξύ του transponder και της κεραίας

L_a οι απώλειες του καναλιού (atmospheric path losses)

Η εξίσωση της απόστασης στο downlink κανάλι του SSR, δηλαδή από την κεραία του transponder μέχρι την κεραία του interrogator στο σταθμό εδάφους θα είναι:

$$R_t^2 = \frac{P_t G_i G_t \lambda_t^2}{(4\pi)^2 S_{imin}}$$

όπου,

R_t η απόσταση του στόχου από την κεραία του ραντάρ

P_t	η ισχύς που εκπέμπεται από την κεραία του transponder (peak power)
G_i	το κέρδος της κεραίας του δέκτη του interrogator
G_t	το κέρδος της κεραίας του πομπού του transponder
λ_t	το μήκος κύματος του transponder (27.52 cm για τη συχνότητα των 1090 MHz)
S_{imin}	η ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς που λαμβάνει ο interrogator ώστε να ανιχνεύσει μια απάντηση

Η εξίσωση του downlink με τις απώλειες θα είναι:

$$R_t^2 = \frac{P_t G_i G_t \lambda_t^2}{(4\pi)^2 S_{imin} L_i L_t L_a}$$

Όπως αναφέρεται στο Manual on the Secondary Surveillance Radar Systems του ICAO [7], η ευαισθησία στο downlink κανάλι είναι πιο μεγάλη από το uplink, συνήθως 3 με 6 dB. Αυτό σημαίνει ότι όταν ο transponder δέχεται μια ερώτηση από το σταθμό εδάφους, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η απάντηση που θα εκπέμψει να ληφθεί σωστά από τον δέκτη του interrogator.

Το ελάχιστο επίπεδο ισχύος που χρειάζεται για να απαντήσει ο transponder σε μια ερώτηση ή αυτό που χρειάζεται ο δέκτης του σταθμού εδάφους για να ανιχνεύσει μια απάντηση (κατά 90%) ονομάζεται Minimum Triggering Level – MTL. Στην έξοδο του δέκτη του σταθμού εδάφους, η αναλογία του round-trip απάντηση προς ερώτηση είναι κι αυτή 90%. Αυτή είναι και η πιθανότητα μιας επιτυχημένης διαδικασίας όπου σε μια ερώτηση που εκπέμφθηκε έγινε σωστή λήψη μιας απάντησης. Όμως, η πραγματική πιθανότητα ανίχνευσης (probability of detection) είναι στην έξοδο του plot extractor και εξαρτάται από ένα επαρκές round trip απαντήσεων που προήλθαν από μια σειρά ερωτήσεων και ορίζεται ως

$$P_d = \frac{\text{Number of detected secondary \& combined target reports}}{\text{Number of expected secondary \& combined target reports}}$$

Εξαιτίας της χρήσης των transponders, η ισχύς της απάντησης του transponder που λαμβάνει ο σταθμός εδάφους μειώνεται κατά έναν παράγοντα $1/R^2$, σε αντίθεση με ένα σύστημα PSR όπου η ισχύς της ηχούς μειώνεται κατά $1/R^4$. Επομένως, η πιθανότητα ανίχνευσης σε ένα SSR σύστημα καταφέρνει να ξεπερνάει το 95%. Σαν αποτέλεσμα, ο δέκτης που χρειάζεται είναι χαμηλής ισχύος.

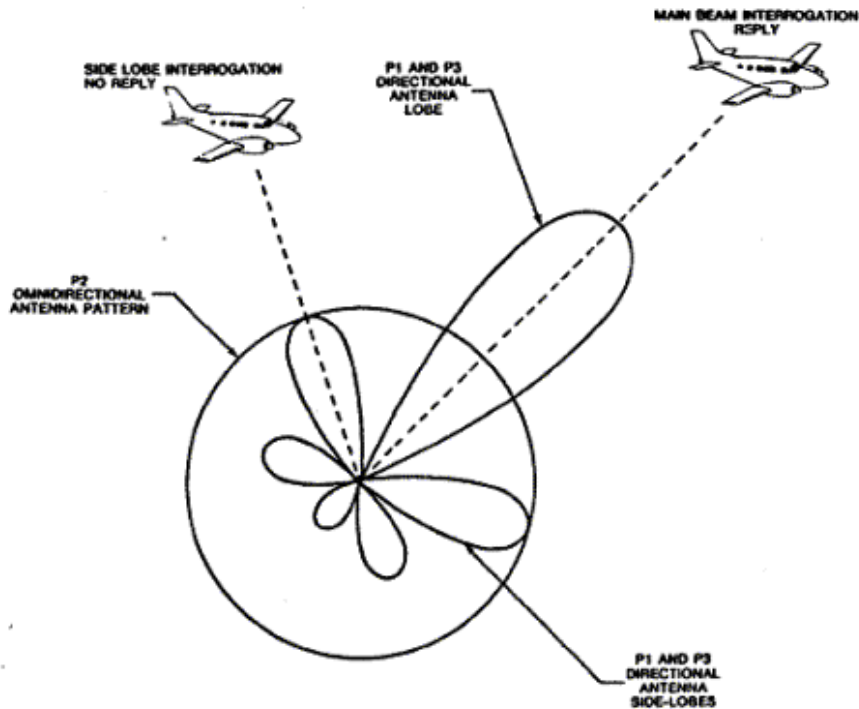
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ SSR

Ένα σύστημα SSR αν και παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα και ευκολίες στον τρόπο λειτουργίας και κατασκευής, δεν καταφέρνει να ξεπεράσει κάποια κοινά προβλήματα που αντιμετωπίζουν σχεδόν όλα τα συστήματα ραντάρ, αλλά και προβλήματα που προκύπτουν από τον τρόπο λειτουργίας του.

4. 1 ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΛΟΒΩΝ

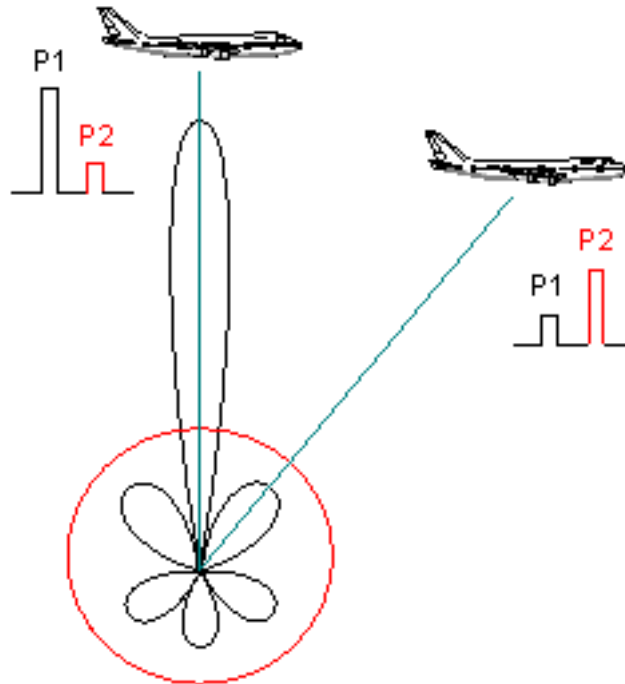
Ένα σημαντικό πρόβλημα προκαλείται από τους πλευρικούς λοβούς της κεραίας που βρίσκεται στο έδαφος, οι οποίοι μπορούν να προκαλέσουν απαντήσεις από τον transponder του αεροσκάφους. Το σύστημα ραντάρ δε γνωρίζει ότι η ηχώ έχει φτάσει στον transponder από πλευρικό λοβό κι έτσι το αεροσκάφος εμφανίζεται σε λάθος θέση από αυτή που βρίσκεται στην πραγματικότητα. Ειδικότερα, ένα αεροσκάφος που βρίσκεται κοντά στο ραντάρ μπορεί να λαμβάνει ερωτήσεις από πλευρικούς λοβούς και να απαντάει σε αυτές. Ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίζεται αυτό το φαινόμενο είναι με τη χρήση του παλμού ελέγχου P2, όπως έχει αναφερθεί στην αρχή λειτουργίας του SSR.

Ο παλμός P2 εκπέμπεται από μια ξεχωριστή κεραία που είναι ομοιοκατευθυντική, σε αντίθεση με την κύρια κεραία που είναι κατευθυντική και στέλνει στην κύρια δέσμη τους παλμούς P1/P3. Αυτή η κεραία έχει χαμηλό κέρδος, τόσο ώστε να ξεπερνάει τους πλευρικούς λοβούς της κύριας κεραίας, αλλά όχι την κύρια δέσμη, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 4.1* που ακολουθεί.



Εικόνα 4.1 Απαντήσεις Πλευρικών Λοβών, Πηγή: atcsl.tripod.com

Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα στο εσωτερικό του transponder θα συγκρίνουν το πλάτος των παλμών P1/P3 με αυτό του παλμού P2 και έτσι θα μπορέσει να καθοριστεί η προέλευση της ερώτησης (πλευρικοί λοβοί ή κύριος λοβός). Αν το πλάτος του παλμού P1 είναι μεγαλύτερο κατά 9 db από το πλάτος του P2, τότε αναγνωρίζει ότι το σήμα που έλαβε είναι από την κύρια δέσμη και πρέπει να απαντήσει. Αν το πλάτος του P2 είναι μικρότερο, αλλά όχι κατά 9 db, τότε ο transponder μπορεί να απαντήσει. Στην περίπτωση, όμως, που το πλάτος του P2 ξεπερνάει αυτό του P1 και του P3, τότε ο transponder θα ξέρει ότι το σήμα προήλθε από τους πλευρικούς λοβούς και δεν θα απαντήσει (Εικόνα 4.2). Αυτή η μέθοδος καταπίεσης ερωτήσεων προερχόμενες από πλευρικούς λοβούς ονομάζεται ISLS (Interrogation path Side Lobe Suppression).



Εικόνα 4.2 ISLS - Καταστολή των πλευρικών λοβών Πηγή: www.radary.az.pl

Επιπλέον, υπάρχει ένα ακόμη σύστημα που χρησιμοποιείται για να αποτρέψει απαντήσεις να ληφθούν από πλευρικούς λοβούς και ονομάζεται RSLS (Reply path Side Lobe Suppression). Ένα τέτοιο σύστημα διαχωρίζει τις απαντήσεις κατά τη λήψη χρησιμοποιώντας δύο δέκτες, ο ένας για την κύρια δέσμη και ο άλλος για τον έλεγχο. Στη συνέχεια, τα σήματα των δύο αυτών δεκτών συγκρίνονται μεταξύ τους. Στο τέλος απεικονίζονται οι απαντήσεις που λαμβάνονται από την κύρια δέσμη, μόνο αν είναι πιο δυνατές από εκείνες που λαμβάνονται από το πρότυπο ελέγχου.

4. 2 ΑΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ (FRUIT)

Συχνά, ο transponder ενός αεροσκάφους δημιουργεί και εκπέμπει απαντήσεις σε ερωτήσεις που ενεργοποιούνται από γειτονικούς interrogators. Έτσι, οι απαντήσεις αυτές είναι ανεπιθύμητες για αυτούς τους interrogators, γιατί ουσιαστικά δεν προορίζονταν για εκείνους. Αυτό συμβαίνει γιατί οι

απαντήσεις του transponder εκπέμπονται προς όλες τις κατευθύνσεις και γιατί η επικοινωνία μεταξύ όλων των interrogators και των transponders γίνεται με τη χρήση κοινών συχνοτήτων (1030 MHz στο uplink, 1090 MHz στο downlink). Επομένως, η απάντηση στην ερώτηση ενός συγκεκριμένου ραντάρ μπορεί να ληφθεί από οποιοδήποτε άλλο SSR που καλύπτει την περιοχή ή μέρος αυτής. Σαν αποτέλεσμα, τα SSR λαμβάνουν πολλαπλές ανεπιθύμητες απαντήσεις, που καθεμία από αυτές παράγει ασύγχρονες απαντήσεις. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται FRUIT (False Replies Unsynchronized to Interrogator Transmission). Αφού, λοιπόν, οι απαντήσεις είναι ασύγχρονες, δεν μπορούν να συσχετιστούν με κάποιο αεροσκάφος ώστε να δώσουν χρήσιμες πληροφορίες. Το αποτέλεσμα είναι ο λανθασμένος υπολογισμός του εύρους και του αζιμουθίου, καθώς επίσης και της λανθασμένης αναφοράς ταυτότητας και ύψους, αφού ο mode που προκάλεσε την ασυγχρόνιστη απάντηση δεν είναι γνωστός σε ξένο ραντάρ (μια απάντηση πάντα είναι στον ίδιο τρόπο με αυτόν της ερώτησης). Επίσης, ο συνδυασμός τέτοιων απαντήσεων μπορεί να εμφανίσει στόχο που δεν υπάρχει εντός της εμβέλειας του ραντάρ.

Στην πλειοψηφία τους, οι ασύγχρονες απαντήσεις ανιχνεύονται από τους πλευρικούς λοβούς και απορρίπτονται εύκολα με τη χρήση του RSLS.

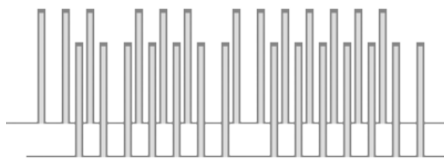
Για να μπορέσουν τα SSR που καλύπτουν την ίδια περιοχή να απορρίψουν τις FRUIT πρέπει να λειτουργούν σε διαφορετικές PRF. Επίσης, για τον ίδιο λόγο, γίνεται χρήση του plot extractor, βασικό κριτήριο του οποίου είναι το εύρος. Η συσχέτιση του εύρους γίνεται με την τεχνική του sliding window. Ο plot extractor αρχικά ανιχνεύει την παρουσία των παλμών πληροφορίας (F1 και F2) και στη συνέχεια συνδέει τον αριθμό των παρουσιών των απαντήσεων στο ίδιο εύρος με ένα προκαθορισμένο αριθμό ερωτήσεων. Τα δύο κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη είναι το κριτήριο της συσχέτισης (correlation – m παρουσίες σε n ερωτήσεις) και το κριτήριο της εξαγωγής (extraction – p διαδοχικές παρουσίες). Επιπλέον, ο plot extractor καθορίζει το αζιμούθιο του στόχου, αποκωδικοποιεί και υπολογίζει τους κωδικούς, επαληθεύει την αποδοχή των κωδίκων και τους ίδιους τους κώδικες. Τέλος, για την καταστολή των ασύγχρονων απαντήσεων χρησιμοποιείται μια διάταξη που ονομάζεται defruiter.

4.3 GARBLING

Το φαινόμενο αυτό προκύπτει όταν δύο αεροσκάφη που βρίσκονται μέσα στην κύρια δέσμη είναι περίπου στο ίδιο αζιμούθιο και οι παλμοί των απαντήσεων επικαλύπτονται. Υπάρχουν τα ακόλουθα είδη επικάλυψης:

1. Ασύγχρονο Garbling:

Σε αυτή την περίπτωση, οι παλμοί των απαντήσεων που επικαλύπτονται δεν συγκλίνουν μεταξύ τους, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα να διαχωριστούν και να εξαχθούν οι απαντήσεις χωρίς πρόβλημα.



Εικόνα 4.3 Ασύγχρονο Garbling, Πηγή: www.radartutorial.eu

2. Σύγχρονο Garbling:

Αν οι παλμοί των απαντήσεων επικαλύπτονται έτσι ώστε να πέφτουν ακριβώς ο ένας πάνω στον άλλο, το αποτέλεσμα είναι να μην μπορεί ο plot extractor να κάνει την αποκωδικοποίηση και να τους ξεχωρίσει και οι στόχοι να μην εμφανίζονται στην οθόνη.

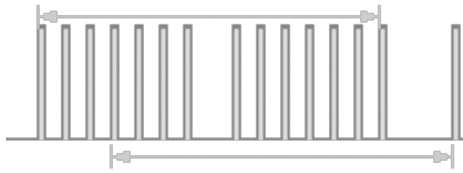


Εικόνα 4.4 Σύγχρονο Garbling, Πηγή: www.radartutorial.eu

3. Διαδοχικές Απαντήσεις:

Εδώ οι παλμοσειρές δύο απαντήσεων μπορεί να απέχουν μεταξύ τους λιγότερο από ό,τι πρέπει. Τυχαίνει κάποιες φορές ένας παλμός από μια απάντηση με έναν παλμό μιας επόμενης απάντησης να έχουν μεταξύ τους διάστημα 20.3 μ s, όπως έχουν οι παλμοί πλαισίου F1 και F2. Αποτέλεσμα είναι ο plot extractor να εντοπίσει απαντήσεις και να δώσει πληροφορίες για ένα αεροσκάφος που ουσιαστικά δεν υπάρχει. Το αεροσκάφος αυτό θα εμφανίζεται στην οθόνη πολύ κοντά σε κάποιο άλλο, δημιουργώντας

σοβαρά προβλήματα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται C2-SPI phantom bracket. Αν οι παλμοί C2 και SPI υπάρχουν σε μια απάντηση, το διάστημα μεταξύ τους είναι το ίδιο με τους παλμούς F1 και F2.



Εικόνα 4.5 Διαδοχικές Απαντήσεις, Πηγή: www.radartutorial.eu

4. Διακεκριμένες Απαντήσεις:

Οι παλμοσειρές είναι η μία μετά την άλλη, έτσι που ο παλμός SPI της πρώτης να απέχει απόσταση μεγαλύτερη των 20.3 μs και δε δημιουργείται πρόβλημα.



Εικόνα 4.6 Διακεκριμένες Απαντήσεις, Πηγή: www.radartutorial.eu

4. 4 ΑΝΑΚΛΑΣΕΙΣ

4. 4. 1 ΑΝΑΚΛΑΣΕΙΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

Ο συνδυασμός της άμεσης ερώτησης και της ερώτησης που ανακλάται από το έδαφος κοντά στην κεραία του ραντάρ μπορεί να οδηγήσει στο φαινόμενο lobbing. Το ίδιο φαινόμενο επηρεάζει και την εκπομπή του transponder όπου οι ανακλώμενες ή άμεσες απαντήσεις φτάνουν την κεραία του SSR είτε σε φάση είτε εκτός φάσης. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου, η κεραία του SSR πρέπει να εγκαθίσταται ψηλά πάνω από το έδαφος, συνήθως εκατό φορές το μήκος κύματος, και το διάγραμμά της θα

πρέπει να είναι τέτοιο ώστε η ενέργεια που εκπέμπεται σε χαμηλά επίπεδα να μειώνεται στο ελάχιστο.

Επιπλέον, χρησιμοποιούνται κεραίες που ανταποκρίνονται καλύτερα στις απαιτήσεις κάλυψης σε κάθετο επίπεδο, μειώνουν την ισχύ που έχει διεύθυνση σε αρνητικές γωνίες ανύψωσης ώστε να μειώσουν τις ανακλάσεις και διατηρούν ένα κοινό κέντρο φάσης για όλα τα διαγράμματα ακτινοβολίας σε δύο επίπεδα, κατά την ανύψωση και το αζιμούθιο.

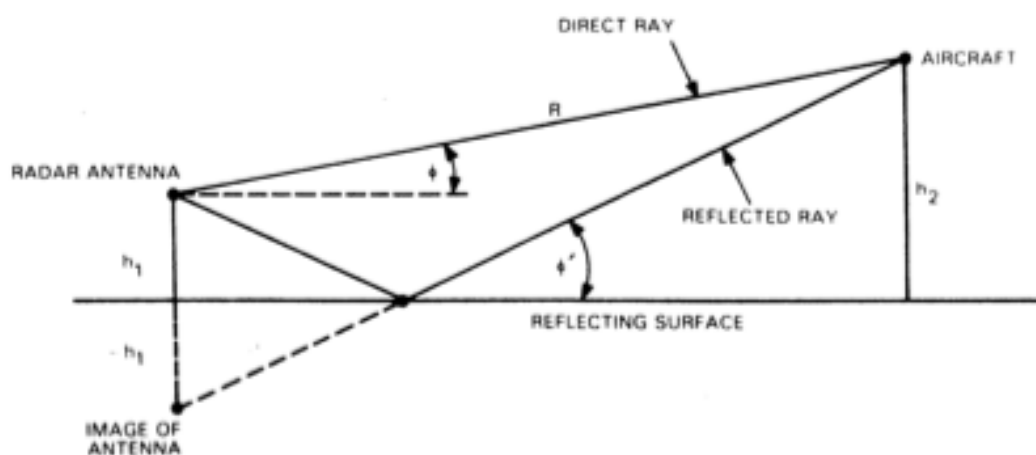
4. 4. 2 MULTIPATH

Το φαινόμενο κατά το οποίο το σήμα φτάνει από τον πομπό στο δέκτη μέσω περισσότερων της μίας διαδρομής ονομάζεται διάδοση πολλαπλών διαδρομών (multipath). Ανάμεσα σε αυτές τις διαδρομές, υπάρχει αυτή που το σήμα φτάνει στο δέκτη απευθείας και είναι η επιθυμητή διαδρομή, ενώ όλες οι υπόλοιπες είναι ανακλάσεις από το έδαφος ή τα κτίρια. Επειδή στο SSR, τα σήματα δεν είναι συνεχή αλλά αποτελούνται από σύντομους παλμούς, τα ανακλώμενα σήματα διαφέρουν αρκετά χρονικά από το απευθείας σήμα. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι όταν όλα αυτά φτάσουν με χρονοκαθυστέρηση στο δέκτη, μπορούν να οδηγήσουν σε λάθη αποκωδικοποίησης ή να φαίνεται ότι υπάρχουν περισσότεροι στόχοι από ότι στην πραγματικότητα.

Αν σε κοντινή απόσταση (μερικά χιλιόμετρα) από την κεφαλή του ραντάρ SSR υπάρχουν μεγάλες επιφάνειες που μπορεί να προκαλέσουν ανακλάσεις, το σήμα μπορεί να ανακλαστεί πάνω σε αυτές. Έτσι, η ερώτηση μπορεί να φτάσει σε ένα αεροσκάφος που δεν είναι στην κατεύθυνση της κεραίας. Ο transponder τότε θα απαντήσει και ένα μέρος της εκπομπής της απάντησης θα γυρίσει στην ανακλαστική επιφάνεια και από εκεί πίσω στην κεραία του ραντάρ. Όταν το ραντάρ θα επεξεργαστεί την απάντηση που δέχτηκε, θα εμφανίσει ψευδείς στόχους σε λανθασμένη θέση απόσταση και αζιμούθιο.

Το σήμα, αφού ανακλαστεί από το έδαφος, υφίσταται μια αλλαγή στη φάση. Αν η διαφορά του μήκους διαδρομής του σήματος που εκπέμφθηκε

κανονικά και του σήματος που ανακλάστηκε είναι $\lambda/2$, τότε το σήμα που φτάνει στο αεροσκάφος είναι πολύ μεγαλύτερο από το αναμενόμενο. Αν η διαφορά είναι λ , τότε το σήμα ακυρώνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες διακυμάνσεις του πλάτους και της φάσης, που είναι πολύ χειρότερες σε χαμηλές γωνίες ανύψωσης.



Εικόνα 4.7 Πολλαπλές Διαδρομές [5]

Ένας τρόπος αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος είναι η κατάλληλη τοποθέτηση της κεραίας του εδάφους σε σημείο ώστε να μην εμποδίζεται από μεγάλες ανακλαστικές επιφάνειες. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί σχεδιάζοντας κεραίες οι οποίες μειώνουν την ενέργεια που εκπέμπεται σε χαμηλά επίπεδα, με χρήση κέρδους που είναι προγραμματισμένο στο αζιμούθιο για ακόμα περισσότερη μείωση του κέρδους της κεραίας σε μικρή απόσταση από αζιμούθια που είναι γνωστό ότι παράγουν τις ανακλάσεις και τέλος με χρήση του Improved ISLS (IISLS ή I²SLS).

4. 5 ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΧΡΟΝΟΥ

Απαντήσεις που προέρχονται πέρα από το λειτουργικό εύρος του ραντάρ είναι πολύ πιθανό να προκύψουν λόγω της εξασθένισης ισχύος κατά τη διάρκεια

της εκπομπής από τον transponder (εξαρτάται από το $1/R^2$). Οι απαντήσεις δεύτερου χρόνου (second time around replies) θα είναι καθυστερημένες και το πιο πιθανό είναι να ληφθούν από τον δέκτη στο έδαφος, αφού έχει εκπεμφθεί από τον πομπό του ραντάρ η επόμενη ερώτηση. Έτσι, αυτές οι απαντήσεις θα είναι σε συγχρονισμό με την επόμενη ερώτηση και το αεροσκάφος θα φαίνεται πιο κοντά από ότι είναι στην πραγματικότητα.

Η συσκευή σάρωσης κέρδους απαλύνει αυτό το φαινόμενο, αλλά είναι απαραίτητο να χρησιμοποιείται εναλλασσόμενη PRF (staggered PRF) σε συνδυασμό με τον plot extractor, με σκοπό την αφαίρεση των απαντήσεων δεύτερου χρόνου. Η εναλλαγή βεβαιώνει ότι ακόμα και οι διαδοχικές απαντήσεις δεύτερου χρόνου δε συσχετίζονται ως προς το εύρος και κατ'επέκταση ο plot extractor δεν παράγει plots από αυτές.

4. 6 CAPTURE

Όσο ένα αεροσκάφος απαντά σε ερωτήσεις ενός interrogator, δεν μπορεί να απαντήσει στις ερωτήσεις κάποιου άλλου, μειώνοντας έτσι την ικανότητα ανίχνευσης του δεύτερου. Αφού ολοκληρωθεί ο κύκλος των απαντήσεων, θα πρέπει να μείνει ανενεργός για ένα διάστημα το πολύ 125 μs πριν απαντήσει σε ερωτήσεις άλλου interrogator.

4. 7 ΣΚΙΑΣΗ ΚΕΡΑΙΑΣ

Η κεραία του transponder είναι μικρή σε μέγεθος, είναι το $1/4$ του μήκους κύματος και τοποθετείται συνήθως κάτω από την άτρακτο του αεροσκάφους. Εξαιτίας του μεγέθους του αεροσκάφους, είναι πιθανό το αεροσκάφος να λειτουργεί σαν μάσκα για την κεραία, ανάλογα με τη θέση του σε σχέση με το σταθμό του ραντάρ. Αυτό παρατηρείται κυρίως σε χαμηλά επίπεδα όπου το αεροσκάφος ανιχνεύεται μόνο από ένα ραντάρ.

Για τον περιορισμό του φαινομένου κατά ένα βαθμό, σε μεγάλα αεροσκάφη υπάρχουν δύο κεραίες τοποθετημένες πάνω και κάτω από την άτρακτο. Στην περίπτωση της διπλής κεραίας, είτε λαμβάνουν και εκπέμπουν εναλλακτικά είτε η εκπομπή γίνεται από την κεραία που έλαβε την ισχυρότερη ερώτηση.

4. 8 ΥΠΕΡΦΟΡΤΩΣΗ TRANSPONDER

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή λειτουργίας του SSR, μετά από την εκπομπή μιας απάντησης υπάρχει μια νεκρή περίοδος των περίπου 125 μs, όπου ο transponder χρειάζεται για να επανέλθει ώστε να μπορέσει να δεχτεί καινούρια ερώτηση. Η υπερφόρτωση συμβαίνει λόγω του ότι ο transponder μπορεί να δεχτεί έναν πεπερασμένο αριθμό ερωτήσεων το δευτερόλεπτο (περίπου 2000 το μέγιστο) αν θέλουμε να αποφύγουμε την εσωτερική υπερθέρμανση.

4. 9 ΑΛΛΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Υπάρχουν επιπλέον περιορισμοί στην κάλυψη του ραντάρ που επιβάλλονται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος και από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συσκευών.

Ένα SSR σύστημα λειτουργεί στο φάσμα συχνοτήτων της L-band (1 – 2 GHz) χρησιμοποιώντας τις συχνότητες 1030 MHz και 1090 MHz. Στα αεροσκάφη υπάρχουν κάποιες συσκευές που ονομάζονται ραδιοβοηθήματα τα οποία συμβάλλουν στη σωστή λειτουργία και επικοινωνία με το έδαφος. Ένα από αυτά είναι το DME (Distance Measuring Equipment) το οποίο κάνει την αντίστροφη λειτουργία του SSR. Ένα DME λειτουργεί στο φάσμα συχνοτήτων 960 – 1215 MHz και παρά το ότι υπάρχουν ζώνες ασφαλείας (1021 – 1040 MHz

και 1085 – 1093 MHz), πολλές φορές μπορεί να παρεμβάλει στις συχνότητες λειτουργίας του SSR.

Ένα ακόμα πρόβλημα παρεμβολών συχνοτήτων προκύπτει από το γεγονός ότι το SSR λειτουργεί μαζί με το PSR. Για το λόγο αυτό ο σχεδιασμός λειτουργίας τους πρέπει να είναι γίνεται πολύ προσεκτικά ώστε η ακτινοβολία του πρωτεύοντος να μην παρεμβάλει στο δέκτη του SSR.

Άλλο ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζουν όλα τα ραντάρ είναι αυτό των νεκρών περιοχών (dead zones). Σε γενικότερο επίπεδο, προκύπτει από την καμπυλότητα της γης εξαιτίας της οποίας ένα ραντάρ μπορεί να μη δει στόχους εντός της εμβέλειάς του. Νεκρές περιοχές μπορεί να προκύψουν και από υψηλά εμπόδια που περιορίζουν την κάλυψη και δημιουργούν περιοχές μέσα στις οποίες δεν μπορούν να περάσουν τα σήματα από τον πομπό του ραντάρ. Αυτές οι περιοχές βρίσκονται συνήθως πίσω από λόφους, βουνά ή άλλα εμπόδια και αποτελούν νεκρές περιοχές μέσα στην κάλυψη του ραντάρ. Η μόνη μέθοδος μείωσης τέτοιων περιοχών είναι η τοποθέτηση πολλαπλών κεφαλών ραντάρ σε επιλεγμένα σημεία ώστε η κάλυψη του ενός να συμπληρώνει τα κενά του άλλου.

Η κεραία του ραντάρ παρουσιάζει ένα κενό κάλυψης πάνω από το ραντάρ εξαιτίας των περιορισμών της επίδοσης της κεραίας σε υψηλές γωνίες ανύψωσης. Το γεγονός αυτό δημιουργεί μια περιοχή κωνικού σχήματος μέσα στην οποία δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί ανίχνευση στόχων. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται κώνος σιγής. Το σημείο εγκατάστασης του ραντάρ πρέπει να είναι τέτοιο ώστε κώνος σιγής να περιέχεται μέσα στην κάλυψη γειτονικών ραντάρ ή τουλάχιστον η παρουσία του να μη δημιουργεί ιδιαίτερα προβλήματα στις υπηρεσίες που παρέχει το ραντάρ.

Οι σκόπιμες παρεμβολές, γνωστές ως Radar Jamming είναι άλλο ένα πρόβλημα στην ομαλή λειτουργία ενός ραντάρ. Ως σκόπιμη παρεμβολή θεωρείται οποιαδήποτε τεχνητή ακτινοβολία που διοχετεύεται σκοπίμως στο δέκτη του ραντάρ και έτσι προκύπτουν ψευδείς στόχοι. Τέτοιες παρεμβολές συνήθως πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια στρατιωτικών ασκήσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ / ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ SSR

5. 1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Ένα σύστημα δευτερεύοντος ραντάρ επιτήρησης εμφανίζει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με το πρωτεύον ραντάρ επιτήρησης. Το βασικότερο πλεονέκτημα είναι ότι εκτός από την ανίχνευση και τον υπολογισμό της απόστασης ενός αεροσκάφους, παρέχει επιπλέον πληροφορίες ταυτότητας και ύψους των αεροσκαφών που ανιχνεύει. Επίσης, η λειτουργία των ερωτήσεων και απαντήσεων σε διαφορετικές συχνότητες έχει ως αποτέλεσμα την αποφυγή των παρεμβολών από ανακλάσεις κάθε είδους. Άρα, δεν είναι ευάλωτο σε clutter. Ακριβώς επειδή η μονάδα του interrogator και η μονάδα του transponder λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες, δεν χρειάζεται να υπάρχει το MTI (Moving Target Indicator). Ένα ακόμη πρόβλημα που καταφέρνει να αποφύγει είναι αυτό των τυφλών ταχυτήτων (blind speeds).

Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι ένα τέτοιο σύστημα έχει μειωμένη ισχύ εκπομπής, αφού η εξασθένιση της ακτινοβολίας με την απόσταση είναι $1/R^2$, σε αντίθεση με την εξασθένιση κατά $1/R^4$ του πρωτεύοντος ραντάρ. Αποτέλεσμα της μειωμένης ισχύος εκπομπής είναι ότι ο πομπός είναι πιο απλός, πιο μικρός και πιο φθηνός. Επιπλέον, το σύστημα SSR βασίζεται σε ενεργά σήματα απάντησης, σε αντίθεση με τα παθητικά σήματα της ηχούς ενός πρωτεύοντος ραντάρ. Έτσι, τα ενεργά σήματα που φέρουν την απάντηση του transponder είναι υψηλής ισχύος και ο δέκτης του σταθμού εδάφους δε χρειάζεται να έχει μεγάλη ευασθησία.

Παρέχει πολύ καλή απεικόνιση του στόχου στην οθόνη, ακόμα και όταν ο στόχος βρίσκεται στο όριο κάλυψης του ραντάρ και έχει μεγαλύτερη ακρίβεια και ευκολία στην αναγνώριση του στόχου. Επίσης, δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της ραδιοδιατομής. Τέλος, ο σταθμός εδάφους είναι πιο μικρός σε διαστάσεις.

5. 2 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Όπως κάθε σύστημα ραντάρ, έτσι και το ένα SSR δεν μπορεί να αποφύγει προβλήματα και περιορισμούς στη λειτουργία και την απόδοσή του. Πρωταρχικό μειονέκτημα είναι ότι για να λειτουργήσει ένα SSR και να ανιχνεύσει στόχους στον εναέριο χώρο απαιτεί τη συνεργασία με τον ίδιο το στόχο. Έτσι, κάθε αεροσκάφος πρέπει να φέρει απαραίτητα μια μονάδα transponder για την επικοινωνία με τον σταθμό εδάφους. Στην περίπτωση που προκύψει βλάβη στον transponder, το ραντάρ δεν μπορεί να τον απεικονίσει στην οθόνη κι αυτό μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα.

Πιο συγκεκριμένα, ένας transponder δε θα απαντήσει σε μια ερώτηση του interrogator αν:

- είναι ήδη απασχολημένος στο να απαντάει σε κάποια άλλη ερώτηση.
- είναι ανενεργός μετά από την εκπομπή της απάντησης και σε αυτό το διάστημα (125 μs) δεν μπορεί να απαντήσει σε καμία ερώτηση που δέχεται, ο λεγόμενος νεκρός χρόνος (dead time)
- δεν δέχεται καμία ερώτηση over-interrogation, κάτι που συμβαίνει συνήθως σε περιβάλλον αυξημένης κίνησης
- βρίσκεται σε κατάσταση καταπίεσης (in suppression) γιατί η ερώτηση που έλαβε προήλθε από πλευρικό λοβό
- η κεραία του transponder υπόκειται στο φαινόμενο της σκίασης (antenna shadowing)

Είναι σαφές, λοιπόν ότι η λειτουργία του SSR είναι άμεσα συνδεδεμένη με αυτή του transponder που βρίσκεται στο αεροσκάφος και θα πρέπει να λειτουργούν και οι δύο πλευρές σωστά για να μην προκύψουν προβλήματα επικοινωνίας.

Το δευτερεύον ραντάρ μπορεί να καταφέρνει να αποφεύγει τις ανεπιθύμητες ανακλάσεις, αλλά δημιουργούνται άλλα φαινόμενα που πρέπει να αντιμετωπίσει. Έτσι, δεν αποφεύγει το φαινόμενο των ασύγχρονων απαντήσεων (FRUIT) και αυτό του garbling. Επίσης, δεν είναι δυνατό να αλλάξουν οι συχνότητες της επικοινωνίας, γιατί τότε παρουσιάζεται το φαινόμενο του jamming που επηρεάζει κι αυτό την επικοινωνία.

Το γεγονός ότι το δευτερεύον ραντάρ έχει μια κατευθυντική κεραία με στενό κύριο λοβό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πλευρικών λοβών που

μπορεί να οδηγήσουν σε σοβαρά προβλήματα στην επικοινωνία μεταξύ του ραντάρ και του στόχου, αλλά και στην ανίχνευση και απεικόνιση των στόχων. Τέλος, το SSR βασίζεται στο line of sight, το οποίο πολύ συχνά μπορεί να περιοριστεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΜΟΝΟΠΑΛΜΙΚΟ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝ ΡΑΝΤΑΡ

6. 1 ΣΚΟΠΟΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ

Κατά τον υπολογισμό του αζιμουθίου στον plot extractor του σταθμού εδάφους SSR παρατηρούνται σοβαρές διακυμάνσεις στην τιμή του. Για να πετύχει ο plot extractor μεγάλη ακρίβεια στον υπολογισμό του χρησιμοποιεί την τεχνική του ολισθαίνοντος παραθύρου (sliding window). Τα αποτελέσματα κατά κύριο λόγο είναι αρκετά καλά. Αν όμως ληφθεί υπόψη ότι στον plot extractor πολλές φορές τα δεδομένα που λαμβάνονται δεν είναι σωστά, όπως αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4, τότε χρειάζεται η δημιουργία ενός συστήματος που να ξεπερνάει αυτό το πρόβλημα.

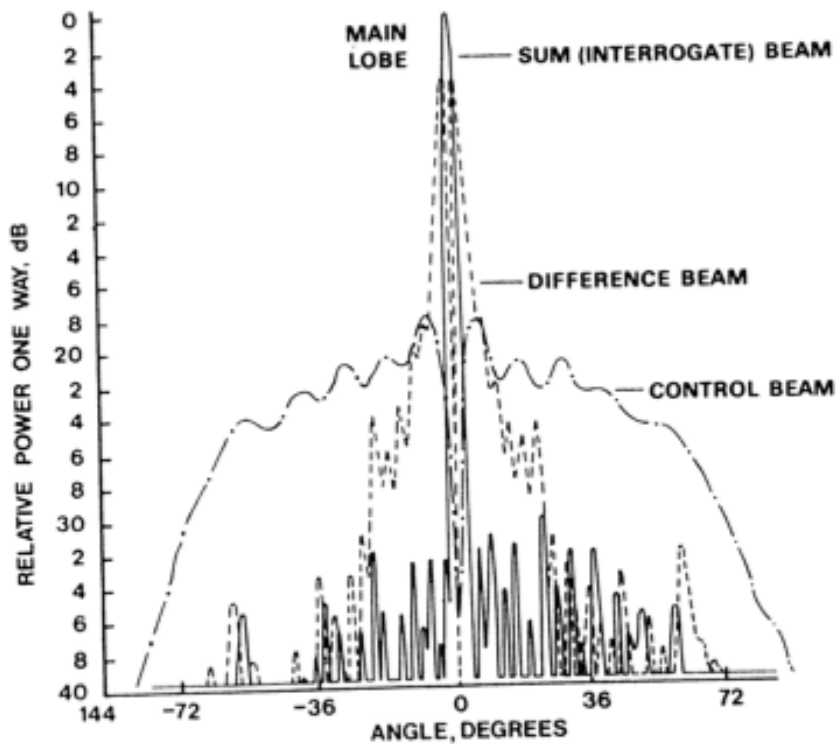
Η ανάπτυξη του μονοπαλμικού SSR (MSSR) επιτρέπει να γίνεται ακριβής υπολογισμός της γωνίας από την οποία φτάνει το σήμα από τον transponder του αεροσκάφους στο ραντάρ στο έδαφος με τη χρήση ενός μόνο παλμού κατά τη λήψη μιας απάντησης. Έτσι, μπορεί να επιτευχθεί μείωση της PRF που βελτιώνει τη λειτουργία του SSR και μειώνει τις παρεμβολές. Ουσιαστικά, το μονοπαλμικό SSR είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της γωνίας άφιξης ενός μόνο παλμού της απάντησης που λήφθηκε μέσα στο εύρος δέσμης της κεραίας.

Στην πράξη, η τεχνική αυτή είναι πάρα πολύ σημαντική για τον σύγχρονο έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας και όλα τα συστήματα δευτερευόντων ραντάρ επιτήρησης χρησιμοποιούν τη μονοπαλμική τεχνική.

6. 2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Όπως το SSR, έτσι και το μονοπαλμικό SSR βασίζεται στην αποστολή των παλμών P1, P3 και του παλμού ελέγχου P2. Η διαφορά βρίσκεται στο διάγραμμα

ακτινοβολίας της κεραίας. Στην περίπτωση της μονοπαλμικής τεχνικής υπάρχουν τρεις δέσμες και όχι δύο. Η δέσμη που φέρει την ερώτηση (κύριος λοβός) εδώ ονομάζεται δέσμη του αθροίσματος (sum beam). Η δέσμη που χρησιμοποιείται για την καταπίεση των πλευρικών λοβών συνεχίζει να υπάρχει όπως και στο απλό σύστημα SSR. Η τρίτη δέσμη που προστέθηκε ονομάζεται δέσμη της διαφοράς (difference beam). Στην *Εικόνα 6.1* που ακολουθεί φαίνονται οι τρεις δέσμες του μονοπαλμικού SSR.



Εικόνα 6.1 Δέσμες MSSR [5]

Η έξοδος της δέσμης αυτής από την κεραία στα κυκλώματα του ραντάρ συνδέεται σε διαφορετικό δέκτη. Οι δέσμες του αθροίσματος και της διαφοράς είναι πολύ κοντά η μία στην άλλη, γιατί είναι συμμετρικές ως προς το κέντρο της δέσμης. Έτσι, αν ένα σήμα απάντησης δε ληφθεί στο κέντρο της μιας δέσμης αλλά παραπλεύρως, τότε θα ανιχνευτεί και από τις δύο και υπολογίζεται από τη σχετική φάση ανάμεσα στη δέσμη αθροίσματος και τη δέσμη διαφοράς. Άρα, θα μπορούσαμε να πούμε ότι η δέσμη του αθροίσματος χρησιμοποιείται για την εκπομπή των ερωτήσεων, ενώ και οι δύο δέσμες χρησιμοποιούνται για τη λήψη

των απαντήσεων. Η γωνία μεταξύ του άξονα της κεραίας (άξονας σκόπευσης – boresight) και της κατεύθυνσης του αεροσκάφους είναι γνωστή ως γωνία off-boresight (OBA), όταν το αεροσκάφος δεν βρίσκεται πάνω στον άξονα της κεραίας. Η γωνία αυτή υπολογίζεται από έναν επεξεργαστή που ονομάζεται OBA processor. Επίσης, για να εξασφαλιστεί η ακριβής γωνία των σημάτων που έρχονται από διευθύνσεις διαφορετικές από αυτή της σκόπευσης (off-boresight), η αναλογία του αθροίσματος και της διαφοράς θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο σταθερή για οποιαδήποτε γωνία.

Ο δέκτης του μονοπαλμικού SSR θα αποτελείται από τρία κανάλια, ένα για το άθροισμα, ένα για τη διαφορά και άλλο ένα για τον έλεγχο που καταστέλει τους πλευρικούς λοβούς (χρήση RSLs).

Στη συνέχεια, τα δεδομένα που λαμβάνονται από το MSSR στέλνονται στον plot extractor. Εδώ, ο plot extractor εκτελεί τις ίδιες διαδικασίες όπως στο SSR, δηλαδή ανιχνεύει στόχους, εξάγει τα δεδομένα απάντησης, συνδυάζει τις απαντήσεις για να δημιουργήσει στόχους και απορρίπτει τις ασύγχρονες, αλλά με περισσότερη ακρίβεια.

Τα επιπλέον δεδομένα που προέρχονται από το κανάλι της διαφοράς και παίρνει ο plot extractor είναι μεγάλης σημασίας για τον καθορισμό του αριθμού των απαντήσεων και για την αντιστοίχιση των λαμβανόμενων παλμών στις σωστές απαντήσεις.

6. 3 PLOT EXTRACTOR

Η μονοπαλμική τεχνική υπολογίζει για κάθε παλμό τη διεύθυνση από την οποία έφτασε στο ραντάρ. Αυτή η διαδικασία είναι πολύ χρήσιμη για τον ακριβή προσδιορισμό της διόπτεισης των αεροσκαφών σε ένα σύστημα SSR. Στην περίπτωση του plot extractor ενός συμβατικού SSR, είναι απαραίτητο να ληφθεί μια σειρά απαντήσεων για κάθε ερώτηση που εκπέμπεται και αν αυτές φαίνεται να επικαλύπτονται, τότε απορρίπτονται από το σύστημα. Αντίθετα, ο plot extractor του μονοπαλμικού συστήματος εκχωρεί ένα garble bit σε κάθε παλμό της απάντησης που δέχεται κάτι που επιτρέπει να χρησιμοποιηθούν οι παλμοί

που δεν έχουν παραμορφωθεί. Κάθε παραμορφωμένος (garbled) παλμός μπορεί να επιλυθεί είτε με αναφορά σε μεταγενέστερες απαντήσεις είτε με τη χρήση δεδομένων που έχουν εξαχθεί από την επεξεργασία προηγούμενων απαντήσεων. Αυτό σημαίνει ότι για την ανίχνευση των στόχων με αξιοπιστία αρκούν μόνο δύο απαντήσεις από αυτούς. Τα σήματα που λαμβάνονται συγκρίνονται ως προς το πλάτος και τη φάση τους.

Αν στον plot extractor φτάσει μια παλμοσειρά που διαρκεί παραπάνω από αυτή της μίας απάντησης ($>20.3 \mu\text{s}$), τότε σημαίνει ότι υπάρχει παραπάνω από ένα αεροσκάφος που ανιχνεύεται, αλλά οι απαντήσεις τους είναι επικαλυπτόμενες. Θα μπορούσε πολύ εύκολα να εντοπιστεί το ζεύγος των παλμών πλαισίου F1 και F2 σε διαφορετικά σημεία με αποτέλεσμα την εξαγωγή λανθασμένων αποτελεσμάτων, ακόμα και την απόρριψη όλων των απαντήσεων. Εδώ ακριβώς βοηθάει το σήμα από το κανάλι της διαφοράς, η επεξεργασία του οποίου δίνει την αναλογία αθροίσματος και διαφοράς και προσδιορίζει πόσες απαντήσεις υπάρχουν.

Όταν ο χρονισμός ενός παλμού απάντησης είναι τέτοιος ώστε να φαίνεται ότι ανήκει σε περισσότερες από μία απαντήσεις, τότε αντιμετωπίζεται με προσοχή, επισημαίνεται ως αμφιβόλου εγκυρότητας και στη συνέχεια γίνεται επεξεργασία για να εξακριβωθεί η αξιοπιστία του.

6. 4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ MSSR

Το μονοπαλμικό SSR έχει τρία σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση το συμβατικό SSR [7].

Πρώτο και βασικό πλεονέκτημα ενός μονοπαλμικού συστήματος SSR είναι η αυξημένη ακρίβεια στον υπολογισμό του αζιμουθίου σε σχέση με την τεχνική του ολισθαίνοντος παραθύρου. Η μονοπαλμική τεχνική παρέχει άριστη επιτήρηση σε περιβάλλοντα με αυξημένη κυκλοφορία και υψηλούς ρυθμούς ερωτήσεων, σε αντίθεση με την τεχνική του ολισθαίνοντος παραθύρου που σε ένα τέτοιο περιβάλλον επιδεινώνεται. Η διακριτική ικανότητα στον υπολογισμό

του αζιμουθίου είναι 1 λεπτό της μοίρας, που στην τεχνική ολισθαίνοντος παραθύρου είναι 12 λεπτά της μοίρας.

Δεύτερον, είναι οι βελτιωμένες επιδόσεις στην περίπτωση του φαινομένου garbling. Αυτό συμβαίνει γιατί στο μονοπαλικό δευτερεύον ραντάρ γίνεται χρήση επιπλέον πληροφοριών κατά την επεξεργασία των απαντήσεων, εξασφαλίζοντας την αποφυγή παραμορφώσεων των παλμών και την ακεραιότητα των δεδομένων. Κάθε παλμός της απάντησης φέρει και το αζιμουθίο του. Έτσι, όταν οι παλμοί από συνεχόμενες απαντήσεις συγκρίνονται μεταξύ τους για να ανιχνευτεί απάντηση, τότε θα γίνει σύγκριση του αζιμουθίου που φέρουν. Αν είναι διαφορετικό, τότε θα απορριφθεί ο συνδυασμός και επομένως και το garbling.

Τέλος, ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ο μειωμένος ρυθμός ερωτήσεων. Η μεγαλύτερη ακρίβεια επιτρέπει τη χρήση μικρότερων παραθύρων συσχέτισης και λιγότερες επαναλήψεις των κωδικών για την πιστοποίησή τους. Η μονοπαλική επεξεργασία ανιχνεύει και αποκωδικοποιεί στόχους χρησιμοποιώντας το λιγότερο δύο απαντήσεις ανά mode A και mode C. Αυτό συνεπάγεται μείωση της PRF με σημαντικά οφέλη για την χωρητικότητα του καναλιού και στην αντιμετώπιση του fruit.

6. 5 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ MSSR

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στη συνέχεια είναι ενδεικτικές τιμές ενός μονοπαλικού δευτερεύοντος συστήματος επιτήρησης του σταθμού εδάφους.

Χαρακτηριστικά	Ενδεικτικές Τιμές
System Range	0.5 – 256 NM
Operational Altitude	100,000 ft
Ground Station Capacity	400 αεροσκάφη/σάρωση
Probability of Detection	99%

Target Separation (En Route)	min 3 NM
Modes	1, 2, 3/A, B, C, D, S
Code Validity	99%
Frequency	1030 MHz uplink – 1090 MHz downlink
Peak Power	1.6 – 3.2 kW
Transmitter Output Power	33dBW
Range Resolution	360 ft
Range Accuracy	95 ft rms
Azimuth Resolution	0.5° - 1°
Azimuth Accuracy	±0.07° rms
Altitude Resolution (mode C)	25 ft
Antenna Beamwidth	2.5°
Antenna Gain	> 27 dBi
Antenna Rotation Rate	12/15 rpm
Elevation Angle	0.5° - 45°
Antenna Side Lobes	- 24 dB
Side Lobe Suppression	RSLs, ISLS, IISLS
Receiver Sensitivity	- 88 dBm
Polarization	vertical
Temperature	-50°C - +65°C

Πίνακας 6. 1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά MSSR

Το κέρδος της κεραίας (antenna gain) που αναγράφεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά, αντιστοιχεί στη δέσμη του αθροίσματος. Για τη δέσμη της διαφοράς το κέρδος θα είναι 2 dB κάτω από της δέσμης αθροίσματος και για τη δέσμη ελέγχου θα είναι μεγαλύτερο από 6 dB πάνω από τους πλευρικούς λοβούς της δέσμης αθροίσματος η οποία είναι και η κύρια δέσμη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – MODE S

7.1 ΣΚΟΠΟΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ

Με την πάροδο των χρόνων, ο αριθμός των αεροσκαφών αυξήθηκε σε μεγάλο βαθμό και μαζί με αυτόν αυξήθηκαν και τα προβλήματα που προέρχονται από το fruit και από το garbling, περιορίζοντας αρκετά την ομαλή λειτουργία του SSR συστήματος. Μία λύση που προτάθηκε ήταν να γίνονται ερωτήσεις σε κάθε αεροσκάφος ξεχωριστά έτσι ώστε οι απαντήσεις από διαφορετικά αεροσκάφη να διαχωρίζονται. Στόχος ήταν να απαιτείται σε μία σάρωση μόνο μία απάντηση ανά αεροσκάφος και η απάντηση αυτή θα περιέχει δεδομένα ταυτότητα και ύψους μαζί, ώστε να αποφευχθεί ο συσχετισμός των απαντήσεων σε mode A και mode C, όπως γινόταν μέχρι τότε, και να μειωθεί ο ρυθμός των απαντήσεων και συνεπώς τα fruit. Έτσι, δημιουργήθηκε η ανάγκη για μεγαλύτερο αυτοματισμό και έλεγχο από το έδαφος, χρησιμοποιώντας περισσότερα δεδομένα εκτός από την ταυτότητα και το ύψος.

Ο νέος τρόπος λειτουργίας που αναπτύχθηκε, mode S, είναι συμβατός με τα υπάρχοντα συστήματα SSR που χρησιμοποιούν τους mode A και mode C, γιατί χρησιμοποιεί τις ίδιες συχνότητες για την εκπομπή ερωτήσεων (1030 MHz) και για τη λήψη απαντήσεων (1090 MHz), χωρίς να απαιτεί την τροποποίηση του υπάρχοντα εξοπλισμού [5]. Επίσης, τα αεροσκάφη δε χρειάζεται να φέρουν επιπλέον εξοπλισμό.

Ένα σύστημα SSR που χρησιμοποιεί mode S καταφέρνει να επιλύσει αρκετά από τα προβλήματα που υπάρχουν σε ένα σύστημα SSR που χρησιμοποιεί mode A και mode C. Όλες οι απαραίτητες πληροφορίες εμπεριέχονται σε μία και μόνο απάντηση, η ακρίβεια των οποίων επιβεβαιώνεται από την ισοτιμία. Επίσης, με το mode S το σύστημα δε θα παράγει πολλαπλές σύγχρονες απαντήσεις για την ανίχνευση ενός αεροσκάφους. Επιπλέον, ο σταθμός εδάφους λειτουργεί με χαμηλότερη ισχύ

εκπομπής από ότι ένας Mode A/C και έχει πολύ καλή επίδοση στο off-boresight όπως το MSSR.

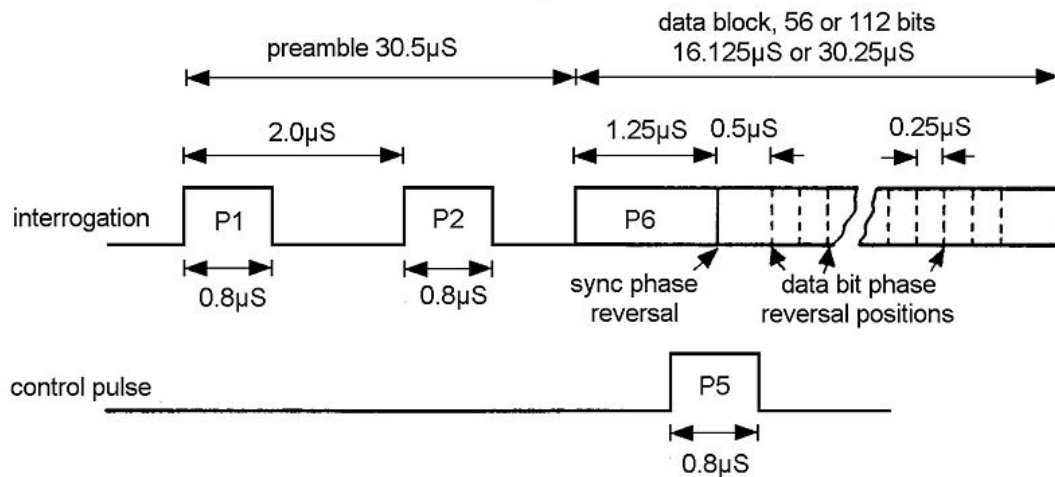
7. 2 ΔΟΜΗ ΕΡΩΤΗΣΗΣ MODE S

Η ερώτηση ξεκινά με τους παλμούς P1 και P2, όπως ακριβώς είναι και στο mode A και C. Έτσι, οι παλμοί αυτοί έχουν διάρκεια 0.8 μ s ο καθένας και απέχουν μεταξύ τους 2 μ s και εκπέμπονται από την κύρια δέσμη. Με το τρόπο αυτό, ένας transponder που δεν είναι mode S, όταν θα λάβει αυτούς τους παλμούς θα κατασταλεί και δε θα απαντήσει στην ερώτηση. Εδώ, ο transponder θα θεωρήσει ότι η ερώτηση αυτή προήλθε από πλευρικούς λοβούς, αφού δεν ικανοποιείται το κριτήριο $P2 < P1$. Μετά από 1.5 μ s από τον παλμό P2 ακολουθεί ο παλμός P6 με διάρκεια 16.25 μ s (short) ή 30.25 μ s (long) [5], ο οποίος αποτελείται από έναν αριθμό μεταβολών φάσεων (phase reversals) οι οποίες φέρουν την πληροφορία προς εκπομπή (Εικόνα 7. 1). Η πρώτη αντιστροφή φάσης συγχρονισμού εμφανίζεται 2.75 μ s μετά τον παλμό P2 και χρησιμοποιείται από τον transponder για να συγχρονίσει το ρολόι του με σκοπό να αποκωδικοποιήσει σωστά τα δεδομένα. Ο interrogator υπολογίζει την απόσταση του στόχου μετρώντας την καθυστέρηση μεταξύ της εκπομπής της φάσης συγχρονισμού και της λήψης του πρώτου παλμού της απάντησης.

Οι μεταβολές φάσης παίρνουν τιμές από 0° έως 180°. Για 0° αντιστοιχεί το bit 0 που σημαίνει ότι δεν υπήρξε μεταβολή φάσης. Για 180° αντιστοιχεί το bit 1 που σημαίνει ότι υπήρξε μεταβολή της φάσης. Έτσι, η κωδικοποίηση της ερώτησης βασίζεται στις μεταβολές της φάσης και όχι στο πλάτος των παλμών. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως DPSK (Differential Phase Shift Keying). Οι θέσεις των μεταβολών φάσης έχουν απόσταση 0.25 μ s μεταξύ τους. Ο συνολικός αριθμός δεδομένων που αποστέλλεται είναι είτε 56 bits είτε 112 bits.

Στο mode S, η καταπίεση των πλευρικών λοβών γίνεται με τη χρήση του παλμού P5, ο οποίος εμφανίζεται 0.4 μ s πριν από την αντιστροφή φάσης συγχρονισμού και εκπέμπεται από δέσμη ελέγχου επικαλύπτοντας την αντιστροφή φάσης συγχρονισμού. Αυτό σημαίνει ότι όταν ο παλμός P5 είναι πιο

ισχυρός από τον παλμό P6, τότε ο transponder δε θα μπορέσει να ανιχνεύσει τη μεταβολή φάσης συγχρονισμού και η ερώτηση που έλαβε ήταν από πλευρικό λοβό οπότε δε θα απαντήσει.



Εικόνα 7. 1 Δομή Ερώτησης Mode S, Πηγή: en.wikipedia.org

Τα 24 τελευταία bits της ερώτησης υποδεικνύουν τη διεύθυνση (address) του αεροσκάφους στο οποίο απευθύνεται η ερώτηση, γιατί ο transponder θα απαντήσει μόνο σε μια ερώτηση που περιλαμβάνει την διεύθυνσή του. Επομένως, ένας interrogator θα πρέπει να την γνωρίζει.

7. 2. 1 ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ INTERMODE

Εκτός από τις ερωτήσεις Mode A/C που αφορούν transponders mode A/C, υπάρχουν και ερωτήσεις που αφορούν όλους τους τύπους transponder και ονομάζονται intermode interrogations (all-call) [7]. Αυτές χωρίζονται στις Mode A/C/S all-call οι οποίες έχουν σκοπό να εντοπίσουν τους transponders mode S και τις Mode A/C-only all-call που παίρνουν πληροφορίες από τους transponders mode A/C, ενώ οι transponders mode S δεν απαντούν.

Στις ερωτήσεις αυτές, η δομή των οποίων είναι ίδια με αυτή των ερωτήσεων mode A/C, υπάρχει ένας επιπλέον παλμός, ο P4, ο οποίος εμφανίζεται 2 μs μετά τον παλμό P3 και έχει διάρκεια είτε 0.8 μs για τις ερωτήσεις Mode A/C/S all-call είτε 1.6 μs για τις ερωτήσεις Mode A/C-only all-call. Όταν ένας transponder mode S θα λάβει μια ερώτηση intermode, θα μετρήσει τη διάρκεια του παλμού P4 και θα απαντήσει μόνο όταν θα είναι ίση με 1.6 μs.

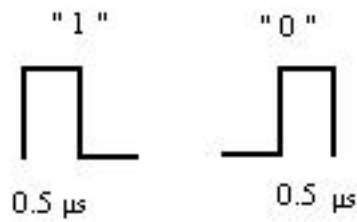
7. 2. 2 ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ MODE S

Αυτές οι ερωτήσεις αφορούν αποκλειστικά transponders mode S και χωρίζονται σε Mode S-only all call [7] για τη λήψη απαντήσεων ώστε να εντοπιστούν όλοι οι transponders mode S, σε Broadcast για τη μετάδοση πληροφοριών σε όλους τους transponders mode S και σε Selective για την επιτήρηση και την επικοινωνία με τέτοιους transponders ξεχωριστά.

7. 3 ΔΟΜΗ ΑΠΑΝΤΗΣΗΣ MODE S

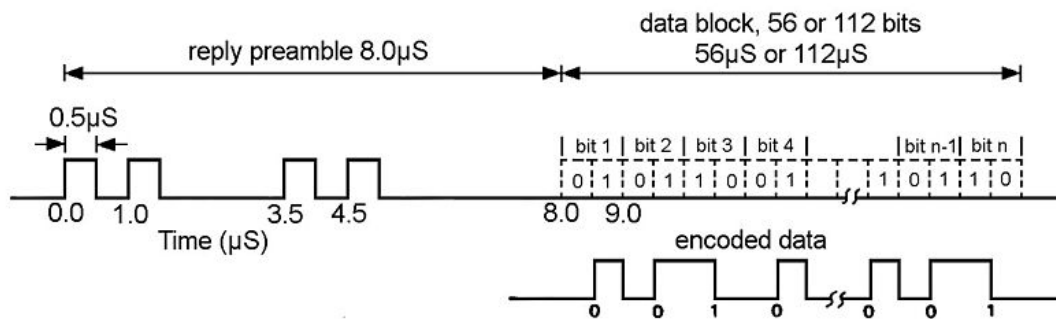
Η απάντηση mode S είναι αρκετά μεγάλη με διάρκεια 64 μs ή 120 μs. Αποτελείται από δύο μέρη, το πρόθεμα και το μπλοκ δεδομένων. Το πρόθεμα έχει σταθερή διάρκεια 8 μs και περιλαμβάνει τέσσερις παλμούς με διάρκεια 0.5 μs που υποδεικνύουν την ύπαρξη απάντησης. Όπως φαίνεται στην *Εικόνα 7. 3*, ο πρώτος παλμός εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 0, ο δεύτερος στο 1 μs, ο τρίτος στα 3.5 μs και ο τέταρτος στα 4.5 μs.

Στη συνέχεια ακολουθεί το μπλοκ των δεδομένων, στα οποία γίνεται διαμόρφωση θέσης παλμού (Pulse Position Modulation – PPM). Κάθε θέση bit έχει διάρκεια 1 μs. Η μορφή των δυαδικών 1 και 0 φαίνεται στην *Εικόνα 7. 2* που ακολουθεί.



Εικόνα 7. 2 Μορφή Δυαδικών Παλμών

Κάθε bit χωρίζεται σε δύο ίσα μέρη διάρκειας 0.5 μs. Στα πρώτα 0.5 μs εμφανίζεται ο παλμός (υποδηλώνοντας “1” με παρουσία παλμού και “0” με απουσία παλμού) και στα επόμενα 0.5 μs είναι ο ίδιος παλμός ανεστραμμένος. Αυτός ο τρόπος κωδικοποίησης της πληροφορίας είναι πολύ αποτελεσματικός στην καταπολέμηση των παρεμβολών. Η εγκυρότητα και η ποιότητα των παλμών της απάντησης επιβεβαιώνεται με την τεχνική της ισοτιμίας.



Εικόνα 7. 3 Δομή Απάντησης Mode S, Πηγή: en.wikipedia.org

Ο mode S transponder ενός αεροσκάφους λαμβάνει και αποκωδικοποιεί ερωτήσεις mode A/C και mode S, αναγνωρίζοντας ποιες mode S ερωτήσεις απευθύνονται σε αυτόν. Αφού καθορίσει τον τύπο της ερώτησης, θα στείλει την κατάλληλη mode A/C ή mode S απάντηση.

Στην περίπτωση του mode S transponder, χρησιμοποιούνται δύο κεραίες στο αεροσκάφος. Μία στην πάνω μεριά της ατράκτου και μία στην κάτω, έτσι ώστε τουλάχιστον μία να είναι ορατή από τον σταθμό εδάφους. Έτσι, υπάρχουν

δύο δέκτες και ένας διακόπτης ο οποίος συνδέει τον πομπό με μία από τις δύο κεραίες. Τα σήματα από τις δύο κεραίες εξετάζονται και με μια λογική διαδικασία επιλογής, επιλέγεται το δυνατότερο σήμα και ο διακόπτης θα ενεργοποιήσει την εκπομπή της απάντησης στην αντίστοιχη κεραία που λήφθηκε το δυνατό σήμα. Εξαιτίας της ανάγκης για ταυτόχρονη λειτουργία των κεραιών, η μέγιστη καθυστέρηση λήψης ανάμεσα στους δύο δέκτες θα πρέπει να είναι 125 ns ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητα αποτελέσματα.

7. 4 ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ΙΣΟΤΙΜΙΑΣ

Για την προστασία των μηνυμάτων που μεταφέρονται στις ερωτήσεις και τις απαντήσεις χρησιμοποιείται ο έλεγχος της ισοτιμίας. Το πεδίο της πληροφορίας που είναι είτε 32 bit για short εκπομπές (56 bits) είτε 88 bit για long εκπομπές (112 bits) μεταδίδεται χωρίς καμία τροποποίηση. Όπως ορίζεται στο Annex 10 του ICAO [6], δημιουργείται μία ακολουθία από 24 bits ελέγχου ισοτιμίας μέσω του πολυωνύμου

$$G(x) = 1 + x^3 + x^{10} + x^{12} + x^{13} + x^{14} + x^{15} + x^{16} + x^{17} + x^{18} + x^{19} + x^{20} + x^{21} + x^{22} + x^{23} + x^{24}$$

Αυτά τα 24 bits ενσωματώνονται στο πεδίο που διαμορφώνεται από τα τελευταία 24 bits κάθε εκπομπής. Κατόπιν, η ακολουθία θα συνδυαστεί είτε με την κωδικοποίηση της διεύθυνσης είτε με την κωδικοποίηση του αναγνωριστικού του interrogator. Από τον συνδυασμό αυτό προκύπτουν τα πεδία AP (address/parity) και PI (parity/interrogator identifier).

Το πεδίο AP εμφανίζεται στο uplink και στο downlink και περιέχει την ισοτιμία για τη διεύθυνση (address) του αεροσκάφους, ενώ το πεδίο PI υπάρχει μόνο στο downlink και περιέχει την ισοτιμία για την αναγνώριση του interrogator.

Η ισοτιμία υπολογίζεται και κατά την αποστολή όπου συνδυάζεται με τη διεύθυνση του αεροσκάφους και ενσωματώνεται στο μήνυμα, και κατά τη λήψη

όπου συγκρίνεται με τη συνδυασμένη ισοτιμία και τη διεύθυνση που είναι ενσωματωμένες στο μήνυμα. Αποτέλεσμα είναι η επιβεβαίωση ότι το μήνυμα εκπέμφθηκε χωρίς λάθη.

7. 5 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ

Για την άριστη επικοινωνία και τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ του σταθμού εδάφους και των αεροσκαφών και αντίστροφα, δημιουργήθηκαν πρωτόκολλα επικοινωνίας τα οποία λειτουργούν ως ασπίδα ασφάλειας επιβεβαιώνοντας τη σωστή συνεργασία των δύο οντοτήτων. Σε ένα σύστημα που υποστηρίζει Mode S υπάρχει μια ζεύξη δεδομένων (data link) πάνω στην οποία σταθμός εδάφους και αεροσκάφη ανταλλάσσουν μηνύματα όλων των τύπων, όπως οδηγίες και παραμέτρους για την πτήση.

Το πρωτόκολλο SLM (Standard Length Message) χρησιμοποιεί μεγάλου μήκους ερωτήσεις και απαντήσεις, κάθε μία περιέχει ένα πεδίο μηνύματος 56 bit [7]. Το uplink κανάλι του SLM είναι γνωστό ως Comm-A (Comm-A interrogation), πάνω στο οποίο στέλνονται ερωτήσεις στον transponder οι οποίες πρέπει να αναγνωριστούν απαραίτητα με μία απάντηση. Το downlink κανάλι του SLM ονομάζεται Comm-B (Comm-B reply) και φέρει απαντήσεις από τον transponder. Το SLM παρέχει μέχρι 4 Comm-A ή Comm-B τμήματα (segments) να είναι λογικά συνδεδεμένα.

Ένα άλλο πρωτόκολλο είναι το ELM (Extended Length Message) το οποίο παρέχει χαμηλότερο overhead και πιο αποτελεσματική χρήση της χωρητικότητας του καναλιού [7]. Το uplink κανάλι του ονομάζεται Comm-C (Comm-C interrogation) και το downlink κανάλι Comm-D (Comm-D reply) καθένα από τα οποία περιέχει ένα πεδίο δεδομένων 80 bit. Το ELM παρέχει μέχρι 16 Comm-C ή Comm-D τμήματα να είναι λογικά συνδεδεμένα. Η μεταφορά των μηνυμάτων αναγνωρίζεται μετά την αποστολή του τελευταίου τμήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

8.1 ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός της προσομοίωσης ήταν η σύγκριση των απαιτήσεων σε ισχύ εκπομπής δύο διαφορετικών συστημάτων ραντάρ και πώς αυτή μεταβάλλεται με την απόσταση, αλλάζοντας τις τιμές της ραδιοδιατομής σ και του κέρδους G , με ίδιες κεραίες για εκπομπή και λήψη ($G_{TX} = G_{RX}$). Η προσομοίωση έγινε για την εξίσωση ραντάρ που περιλαμβάνει τον συντελεστή θορύβου F_n και το λόγο σήματος προς θόρυβο S_o/N_o στην έξοδο του δέκτη, δηλαδή την

$$R = \left[\frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 k T B F_n L (S_o/N_o)_{min}} \right]^{\frac{1}{4}}$$

όπως αυτή αναλύεται στην παράγραφο 1.3. Αντικαθιστώντας το μήκος κύματος λ με τη σχέση που το συνδέει με τη συχνότητα f ,

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

όπου u η ταχύτητα διάδοσης του κύματος ($u = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$) και λύνοντας την εξίσωση ραντάρ ως προς την ισχύ εκπομπής P_t , τότε προσκύπτει ότι η ισχύς εκπομπής θα είναι

$$P_t = \frac{R^4 (4\pi)^3 k T B F_n L (S_o/N_o)_{min}}{G^2 \sigma (u/f)^2}$$

8. 2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

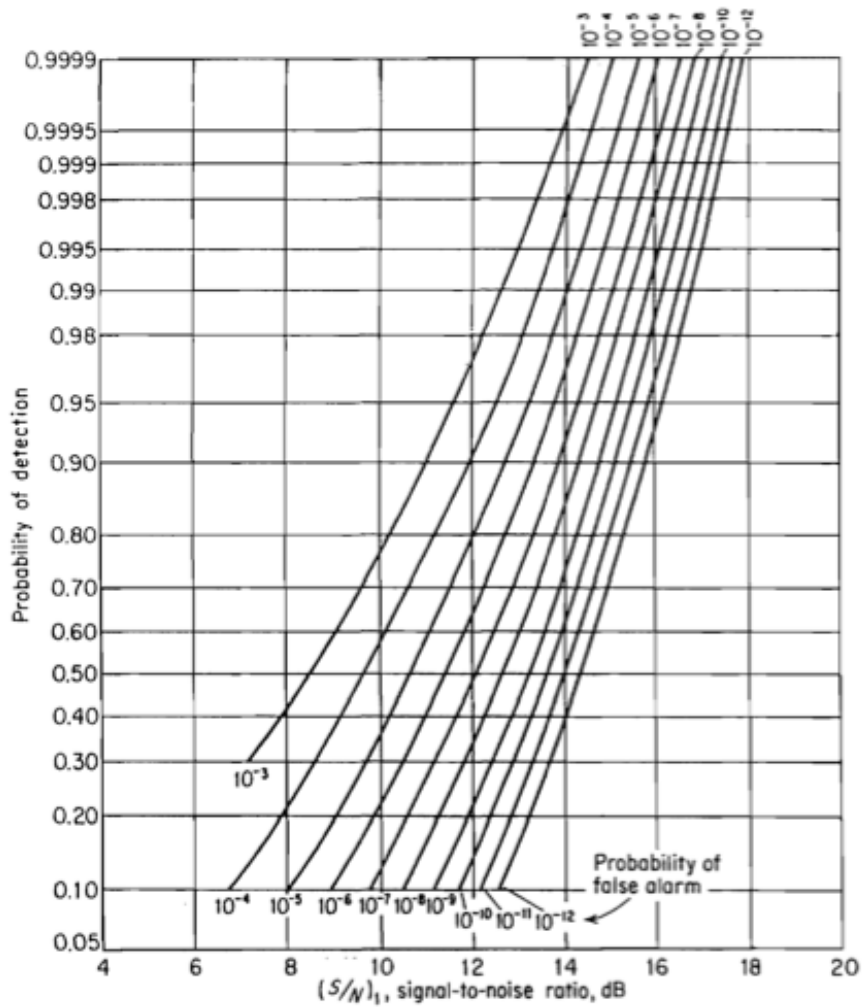
Για την προσομοίωση, επιλέχθηκε ένα πρωτεύον ραντάρ επιτήρησης (terminal PSR) που λειτουργεί στην S-band (Πηγή: www.bwea.com) και ένα μονοπαλικό δευτερεύον ραντάρ επιτήρησης (en route MSSR) που λειτουργεί στην L-band (Πηγή: www.eldis.cz).

Οι παράμετροι της προσομοίωσης των δύο ραντάρ φαίνονται στον Πίνακα 8.1. Για την περίπτωση που η ραδιοδιατομή παίρνει τις τιμές 2, 5, 20 και 100 m², το κέρδος του PSR και MSSR θα είναι 34 και 30 dB αντίστοιχα. Για την περίπτωση που το κέρδος παίρνει τις τιμές 30, 34, 36 και 40 dB, η ραδιοδιατομή θα είναι 5 m² και για τα δύο ραντάρ.

Παράμετροι	PSR S-band	MSSR L-band
Εύρος Ζώνης B	400 MHz	10 MHz
Συχνότητα Λειτουργίας f	2.8 GHz	1.03 GHz
Συντελεστής Θορύβου F _n	5 dB	5 dB
Απώλειες L	6 dB	6 dB
SNR	13 dB	14.7 dB
Απόσταση R	1 – 111 km	1 – 475 km

Πίνακας 8. 1 Παράμετροι προσομοίωσης

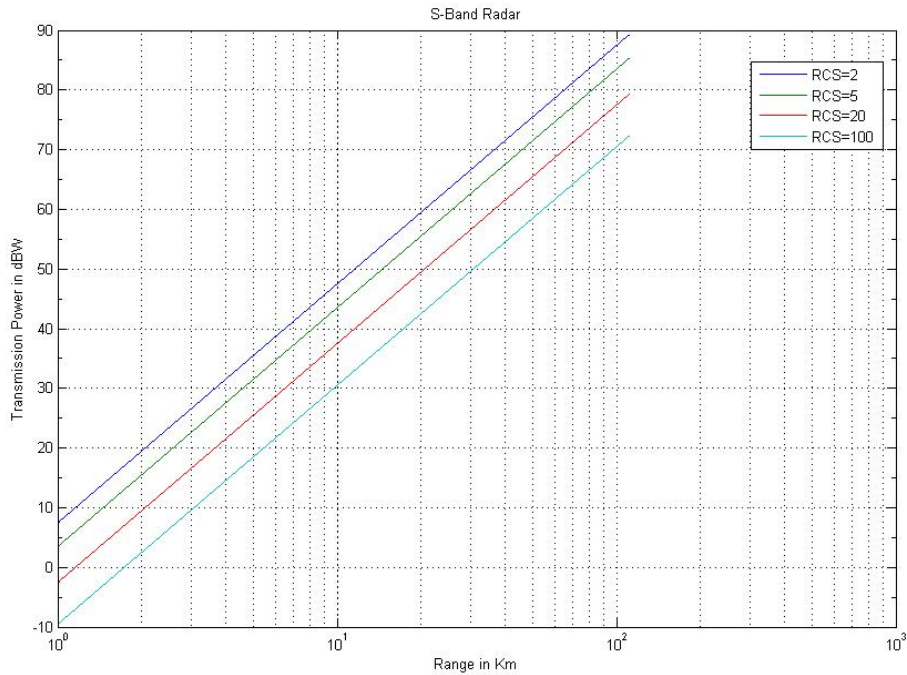
Η τιμή του SNR προέκυψε από το Διάγραμμα 8. 1, γνωρίζοντας ότι για το PSR S-band η πιθανότητα εντοπισμού είναι $P_d = 80\%$ και η πιθανότητα εσφαλμένου συναγερωμού είναι $P_{fa} = 10^{-7}$, ενώ για το MSSR L-band είναι $P_d = 98\%$ και $P_{fa} = 10^{-7}$. Η θερμοκρασία θα είναι $T = 290 K$, η ταχύτητα $u = 3 * 10^8 m/s$ και η σταθερά Boltzmann $k = 1.38 \times 10^{-23} J/K$.



Διάγραμμα 8. 1 Πιθανότητα εντοπισμού P_d ως συνάρτηση του SNR και της πιθανότητας εσφαλμένου συναγερμού P_{fa}

8. 3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για τη μικρότερη τιμή της ραδιοδιατομής που επιλέχθηκε ($RCS=2$, μικρό αεροσκάφος), η ισχύς έχει μέγιστη τιμή 90 dBW, η οποία είναι και η μέγιστη τιμή αυτής της προσομοίωσης. Για μεγαλύτερες τιμές της ραδιοδιατομής, η απαιτούμενη ισχύς για τη μέγιστη κάλυψη μειώνεται (Πίνακας 8. 2).

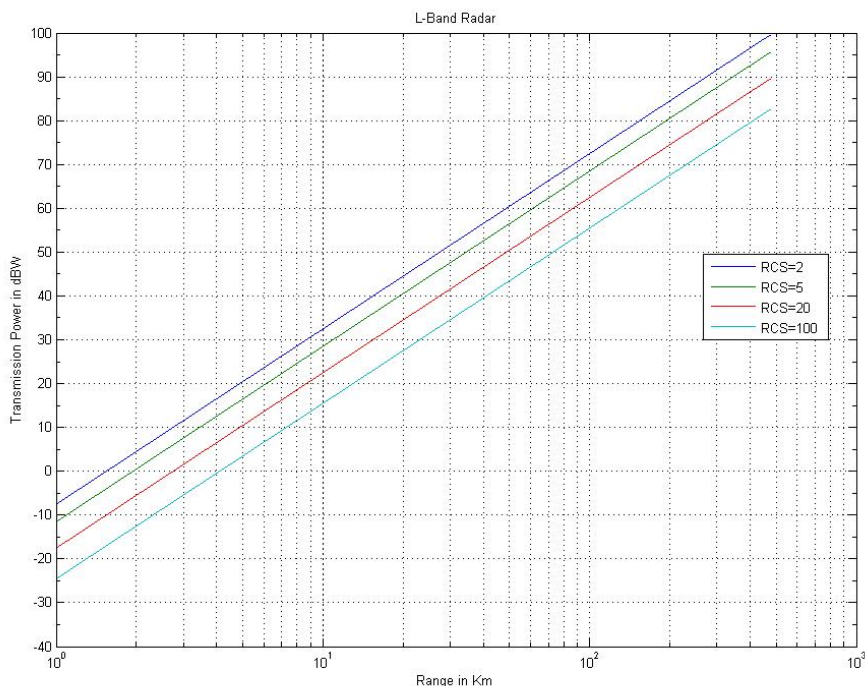


Διάγραμμα 8. 2 Προσομοίωση S-band, ραδιοδιατομή

Ραδιοδιατομή (m²)	P_t, max (dBW)
2	90
5	86
20	80
100	72

Πίνακας 8. 2 Τιμές Ισχύος για S-band PSR, ραδιοδιατομή

Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση του μονοπαλμικού ραντάρ που λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων L (Διάγραμμα 8. 3). Εδώ παρατηρούμε ότι η ισχύς εκπομπής παίρνει μεγαλύτερες τιμές από αυτές του πρωτεύοντος ραντάρ, αλλά αφορούν την απόσταση των 475 km (Πίνακας 8. 3). Παρά όμως αυτή την αύξηση φαίνεται από το διάγραμμα ότι χρειάζεται λιγότερη ισχύ για την κάλυψη μεγαλύτερων αποστάσεων (παράγραφος 3. 1, σελ. 34), σε χαμηλότερη συχνότητα λειτουργίας.



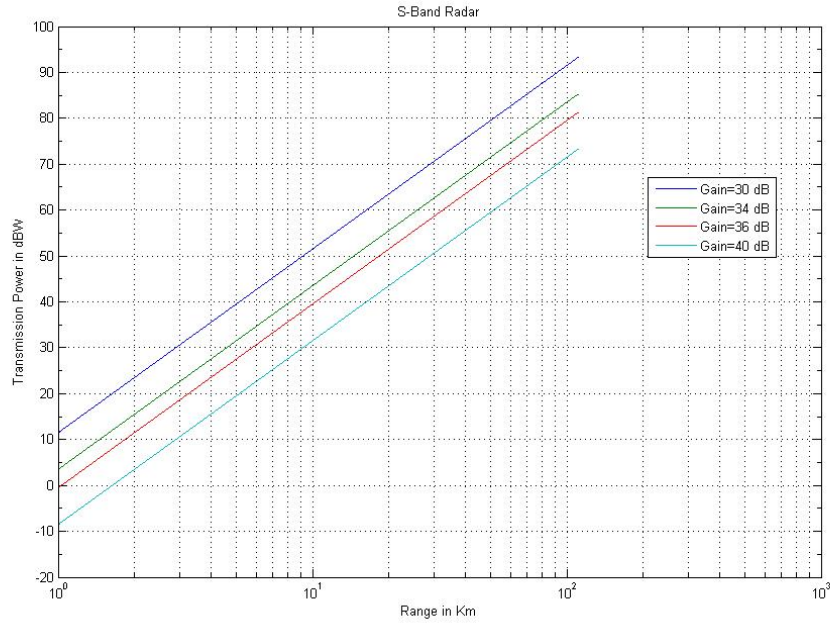
Διάγραμμα 8.3 Προσομοίωση L-band, ραδιοδιατομή

Ραδιοδιατομή (RCS)	P_t, max (dBW)
2	100
5	96
20	89
100	82

Πίνακας 8.3 Τιμές Ισχύος για L-band MSSR, ραδιοδιατομή

Συνοψίζοντας, η ραδιοδιατομή επηρεάζει την τιμή της ισχύος εκπομπής του ραντάρ κατά την ανίχνευση και παρακολούθηση στόχων διαφορετικού μεγέθους καθώς μεγαλώνει η απόσταση.

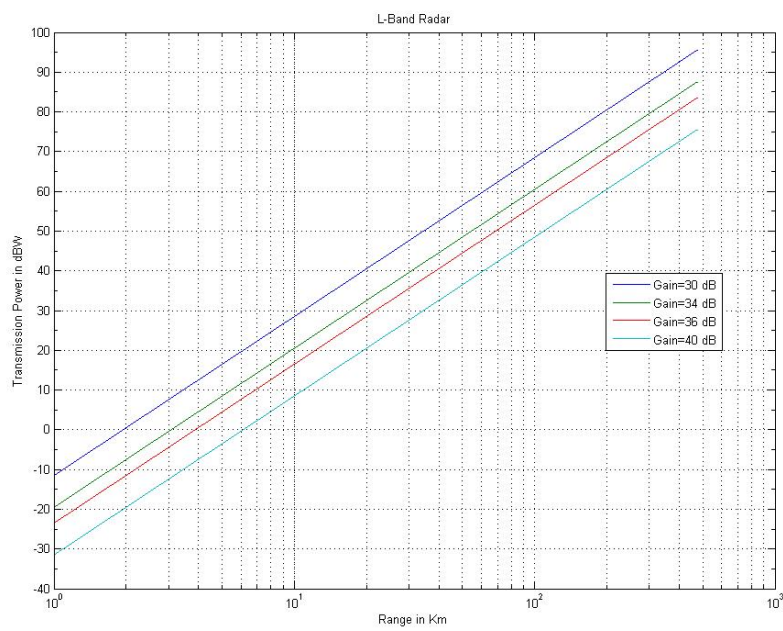
Στη συνέχεια, για τα ίδια συστήματα ραντάρ γίνεται προσομοίωση με διαφορετικές τιμές του κέρδους G , κρατώντας σταθερή την τιμή της ραδιοδιατομής. Στο *Διάγραμμα 8.4* για το S-band πρωτεύον ραντάρ, η ισχύς μειώνεται όσο αυξάνεται το κέρδος (*Πίνακας 8.4*). Κατόπιν, στο *Διάγραμμα 8.5* φαίνονται τα αποτελέσματα της αντίστοιχης προσομοίωσης για το L-band MSSR και στον Πίνακα 8.5 οι τιμές της ισχύος.



Διάγραμμα 8. 4 Προσομοίωση S-band, κέρδος

Κέρδος (dB)	P _t max (dBW)
30	94
34	85
36	81
40	73

Πίνακας 8. 4 Τιμές Ισχύος για S-band PSR, κέρδος



Διάγραμμα 8. 5 Προσομοίωση L-band, κέρδος

Κέρδος (dB)	P_t max (dBW)
30	95
34	88
36	84
40	75

Πίνακας 8. 5 Τιμές Ισχύος για L-band MSSR, κέρδος

Παρατηρούμε ότι, όπως φαίνεται και από την εξίσωση του ραντάρ, όπως αυτή παρουσιάζεται στην παράγραφο 8. 1, η ισχύς είναι αντιστρόφως ανάλογη της ραδιοδιατομής και ανάλογη του τετραγώνου της συχνότητας. Αυτό σημαίνει ότι για ένα λόγο κεντρικών συχνοτήτων περίπου 3 θα χρειαστούμε περίπου 9 φορές περισσότερη ισχύ για την υψηλότερη συχνότητα, ενώ για κάθε διπλασιασμό της ραδιοδιατομής η απαιτούμενη ισχύς μειώνεται κατά 3 dB (Πίνακας 8. 2 και Πίνακας 8. 3).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα ραντάρ, τόσο της πολιτικής όσο και της πολεμικής αεροπορίας, έχουν σημαντικό ρόλο στην καθημερινή μας ζωή, καθώς είναι ένα σημαντικό εργαλείο που εξασφαλίζει την εποπτεία του εναέριου χώρου προς όφελος όλων.

Το δευτερεύον ραντάρ επιτήρησης σε κάθε του μορφή (Mode A/C, MSSR, Mode S) αποτελεί βασικό εξοπλισμό για την ομαλή και επιτυχημένη λειτουργία των αεροδρομίων παγκοσμίως. Προσφέρει ασφαλή και αξιόπιστη επιτήρηση του εναέριου χώρου, καταφέροντας να ξεπεράσει σημαντικά προβλήματα κατά την ανίχνευση στόχων.

Στις μέρες μας, η αυξανόμενη ροή της κυκλοφορίας στα αεροδρόμια απαιτεί την χρήση συστημάτων που θα μπορούν να υποστηρίξουν τις απαιτήσεις για την εξυπηρέτηση περισσότερων διερχόμενων αεροσκαφών. Έτσι, είναι απαραίτητη η συνεχής βελτιστοποίηση των υπάρχοντων συστημάτων και τεχνολογιών, αλλά και η ανάπτυξη νέων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ν. Γ. Μαλαχίας, Γ. Α. Σάγος, *Αρχές Ραντάρ και Ηλεκτρονικού Πολέμου*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2004.
- [2] M.I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, New York: McGraw-Hill, 1980, pp. 3-13.
- [3] M.I. Skolnik, *Radar Handbook*, 2nd Edition, McGraw-Hill, 1990.
- [4] S. Kingsley, S. Quegan, *Understanding Radar Systems*, McGraw-Hill, 1992, pp. 25-41, 159-169.
- [5] M. C. Stevens, *Secondary Surveillance Radar*, Artech House, 1988.
- [6] *Aeronautical Telecommunications*, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Vol IV, International Civil Aviation Organization, 4th, July 2007.
- [7] *Manual on the Secondary Surveillance Radar (SSR) Systems*, International Civil Aviation Organization, 3rd, 2004.
- [8] *Air Traffic Management, Procedures for Air Navigation Services*, International Civil Aviation Organization, 14th, 2001.
- [9] C. A. Balanis, *Κεραίες Ανάλυση & Σχεδίαση*, 1^η Ελληνική Έκδοση, Εκδόσεις ΙΩΝ, 2005.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ADS	Automatic Dependent Surveillance, τεχνική επιτήρησης κατά την οποία τα αεροσκάφη παρέχουν πληροφορίες αυτόματα μέσω μιας ζεύξης δεδομένων.
ASR	Κατηγορία ραντάρ επιτήρησης των αεροδιαδρόμων μιας μεγάλης γεωγραφικής περιοχής και της ευρύτερης περιοχής ενός αεροδρομίου.
ATC	Air Traffic Control, υπηρεσία που παρέχεται με σκοπό την αποφυγή συγκρούσεων των αεροσκαφών μεταξύ τους και μεταξύ αεροσκαφών και εμποδίων, καθώς και για την οργάνωση και τη διατήρηση της ομαλής ροής της εναέριας κυκλοφορίας.
Azimuth	Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ μιας κατεύθυνσης αναφοράς (Βορράς) και της γραμμής από τον παρατηρητή στο σημείο ενδιαφέροντος.
Azimuth Resolution	Η μικρότερη γωνιακή διαφορά μεταξύ δύο στόχων που βρίσκονται στην ίδια απόσταση ώστε να απεικονίζονται ξεχωριστά στην οθόνη.
Beamwidth	Εύρος δέσμης, η γωνία που σχηματίζουν δύο σημεία της δέσμης μιας κεραίας όπου η ένταση της ακτινοβολίας είναι η μισή της μέγιστης (-3dB).
Boresight	Ηλεκτρικός άξονας του κύριου λοβού μιας κεραίας.
Clutter	Κάθε μορφής ανεπιθύμητες ηχώ προερχόμενες από διάφορους σκεδαστές της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως έδαφος, θάλασσα, βροχή, πουλιά, και μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα στην απόδοση των συστημάτων ραντάρ.
DME	Distance Measuring Equipment, ραδιοβοήθημα που χρησιμοποιούν τα αεροσκάφη με σκοπό να μετράνε την απόστασή τους από το ραντάρ στο έδαφος.
Doppler Φαινόμενο	Η αλλαγή της συχνότητας ενός κύματος για έναν παρατηρητή που κινείται σε σχέση με την πηγή των

κυμάτων. Όταν η απόσταση μεταξύ παρατηρητή και πηγής μειώνεται, τότε η συχνότητα που δέχεται ο παρατηρητής είναι μεγαλύτερη από της πηγής, ενώ όταν η απόσταση αυξάνεται, τότε η λαμβανόμενη συχνότητα είναι μικρότερη.

DPSK	Differential Phase Shift Keying, τεχνική διαμόρφωση της φάσης που μεταφέρει δεδομένα αλλάζοντας τη φάση του φέροντος κύματος.
Elevation Angle	Η γωνία μεταξύ του οριζόντιου επιπέδου και της άμεσης οπτικής επαφής (line of sight) που μετράται σε κατακόρυφο επίπεδο.
ICAO	International Civil Aviation Organization, οργανισμός που ορίζει τις αρχές και τις τεχνικές της διεθνούς αεροναυτιλίας, της επιθεώρησης της πτήσης και την πρόληψη των παράνομων ενεργειών.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, επαγγελματική ένωση που αφιερώνεται στην προώθηση της τεχνολογικής καινοτομίας και αριστείας προς όφελος της ανθρωπότητας.
IF	Intermediate Frequency, συχνότητα στην οποία η φέρουσα συχνότητα μετατοπίζεται ως ένα ενδιάμεσο βήμα για την εκπομπή ή τη λήψη
IFF	Identify Friend or Foe, σύστημα αναγνώρισης που αναπτύχθηκε κατά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, το οποίο δίνει τη δυνατότητα στην πολιτική και πολεμική αεροπορία να αναγνωρίζει αεροσκάφη και να υπολογίζει την απόστασή τους.
ILS	Instrument Landing System, σύστημα εδάφους που παρέχει ακρίβεια στην καθοδήγηση ενός αεροσκάφους κατά την προσέγγιση και την προσγείωση.
Interrogator	Βασικό στοιχείο στο σταθμό εδάφους ενός συστήματος SSR για την εκπομπή σημάτων με τη μορφή ερωτήσεων προς τους στόχους.

ISLS	Interrogation path Side Lobe Suppression, τεχνική καταπίεσης ερωτήσεων που εκπέμφθησαν από τους πλευρικούς λοβούς μέσω εκπομπής ενός παλμού ελέγχου.
IISLS	Improved ISLS
ITU	International Telecommunication Union, ειδική υπηρεσία υπεύθυνη για τις τεχνολογίες της πληροφορίας και των επικοινωνιών
LVA	Large Vertical Aperutre, είδος κεραίας που χρησιμοποιείται σε δευτερεύοντα συστήματα ραντάρ και αποτελείται από μια γραμμική συστοιχία ακτινοβολούμενων διπόλων.
Mode A	Τρόπος ερώτησης δευτερόντος ραντάρ επιτήρησης για την απόκτηση αναφοράς ταυτότητας ενός στόχου. Η απόσταση των παλμών P1-P3 είναι 8 μs.
Mode C	Τρόπος ερώτησης δευτερόντος ραντάρ επιτήρησης για την απόκτηση αναφοράς ύψους ενός στόχου. Η απόσταση των παλμών P1-P3 είναι 21 μs.
Mode S	Τεχνική του SSR κατά την οποία κάθε αεροσκάφος έχει μια μοναδική 24-bit διεύθυνση που συμπεριλαμβάνεται σε κάθε εκπομπή. Μεταφέρονται περισσότερα δεδομένα εκτός από τις αναφορές ταυτότητας και ύψους.
MSSR	Monopulse Secondary Surveillance Radar, τεχνική του SSR κατά την οποία γίνεται ακριβής υπολογισμός της γωνίας από την οποία φτάνει το σήμα από τον transponder στον interrogator.
MTI	Moving Target Indicator, τεχνική εκκαθάρισης του εμφανιζόμενου στατικού clutter (ανακλάσεις από ακίνητους στόχους) για τον εντοπισμό κινούμενων στόχων. Βασίζεται στο φαινόμενο Doppler και χρησιμοποιείται συνήθως σε παλμικά και CW ραντάρ.
OBA	Off-Boresight Angle, η γωνία μεταξύ του άξονα της κεραίας και της κατεύθυνσης του αεροσκάφους.
PAR	Precision Approach Radar, ραντάρ που χρησιμοποιείται

	στην προσέγγιση του κέντρου ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας.
Plot Extractor	Συσκευή στον interrogator που αποκωδικοποιεί τις απαντήσεις που λαμβάνονται και τις μεταφέρει στην οθόνη των ελεγκτών εναέριας κυκλοφορίας.
Polarization	Πόλωση μια κεραίας είναι η διεύθυνση της ακτινοβολούμενης ενέργειας η οποία αλλάζει με τη διεύθυνση από το κέντρο της κεραίας.
PPM	Pulse Position Modulation, τρόπος διαμόρφωσης των παλμών ως προς τη θέση τους σε χρονικό διάστημα T_b
PRF	Pulse Repetition Frequency, ο ρυθμός κατά τον οποίο εκπέμπονται οι παλμοί από το ραντάρ.
Probability of Detection	Πιθανότητα ανίχνευσης στόχων ενός SSR. Θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 95% οπουδήποτε στην περιοχή κάλυψης του ραντάρ.
PSR	Primary Surveillance Radar, σύστημα πρωτεύοντος ραντάρ επιτήρησης που βασίζεται στην τεχνική της ηχούς. Τα εκπεμπόμενα σήματα ανακλώνται από την επιφάνεια του στόχου και λαμβάνονται από το ραντάρ.
RADAR	RAdio Detection And Ranging, σύστημα ηλεκτρομαγνητικού εντοπισμού και παρακολούθησης κινητών και ακίνητων στόχων σε μεγάλες αποστάσεις και με μεγάλη ακρίβεια.
Range Resolution	Ικανότητα διαχωρισμού δύο αεροσκαφών που βρίσκονται σε παραπλήσιο αζιμούθιο.
RCS	Radar Cross Section, το μέτρο της ανακλαστικής ικανότητας ενός στόχου στην προσπίπτουσα σε αυτό ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
RF	Radio Frequency, συχνότητα των ραδιοκυμάτων που κυμαίνεται από 3 kHz έως 300 GHz.
Round-trip Time	Ο χρόνος που χρειάζεται ένα σήμα για να ταξιδέψει σε μια πηγή και να γυρίσει πίσω.
RSLs	Reply path Side Lobe Suppression, τεχνική καταπίεσης

	απαντήσεων που λήφθησαν από πλευρικούς λοβούς.
Sliding Window	Τεχνική που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση στόχων.
SMR	Surface Movement Radar, σύστημα ραντάρ μικκής εμβέλειας που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση αντικειμένων στην επιφάνεια του αεροδρομίου.
SPI	Special Pulse for Identification ή Special Position Indicator, παλμός στο τέλος μια απάντησης Mode A για την αναγνώριση ενός αεροσκάφους. Εκπέμπεται κατόπιν αιτήσεως του ελεγκτή.
SSR	Secondary Surveillance Radar, σύστημα ραντάρ επιτήρησης που εκπέμπει κωδικοποιημένες ερωτήσεις προς τα αεροσκάφη και δέχεται κωδικοποιημένες απαντήσεις.
Transponder	Συσκευή που βρίσκεται στα αεροσκάφη για την παραγωγή καθορισμένων απαντήσεων σε Mode A, Mode C, Intermoder και Mode S ερωτήσεις.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

%Radar Simulation - PSR - S-band

clear;

k=1.38*10^{^(-23)}; %Boltzmann's constant (Joule/K)

T=290; %Temperature (Kelvin)

u=3e8; %velocity in m

%S-band Primary Radar parameters

B = 400e6; %Bandwidth in Hz

fc = 2.8e9; %frequency in Hz / Frequency Band 2.7-3.05 GHz

Fn_dB = 5; %Noise Figure 5 dB

L_dB = 6; %Losses 6 dB

SNR_dB = 13; %Signal to Noise Ratio 13 dB

G_dB = 34; %Gain 34 dB

% Calculations

Fn = 10^{^(Fn_dB/10)};

L = 10^{^(L_dB/10)};

SNR = 10^{^(SNR_dB/10)};

G = 10^{^(G_dB/10)};

R=1000:111000; %Range in m (0.5-60 NM)

figure();

RCSa=2; %Radar Cross Section in square meters

Pt=((R.^4)*((4*pi)^3)*k*T*B*Fn*L*SNR)/((G^2)*RCSa*((u/fc)^2));

dBW=10*log10(Pt);

R_Km = R/1000;

semilogx(R_Km,dBW);

hold all;

```

RCSb=5;           %Radar Cross Section in square meters
Pt=((R.^4)*((4*pi)^3)*k*T*B*Fn*L*SNR)/((G^2)*RCSb*((u/fc)^2));
dBW=10*log10(Pt);
semilogx(R_Km,dBW);

RCSc=20;         %Radar Cross Section in square meters
Pt=((R.^4)*((4*pi)^3)*k*T*B*Fn*L*SNR)/((G^2)*RCSc*((u/fc)^2));
dBW=10*log10(Pt);
semilogx(R_Km,dBW);

RCSd=100;       %Radar Cross Section in square meters
Pt=((R.^4)*((4*pi)^3)*k*T*B*Fn*L*SNR)/((G^2)*RCSd*((u/fc)^2));
dBW=10*log10(Pt);
semilogx(R_Km,dBW);

legend('RCS=2','RCS=5','RCS=20','RCS=100');
grid on;
title('S-Band Radar');
xlabel('Range in Km');
ylabel('Transmission Power in dBW');

%Radar Simulation - MSSR - L-band
clear;

k=1.38*10^(-23); %Boltzmann's constant (Joule/K)
T=290;          %Temperature (Kelvin)
u=3e8;         %velocity in m

%L-band Primary Radar parameters
B=10e6;        %Bandwidth in Hz
fc=1.03e9;     %frequency in Hz
Fn_dB=5;       %Noise Figure 5 dB
L_dB=6;        %Losses 6 dB

```

```

SNR_dB=14.7;      %Signal to Noise Ratio 14.7 dB
G_dB=30;         %Gain 30 dB

% Calculations
Fn=10^(Fn_dB/10);
L = 10^(L_dB/10);
SNR = 10^(SNR_dB/10);
G = 10^(G_dB/10);

R=1000:475000;   %Range in m (0.5-256 NM)

figure();
RCSa=2;          %Radar Cross Section in square meters
Pt=((R.^4)*((4*pi)^3)*k*T*B*Fn*L*SNR)/((G^2)*RCSa*((u/fc)^2));
dBW=10*(log10(Pt));
R_Km=R/1000;
semilogx(R_Km,dBW);
hold all;

RCSb=5;          %Radar Cross Section in square meters
Pt=((R.^4)*((4*pi)^3)*k*T*B*Fn*L*SNR)/((G^2)*RCSb*((u/fc)^2));
dBW=10*(log10(Pt));
semilogx(R_Km,dBW);

RCSc=20;         %Radar Cross Section in square meters
Pt=((R.^4)*((4*pi)^3)*k*T*B*Fn*L*SNR)/((G^2)*RCSc*((u/fc)^2));
dBW=10*(log10(Pt));
semilogx(R_Km,dBW);

RCSd=100;        %Radar Cross Section in square meters
Pt=((R.^4)*((4*pi)^3)*k*T*B*Fn*L*SNR)/((G^2)*RCSd*((u/fc)^2));
dBW=10*(log10(Pt));
semilogx(R_Km,dBW);

```

```

legend('RCS=2','RCS=5','RCS=20','RCS=100');
grid on;
title('L-Band Radar');
xlabel('Range in Km');
ylabel('Transmission Power in dBW');

%Radar Simulation - PSR - S-band
clear;

k=1.38*10^(-23);    %Boltzmann's constant (Joule/K)
T=290;             %Temperature (Kelvin)
u=3e8;            %velocity in m

%S-band Primary Radar parameters
B=400e6;          %Bandwidth in Hz
fc=2.8e9;         %frequency in Hz / Frequency Band 2.7-3.05 GHz
Fn_dB=5;          %Noise Figure 5 dB
L_dB=6;           %Losses 6 dB
SNR_dB=13;        %Signal to Noise Ratio 13 dB
RCS=5;           %Radar Cross Section in square meters

% Calculations
Fn = 10^(Fn_dB/10);
L = 10^(L_dB/10);
SNR = 10^(SNR_dB/10);
R=1000:111000;    %Range in m

figure();
G_dB=30;          %Gain 30 dB

G=10^(G_dB/10);
Pt=((R.^4)*((4*pi)^3)*k*T*B*Fn*L*SNR)/((G^2)*RCS*((u/fc)^2));

```

```

dBW=10*(log10(Pt));
R_Km = R/1000;
semilogx(R_Km,dBW);
hold all;

G_dB=34;          %Gain 34 dB
G=10^(G_dB/10);
Pt=((R.^4)*((4*pi)^3)*k*T*B*Fn*L*SNR)/((G^2)*RCS*((u/fc)^2));
dBW=10*(log10(Pt));
semilogx(R_Km,dBW);

G_dB=36;          %Gain 36 dB
G=10^(G_dB/10);
Pt=((R.^4)*((4*pi)^3)*k*T*B*Fn*L*SNR)/((G^2)*RCS*((u/fc)^2));
dBW=10*(log10(Pt));
semilogx(R_Km,dBW);

G_dB=40;          %Gain 40 dB
G=10^(G_dB/10);
Pt=((R.^4)*((4*pi)^3)*k*T*B*Fn*L*SNR)/((G^2)*RCS*((u/fc)^2));
dBW=10*(log10(Pt));
semilogx(R_Km,dBW);

legend('Gain=30 dB','Gain=34 dB','Gain=36 dB','Gain=40 dB');
grid on;
title('S-Band Radar');
xlabel('Range in Km');
ylabel('Transmission Power in dBW');

%Radar Simulation - MSSR - L-band
clear;

k=1.38*10^(-23);  %Boltzmann's constant (Joule/K)

```

```

T=290;           %Temperature (Kelvin)
u=3e8;          %velocity in m

%L-band Primary Radar parameters
B=10e6;         %Bandwidth in Hz
fc=1.03e9;      %frequency in Hz
Fn_dB=5;        %Noise Figure 5 dB
L_dB=6;         %Losses 6 dB
SNR_dB=14.7;    %Signal to Noise Ratio 14.7 dB
RCS=5;         %Radar Cross Section in square meters

% Calculations
Fn = 10^(Fn_dB/10);
L = 10^(L_dB/10);
SNR = 10^(SNR_dB/10);

R=1000:475000; %Range in m

figure();
G_dB=30;        %Gain 30 dB
G=10^(G_dB/10);
Pt=((R.^4)*((4*pi)^3)*k*T*B*Fn*L*SNR)/((G^2)*RCS*((u/fc)^2));
dBW=10*(log10(Pt));
R_Km = R/1000;
semilogx(R_Km,dBW);
hold all;

G_dB=34;        %Gain 34 dB
G = 10^(G_dB/10);
Pt=((R.^4)*((4*pi)^3)*k*T*B*Fn*L*SNR)/((G^2)*RCS*((u/fc)^2));
dBW=10*(log10(Pt));
semilogx(R_Km,dBW);

```



```

G_dB=36;           %Gain 36 dB
G = 10^(G_dB/10);
Pt=((R.^4)*((4*pi)^3)*k*T*B*Fn*L*SNR)/((G^2)*RCS*((u/fc)^2));
dBW=10*(log10(Pt));
semilogx(R_Km,dBW);

```

```

G_dB=40;           %Gain 40 dB
G = 10^(G_dB/10);
Pt=((R.^4)*((4*pi)^3)*k*T*B*Fn*L*SNR)/((G^2)*RCS*((u/fc)^2));
dBW=10*(log10(Pt));
semilogx(R_Km,dBW);

```

```

legend('Gain=30 dB','Gain=34 dB','Gain=36 dB','Gain=40 dB');
grid on;
title('L-Band Radar');
xlabel('Range in Km');
ylabel('Transmission Power in dBW');

```