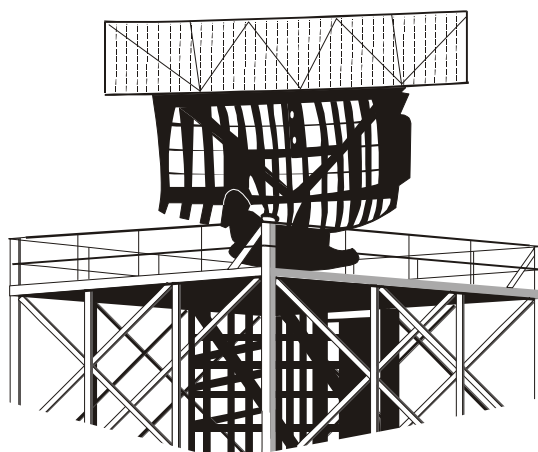




**Τ.Ε.Ι. Κρήτης** – Παράρτημα Χανίων  
Τμήμα Ηλεκτρονικής

## Πτυχιακή εργασία



με θέμα

*Απλή Εξομοίωση Οθόνης Ραντάρ*

από τον **Γιώργο Τουρούτογλου,**

Σπουδαστή του Τμήματος Ηλεκτρονικής του ΤΕΙ Κρήτης.

*Υπό την επίβλεψη του Δρ. **Ιωάννη Βαρδιάμπαση,** Επιστημονικού Συνεργάτη Τ.Ε.Ι. Κρήτης.*

**Χανιά, Ιούνιος 2001**

ΑΦΙΕΡΩΜΕΝΗ ΣΤΟΥΣ ΓΟΝΕΙΣ ΜΟΥ

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω πάρα πολύ τον πρώην καθηγητή μου, και επίσης πολύ καλό μου φίλο, κύριο Νικόλαο Φαρσάρη ο οποίος με βοήθησε στο να βρω τη κατάλληλη ιδέα για να μπορέσω να υλοποιήσω αυτή την πτυχιακή εργασία. Με βοήθησε να βρω τις κατάλληλες σημειώσεις, ώστε να φτάσω σε ένα αποτέλεσμα που να με ικανοποιεί.

Επίσης πολύ μεγάλη βοήθεια είχα από τον καθηγητή μου κύριο Ιωάννη Βαρδιάμπαση, τον οποίο και ευχαριστώ θερμά.

Επίσης ευχαριστώ πολύ τους γονείς μου για όλη την ηθική υποστήριξη που μου έδιναν όλα αυτά τα χρόνια που ήμουν στα Χανιά.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

- 1.1 Χαρακτηριστικά του ραντάρ
- 1.2 Εφαρμογές
- 1.3 Είδη ραντάρ
- 1.4 Βήματα ανάπτυξης του συστήματος του ραντάρ
- 1.5 Βήματα σχεδιασμού ραντάρ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

- 2.1 Εισαγωγή
- 2.2 Εμφανίσεις (αναπτύξεις) του ραντάρ των πρώτων 5 δεκαετιών
- 2.3 Εξέλιξη (πορεία) των εφαρμογών του ραντάρ
- 2.4 Στρατιωτικά ραντάρ του 1980
- 2.5 Το μέλλον του ραντάρ
- 2.6 Θόρυβος
- 2.7 Πληροφορίες στόχου
- 2.8 Μεταδότης (ή πομπός)
- 2.9 Μηχανικά περιστρεφόμενες κατοπτρικές κεραίες
- 2.10 Ραντάρ σε θέση φάσεως
- 2.11 Κάλυψη (προστασία)
- 2.12 Αξιοπιστία
- 2.13 Επεξεργασία σήματος και δεδομένων στοιχείων
- 2.14 Χειριστής
- 2.15 Μέγεθος και βάρος
- 2.16 Μη μικροκυματικά ραντάρ
- 2.17 Υποστηρίγματα του ραντάρ
- 2.18 Τι μπορεί να γίνει και τι θα γίνει
- 2.19 Σημαντικά γεγονότα στην ιστορία του ραντάρ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΡΑΝΤΑΡ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΝΑΕΡΙΑΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

- 3.1. Το ραντάρ στον έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας
- 3.2. Ραντάρ παρακολούθησης αεροδιαδρόμων
- 3.3. Ραντάρ παρακολούθησης εναέριας πορείας
- 3.4. Ειδικά χαρακτηριστικά των ATC ραντάρ παρακολούθησης
- 3.5. Αντηχήσεις από κινούμενα εδαφικά οχήματα
- 3.6. Διαθεσιμότητα
- 3.7. Πουλιά και έντομα
- 3.8. Εξοπλισμός εντοπισμού του εδάφους του αεροδρομίου
- 3.9. Ραντάρ καιρού για έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας
- 3.10. Ραντάρ ακριβούς προσέγγισης αεροσκαφών
- 3.11. Έλεγχος εναέριας κυκλοφορίας με σύστημα ραντάρ φωτεινού σήματος
- 3.12. Έλεγχος εναέριας κυκλοφορίας από το διάστημα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΑ ΡΑΝΤΑΡ

- 4.1. Στρατιωτικές εφαρμογές του ραντάρ
- 4.2. Ραντάρ εναέριας παρακολούθησης για άμυνα εναντίον εναέριας επίθεσης
- 4.3. 2D ραντάρ
- 4.4. Σύγκριση του στρατιωτικού ραντάρ εναέριας παρακολούθησης μεγάλης κατεύθυνσης και του πολιτικού ATC ραντάρ καθ'οδόν
- 4.5. Ο τρίτος ισόβαθμος στόχος – ύψος

- 4.6. Ραντάρ ανεύρεσης στόχου
- 4.7. 3D ραντάρ
- 4.8. Περιορισμοί στο 3D ραντάρ
- 4.9. Ράχη με ράχη κεραίες
- 4.10. Επεξεργασία σήματος
- 4.11. Ραντάρ ελέγχου όπλων
- 4.12. Ραντάρ ελέγχου όπλων σε θέση φάσεως
- 4.13. Πολύ – λειτουργικό ραντάρ αεράμυνας
- 4.14. Καθοδήγηση πυραύλων
- 4.15. HF ραντάρ πάνω από τον ορίζοντα (OTH)
- 4.16. Άλλες στρατιωτικές εφαρμογές του ραντάρ
- 4.17. Ραντάρ παρακολούθησης του πεδίου μάχης
- 4.18. Ραντάρ εξοπλισμού ολμοβόλου και πυροβόλου
- 4.19. Παρακολούθηση δορυφόρου
- 4.20. Παρακολούθηση & καθοδήγηση διηπειρωτικού βαλλιστικού πυραύλου (διαχείριση μάχης)
- 4.21. Ραντάρ σε θέση φάσεως σε στρατιωτικές εφαρμογές

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΡΑΝΤΑΡ ΚΑΙ ΤΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ

### 1.1 Χαρακτηριστικά του ραντάρ

Το ραντάρ αποκαλύπτει τα αντικείμενα που βρίσκονται στην εμβέλειά του και τα ταξινομεί ως προς την απόσταση και την κατεύθυνση τους, εκπέμποντας ένα σήμα γνωστής κυματομορφής (συνήθως μια επαναλαμβανόμενη σειρά δονήσεων μικρής διάρκειας) και ανιχνεύοντας τη λαμβανόμενη αντήχηση. Η βασική λειτουργία ενός ραντάρ έγκειται στη μέτρηση της απόστασης και της κατεύθυνσης (αζιμουθιακής γωνίας) του στόχου σε σχέση με αυτό. Κανένα άλλο αισθητήριο όργανο δε μπορεί να ανταγωνιστεί το ραντάρ όσον αφορά την ακριβή μέτρηση της θέσης ενός μακρινού στόχου.

Άλλο ένα σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η χρήση της συχνότητας Doppler που παράγεται από ένα κινούμενο στόχο. Η συχνότητα Doppler είναι μια μέτρηση της ακτινωτής ταχύτητας ανάμεσα στο ραντάρ και τον στόχο. Επιτρέπει σ' ένα ραντάρ να ξεχωρίζει επιθυμητούς κινούμενους στόχους από ανεπιθύμητες σταθερές απήχησης θορύβων, ακόμα και όταν ο θόρυβος είναι πολύ μεγαλύτερος από τον κινούμενο στόχο. Παρατηρώντας ένα στόχο σε κάποιο διάστημα του χρόνου, ένα ραντάρ μπορεί να εξάγει πορεία και ταχύτητα. Από την πορεία και την ταχύτητα μπορεί να δημιουργηθεί η πορεία του στόχου. Αυτό είναι σημαντικό για εμφύλιο εναέριο έλεγχο όπως επίσης και για στρατιωτικές εφαρμογές (επιθέσεις). Η ιστορία της τροχιάς που παρέχεται από ένα ραντάρ κάνει δυνατή την αναγνώριση ενός είδους στόχου από έναν άλλο. Για παράδειγμα η μικρή ταχύτητα και μερικές φορές η ασταθής πορεία ενός πουλιού είναι σίγουρα διαφορετική από την ταχύτητα και πορεία ενός αεροσκάφους. Δεν χρειάζεται να υπάρχει πρόβλημα στο να διακρίνεις την τροχιά ενός αεροσκάφους. Παρομοίως η τροχιά ενός στρατιωτικού αεροσκάφους σε μια αποστολή πιθανόν να είναι διαφορετική απ' την τροχιά μίας εμπορικής αεροπορικής γραμμής.

Η ανάλυση των ατομικών διαλυμάτων (σκορπισμάτων) ενός στόχου σε κατεύθυνση (σειρά), γωνία και η ακτινωτή ταχύτητα είναι μια πιο άμεση και γρηγορότερη μέθοδος για αναγνώριση στόχου απ' ό,τι η εξέταση της ιστορίας της τροχιάς. Ραντάρ υψηλού βαθμού ανάλυσης μπορεί να δώσει το ακτινωτό προφίλ και το ακτινωτό μέγεθος ενός στόχου. Η καλή ανάλυση γωνίας μπορεί αρχικά να παρέχει μια εικόνα του στόχου σε διαγώνια κατεύθυνση, αλλά τα σχετικά μεγάλα μήκη κύματος του ραντάρ συνήθως αποκλείουν την ανάλυση της γωνίας αρκετά καλά για να αναγνωρίζουν τις λεπτομέρειες των περισσότερων στόχων. Όμως η καλή ανάλυση της διαγώνιας κατεύθυνσης ή της γωνίας μπορεί να γίνει εκμεταλλεύοντας την άριστη ανάλυση που είναι δυνατή στην κυριότητα της συχνότητας Doppler εάν υπάρχει σχετική κίνηση ανάμεσα στον στόχο και το ραντάρ. Αυτή είναι η βασική αρχή του ραντάρ με σύνθετο άνοιγμα και του ραντάρ με αντίστροφο σύνθετο άνοιγμα. Το ραντάρ με σύνθετο άνοιγμα μπορεί επίσης να θεωρηθεί σαν μια ακολουθητική μεγάλη παραγόμενη κεραία. Όταν συνδυάζεται με ανάλυση υψηλού βαθμού, το ραντάρ με σύνθετο άνοιγμα παρέχει μια δισδιάστατη εικόνα του στόχου. Άλλα μέσα για αναγνώριση ενός στόχου από έναν άλλο βασίζονται στην διακριτική αλλοίωση της αντήχησης του ραντάρ, όπως από την περιστροφή των μηχανών ενός αεροσκάφους ή από την περιστροφή της κεραίας πάνω σ' ένα πλοίο.

Το ραντάρ έχει το πλεονέκτημα πάνω από υπέρυθρο και οπτικά αισθητήρια όργανα στο να είναι ικανό να λειτουργεί σε άσχημο καιρό και την νύχτα όπως επίσης και την ημέρα. Μπορεί να είναι μακράς κατεύθυνσης και ευαίσθητο σε μικρούς στόχους. Μερικά ραντάρ είναι αρκετά μικρά για να κρατηθούν στο χέρι (όπως είναι τα αστυνομικά ταχύμετρα). Άλλα είναι μεγαλύτερα από ένα γήπεδο ποδοσφαίρου και απαιτούν μεγάλα μέση δύναμης (όπως για τον εντοπισμό εξωγήινων στόχων). Το ραντάρ έχει χρησιμοποιηθεί για εντοπισμό στόχων πάνω και κάτω από την επιφάνεια της γης, στον αέρα και στο διάστημα. Δεν απαιτεί από το στόχο να συνεργαστεί χρησιμοποιώντας **transponders** ή αυξανόμενες αντηχήσεις και δεν βασίζεται στη φύση για να φωτίσει τον στόχο (όπως κάνουν τα παθητικά αισθητήρια

όργανα) από τη στιγμή που είναι ένα ή ενεργό ή αισθητήριο όργανο που κουβαλάει το δικό του μεταδότη. Πέρα απ' το να κάνει τη δική του δουλειά κάτω από ευνοϊκές συνθήκες, το ραντάρ μπορεί να σχεδιαστεί για να λειτουργεί όταν το φυσικό περιβάλλον παρεμβαίνει, όπως στην παρουσία μεγάλου εδάφους, θάλασσας ή κακοκαιρίας. Πρέπει επίσης να λειτουργεί ώστε να μην αναμειγνύεται με, ή να υποβιβάζεται από άλλες ηλεκτρομαγνητικές λειτουργίες. Τα συστήματα των στρατιωτικών ραντάρ είναι σχεδιασμένα "ώστε να είναι ικανά να εκτελούν τις αποστολές τους παρά από εχθρικές ενέργειες όπως ηλεκτρονικές καταμετρήσεις ή επιθέσεις πυραύλων με ακτινοβολία E.

Η εκτέλεση του ραντάρ θα έπρεπε να συνοδεύεται από υψηλή αξιοπιστία και υψηλή διαθεσιμότητα, μια μακροχρήσιμη λειτουργία (ζωή) και εξοπλισμό που ταιριάζει στο διάστημα και ζυγίζει κατάλληλα (ειδικά σημαντικό για εναέριες εφαρμογές). Πρέπει να έχει τα μέσα (τι σημαίνει αυτό βασίζεται στην λειτουργία) και δεν πρέπει να εκπληρώνει υπερβολικές απαιτήσεις για προσωπική λειτουργία και συντήρηση. Το ραντάρ έχει αυξηθεί σημαντικά από την αρχική στρατιωτική ανάπτυξή του το 1930. Καινούριες αναπτύξεις του ραντάρ γίνονται ακόμα, οι οποίες προσφέρουν βελτιωμένες λειτουργίες και καινούριες ικανότητες.

## **1.2 Εφαρμογές**

Ο πίνακας με τα περιεχόμενα αυτού του βιβλίου είναι μια λίστα των κυριότερων εφαρμογών του ραντάρ. Η λίστα που ακολουθεί έχει γίνει με έναν διαφορετικό τρόπο και είναι μια περίληψη των χρήσεων στις οποίες έχει τοποθετηθεί το ραντάρ.

### Έλεγχος πολιτικής εναέριας κυκλοφορίας

Ασφαλής και αποτελεσματική πτήση περιλαμβάνει ραντάρ για παρακολούθηση της εναέριας κυκλοφορίας και του καιρού στην περιοχή των αεροδρομίων, για εντοπισμό και ανίχνευση αεροσκαφών και καιρού στις διαδρομές ανάμεσα απ' τα αεροδρόμια και για την παρατήρηση αεροσκαφών και άλλων οχημάτων στο έδαφος. Οι λειτουργίες των



στρατιωτικών αεροσκαφών μερικές φορές χρησιμοποιούν ραντάρ προσέγγισης που ελέγχονται απ' το έδαφος για να βοηθούν στην προσγείωση των αεροσκαφών κάτω από συνθήκες μειωμένης ορατότητας.

### Σκάφος αεροπλοΐας

Το υψόμετρο του ραντάρ που μετράει το ύψος ενός αεροσκάφους πάνω από το έδαφος είναι ένα παράδειγμα από ένα ραντάρ που χρησιμοποιείται για την ασφαλή και αποτελεσματική πτήση των αεροσκαφών. Το Doppler ραντάρ της αεροπλοΐας μετράει τη σταθερή ταχύτητα του αεροσκάφους και καθορίζει την απόσταση που θα διανυθεί.

Το ραντάρ αποφυγής καιρού επιτρέπει στο αεροσκάφος να πετάει ανάμεσα από ατομικά στοιχεία καιρού που θα μπορούσαν να ήταν άβολα ή επικίνδυνα. Τα στρατιωτικά αεροσκάφη, τα οποία πρέπει να επιτεθούν σε χαμηλά ύψη για να ελαχιστοποιήσουν την πιθανότητα ανίχνευσης χρησιμοποιούν ραντάρ αποφυγής του εδάφους και ραντάρ παρακολούθησης του εδάφους για να επιτρέψουν στο αεροσκάφος να αγκαλιάσει το έδαφος και να πετάξει πάνω από ή γύρω από εμπόδια στην πορεία του (διαδρομή του).

### Ασφάλεια πλοίου

Μικρά ραντάρ χρησιμοποιούνται πάνω στα πλοία για αποφυγή συγκρούσεων, για να βοηθήσουν στο να φθάσουν εν όψει ξηράς και για πλοήγηση σε περιορισμένα νερά. Χρησιμοποιούνται επίσης στην ξηρά για παρακολούθηση του λιμανιού.

### Διάστημα

Η συνάντηση διαστημοπλοίων με άλλα διαστημόπλοια ή διαστημικά αντικείμενα βοηθιέται με ραντάρ, όπως είναι η είσοδος και η προσγείωση των αεροσκαφών. Πλανήτες (όπως η Αφροδίτη που καλύπτεται από σύννεφα ) έχουν χαρτογραφηθεί (ή έχουν χαράξει πορεία) από ραντάρ. Τα δορυφορικά ραντάρ έχουν παρατηρήσει τη γη για σκοπούς που είναι γνωστοί ως "μακρινή εκτίμηση". Μεγάλα ραντάρ που έχουν τη βάση τους στο έδαφος

εντοπίζουν και ανιχνεύουν διαστημόπλοια ειδικά εκείνα που δεν ακτινοβολούν συνεργάσιμα σήματα (κύματα).

#### Μακρινή εκτίμηση του περιβάλλοντος

Τα ραντάρ έχουν δει σημαντική εφαρμογή για την παρατήρηση του καιρού και έχουν χρησιμοποιηθεί από το διάστημα για εκτίμηση των συνθηκών της θάλασσας και για τον πλούτο της γης. Τα ραντάρ που έχουν τη βάση τους στο έδαφος έχουν χρησιμοποιηθεί στην αστρονομία για να καθορίσουν ακριβώς την αστρονομική μονάδα, για να μετρήσουν τις πλανητικές περιστροφικές ταχύτητες και για να παρέχουν καινούριες πληροφορίες για τα μετέωρα και για το σέλας. Το ραντάρ έχει δει επίσης ενδιαφέρον εφαρμογές για την ορνιθολογία και εντομολογία.

#### Εκτέλεση του νόμου

Το αστυνομικό ταχύμετρο είναι μια γνωστή εφαρμογή του ραντάρ. Το ραντάρ χρησιμοποιείται επίσης για τον εντοπισμό εισβολέων σε προστατευόμενες περιοχές.

#### Ενορχήστρωση / Ενοργάνωση

Το ραντάρ βρίσκεται στις κατευθύνσεις βλήματος για εντοπισμό στόχων και αεροσκάφους για να καθορίσει ποσοτικά τις ενέργειες που γίνονται. Οι τοπογράφοι (γεωμέτρες) έχουν χρησιμοποιήσει όργανα σαν το ραντάρ για ακριβή μέτρηση μακριάς απόστασης. Τα απλά ντόπλερ ραντάρ χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν την ταχύτητα για βιομηχανικές εφαρμογές.

#### Στρατός

Ο στρατός ήταν ο μεγαλύτερος χρήστης του ραντάρ και ο εξελιχτείς του μεγαλύτερου μέρους της τεχνολογίας του. Πολλές από τις πολιτικές εφαρμογές που αναφέρονται παραπάνω έχουν στρατιωτικές αντίστοιχες. Ο στρατός βασίζεται στο ραντάρ για παρακολούθηση, αεροπλοΐα, έλεγχο και καθοδήγηση των όπλων, τοποθέτηση πυροσωλήνα σε βλήμα, εξερεύνηση, αναγνώριση στόχου και εκτίμηση ζημιών.

Στη συνέχεια θα παρακολουθήσουμε την εξέλιξη του ραντάρ και τις χρήσεις του, ακολουθώντας τον M.I. Skolnik "50 χρόνια του ραντάρ" όπου ιχνογραφεί την εξέλιξη του ραντάρ απ' τις αρχές του το 1930 και περιλαμβάνει παραδείγματα απ' τις πολλές εφαρμογές του. Ανατυπωμένο χαρτί 1.2 " Μισός αιώνας του ραντάρ " απ' τον D.K. Barton, έχει ένα παρόμοιο τίτλο αλλά εξετάζει την εξέλιξη του ραντάρ από διαφορετική προοπτική. Ανατυπωμένο χαρτί 1.3 "Εξέταση του United Kingdom ραντάρ" απ' τον J. Clarke, D.E.N. Davies και απ' τον M.F. Radford περιγράφει τις στρατιωτικές και πολιτικές εφαρμογές του ραντάρ στο United Kingdom. Ανατυπωμένο χαρτί 1.4 " Η χρήση της συχνότητας του ραντάρ " απ' τον M.I. Skolnik, συζητάει για τις ζώνες συχνότητας που έχουν προτιμηθεί για τις διάφορες εφαρμογές του ραντάρ.

### 1.3 ΕΙΔΗ ΡΑΝΤΑΡ

Τα κυριότερα (και μερικά όχι κύρια) είδη ραντάρ συνοψίζονται παρακάτω. Αυτοί οι ορισμοί δεν είναι ακριβείς. Όταν δίνονται ποσοτικοί αριθμοί, θα πρέπει να θεωρούνται μόνο ως παράδειγμα. Κάθε ένα απ' αυτά τα είδη ραντάρ συνήθως χρησιμοποιεί (μεταχειρίζεται) ένα χαρακτηριστικό είδος κύματος και επεξεργασία σήματος που το διαφοροποιεί από τα άλλα ραντάρ.

#### Παλμικό ραντάρ

Αυτό είναι το τυπικό ραντάρ, με ένα είδος κύματος που αποτελείται από ένα επαναλαμβανόμενο σύστημα παλμών μικρής διάρκειας. Το τυπικό εύρος (πλάτος) των παλμών είναι της σειράς μικροδευτερολέπτων με κύκλους από περίπου 0,001 με 0,01 (το **duty cycle** είναι η αναλογία της περιόδου επαναλαμβανόμενων παλμών ως προς το εύρος (πλάτος) των δονήσεων). Κλασικά παραδείγματα είναι τα ραντάρ εναέριας κυκλοφορίας και ραντάρ καιρού.

#### Ραντάρ υψηλής ανάλυσης κατεύθυνσης

Αυτό χρησιμοποιεί μια πολύ μικρή δόνηση ή παλμική σύμπλευση του κύματος για να πετύχει ανάλυση της κατεύθυνσης από ένα κλάσμα ως κάμποσα μέτρα. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό στάσιμων στόχων σε θόρυβο και για αναγνώριση ενός στόχου από έναν άλλο.

#### Παλμικό ραντάρ συμπίεσης

Αυτό είναι παρόμοιο με το ραντάρ υψηλής ανάλυσης κατεύθυνσης εκτός απ' το ότι αυτό χρησιμοποιεί ένα είδος κύματος με μεγάλη δόνηση που μετατρέπεται σε συχνότητα ή φάση για να αυξήσει το φασματικό πλάτος ζώνης συχνότητας. Κατορθώνει την ανάλυση μικρού παλμού αλλά με την ενέργεια μεγάλης δόνησης μετά που επεξεργάζεται από ένα φίλτρο. Επιτρέπει στην μέγιστη δύναμη της μεταδιδόμενης δόνησης να κρατηθεί μέσα σε πρακτικά όρια και ακόμα να αποκτήσει καλή ανάλυση απ' την παρακολούθηση εντοπισμού των στόχων σε θόρυβο ή την αναγνώριση στόχου, η πίεση της δόνησης επιτρέπει κανονική ανάλυση κατεύθυνσης όταν πολύ μεγάλες δονήσεις πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Αυτό είναι σημαντικό με μεταδότες ( πομπούς ) που βρίσκονται σε στερεή (συμπαγή ) κατάσταση ή όταν η μέγιστη δύναμη δεν μπορεί να ανεχτεί εξαιτίας βολταϊκού τόξου, όπως σε μερικές εφαρμογές αεροσκαφών.

#### CW Ραντάρ

Αυτό είναι ένα ραντάρ με μια μονάδα συνεχόμενων κυμάτων (CW) τα οποία βγάζουν (αντλούν ) τη συχνότητα ντόπλερ απ' το σήμα αντήχησης. Καμία μέτρηση κατεύθυνσης δεν γίνεται. Το CW ραντάρ μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει την ενέργεια ντόπλερ για σκοπούς άλλους απ' τον εντοπισμό στόχων σε θόρυβο. Η άμεση πυροδότηση του 2<sup>ου</sup> παγκοσμίου πολέμου είναι ένα κλασικό παράδειγμα του CW ραντάρ. Ήταν επίσης η βάση των πλοηγών του ντόπλερ και βρίσκεται σε βιομηχανικές εφαρμογές για τον καθορισμό της ταχύτητας.

#### FM-CW ραντάρ

Αυτό είναι ένα CW ραντάρ με διαμόρφωση συχνότητας για να επεκτείνει (αναπτύξει) το φασματικό πλάτος της ζώνης συχνότητας για να κάνει μέτρηση της κατεύθυνσης. Μια καινούρια εφαρμογή του FM-CW ραντάρ ήταν για εναέρια υψόμετρα.

### CW ραντάρ πολλαπλής συχνότητας

Αυτό είναι ένα CW ραντάρ με πολλαπλές συχνότητες, συνήθως με ακανόνιστο διάστημα συχνότητας. Έχει χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της κατεύθυνσης ενός μονού στόχου μετρώντας τη διαφορά φάσεως ανάμεσα σε δύο ή περισσότερες συχνότητες.

### Ραντάρ ένδειξης κινούμενου στόχου (MTI)

Αυτό είναι ένα παλμικό ραντάρ που εξάγει την ντόπλερ συχνότητα για να εντοπίσει κινούμενους στόχους υπό την παρουσία δυνατών ανεπιθύμητων θορύβων. Το είδος κύματος του είναι μία κλασική σειρά δονήσεων με μία χαμηλή συχνότητα επαναλαμβανόμενων δονήσεων (prf) για να αποφύγει ασάφειες στην κατεύθυνση. Όμως, οι ασάφειες του ντόπλερ (τυφλές ταχύτητες) που προκαλούνται από το χαμηλό prf του MTI είδος κύματος θα πρέπει να ανεχτεί.

### Εναέριο ραντάρ ένδειξης κινούμενου στόχου

Το εναέριο MTI ραντάρ για τον εντοπισμό αεροσκαφών χαρακτηρίζεται από ένα τυπικό είδος κύματος με χαμηλή συχνότητα επαναλαμβανόμενων παλμών και τη χρήση του TACCAR και DPCA για να αποφύγει τις υποτιμητικές ενέργειες της κίνησης του οχήματος που κουβαλάει το ραντάρ. Το TACCAR εξουδετερώνει τη συχνότητα του θορύβου εξαιτίας των επιδράσεων του ντόπλερ. Το DPCA εξουδετερώνει την εξάπλωση θορύβου στο φάσμα του ντόπλερ.

### Παλμικό ντόπλερ ραντάρ

Όπως με το MTI ραντάρ, αυτό είναι ένα παλμικό ραντάρ που εξάγει τη συχνότητα του ντόπλερ για να εντοπίσει κινούμενους στόχους υπό την παρουσία ανεπιθύμητων μεγάλων θορυβοειδών αντηχήσεων. Διαφέρει από το MTI ή AMTI στο ότι αυτό έχει ένα υψηλό prf ώστε να αποφεύγει ασάφειες στο ντόπλερ (αυτό οδηγεί σε τυφλές ταχύτητες) αλλά πρέπει να ανεχτεί τις ασάφειες στην κατεύθυνση. Ένα υψηλής prf (ντόπλερ) παλμικό ραντάρ είναι

αυτό το οποίο δεν έχει καθόλου ασάφειες στο ντόπλερ (ή τυφλές ταχύτητες). Ένα μεσαίο prf (ντόπλερ) παλμικό ραντάρ είναι αυτό το οποίο δέχεται ασάφειες και στην κατεύθυνση και στο ντόπλερ.

#### Ραντάρ σύνθετου ανοίγματος

Αυτό το ραντάρ χρησιμοποιείται πάνω σ' ένα κινούμενο όχημα (ένα αεροπλάνο για παράδειγμα) και γενικά η ακτίνα της κεραίας του προσανατολίζεται κάθετα στην κατεύθυνση της πορείας του. Αυτό πραγματοποιεί υψηλή ανάλυση της γωνίας αποθηκεύοντας τα ακολουθητικά λαμβανόμενα σήματα στην μνήμη σε κάποιο χρονικό διάστημα και μετά προσθέτοντας τα σαν να ήταν από μια μεγάλη παράταξη της κεραίας. Η απόδοση του είναι μια υψηλής ανάλυσης εικόνα από μια σκηνή.

#### Ραντάρ αντίστροφου σύνθετου ανοίγματος (ISAR)

Το ISAR είναι παρόμοιο από πολλές απόψεις με το SAR, εκτός απ' το ότι αυτό επιτυγχάνει ανάλυση διασταυρωμένων κατευθύνσεων χρησιμοποιώντας την συχνότητα ντόπλερ που καταλήγει (προέρχεται) από κίνηση του στόχου σε σχέση με το ραντάρ. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιτύχει μια εικόνα του στόχου.

#### Εναέριο ραντάρ πλάγιας όψης (SLAR)

Αυτό το εναέριο ραντάρ έχει μια στερεωμένη μικρής ακτίνας κεραία που κατευθύνεται κάθετα στην διεύθυνση πορείας του αεροσκάφους για να επιτύχει ανάλυση γωνίας ή διασταυρωμένη κατεύθυνση. Ένας πολύ μικρός παλμός ή παλμική συμπίεση παρέχει ανάλυση κατεύθυνσης. Παράγει μίας υψηλής ανάλυσης εικόνα από μια σκηνή αλλά με λιγότερη ανάλυση και μικρότερη κατεύθυνση απ' ότι μπορεί να απαιτηθεί με ένα SAR.

#### Ραντάρ ευθυγράμμισης

Αυτό συνήθως σημαίνει ένα ραντάρ που συνεχόμενα ευθυγραμμίζει τον στόχο σε γωνία. Ευθυγράμμιση σε κατεύθυνση συχνά συνοδεύει ευθυγράμμιση σε γωνία. Οι δυο βασικές τεχνικές ευθυγράμμισης γωνίας είναι μονοπαλμικές και κονικές εξερευνήσεις. Η

μονοπαλμική είναι πιο περίπλοκη απ' τη κωνική εξερεύνηση, αλλά είναι πιο ακριβής και λιγότερο ευαίσθητη σε ηλεκτρονικές καταμετρήσεις.

#### Ραντάρ που ανιχνεύει καθώς εξερευνάει (TWS)

Υπάρχουν δυο διαφορετικά ραντάρ που ανιχνεύουν καθώς εξερευνάνε. Το ένα είναι λίγο – πολύ τοπικό ραντάρ εναέριας παρακολούθησης με μια μηχανικά περιστρεφόμενη κεραία. Η ανίχνευση στόχου πετυχαίνεται

από τις παρατηρήσεις που γίνονται απ' την μια περιστροφή στην άλλη. Όταν η ανίχνευση στόχου γίνεται αυτόματα απ' ότι χειροκίνητα, αυτό ονομάζεται αυτόματος εντοπισμός και ανίχνευση (ADT). Το άλλο είναι ένα ραντάρ με μια κεραία που εξερευνά πάνω από ένα μικρό γωνιακό τομέα για να εξάγει τη γωνιακή τοποθεσία του στόχου. Δυο κεραίες με τομέα εξερεύνησης, κάθετες η μια στην άλλη, αποκτούν τις δυο ισόβαθμες ορθογώνιες γωνίες. Έχει χρησιμοποιηθεί για ραντάρ προσγείωσης αεροσκαφών και για ραντάρ ελέγχου όπλων. Η ορολογία TWS φαίνεται να μην χρησιμοποιείται πλέον ευρέως για την περιγραφή αυτών των δυο τύπων ραντάρ ανίχνευσης.

#### Ραντάρ υψηλής συχνότητας πάνω από τον ορίζοντα

Αυτό το ραντάρ λειτουργεί στο HF μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος για να εκμεταλλευτεί τη διάθλαση των κυμάτων του ραντάρ από την ιονόσφαιρα που επιτρέπει κατευθύνσεις πάνω απ' τον ορίζοντα μέχρι και περίπου 2000 nmi. Μπορεί να εντοπίσει αεροσκάφη, διηπειρωτικούς βαλλιστικούς πύραυλους, πλοία και επιρροές του ωκεανού.

### **1.4 Βήματα στην ανάπτυξη του συστήματος του ραντάρ**

Το ραντάρ δεν είναι μια στάσιμη τεχνολογία. Είναι σπανίως αλήθεια ότι "το μοντέλο της προηγούμενης χρονιάς" είναι η καλύτερη μέθοδος για την λύση του προβλήματος της επόμενης χρονιάς. Η απαίτηση ενός καινούργιου ραντάρ σημαίνει ένα καινούργιο σχέδιο.

Δεν υπάρχει ένας μόνο τρόπος για την παραγωγή ενός καινούργιου σχεδίου συστήματος ραντάρ. Κάθε σχεδιαστής συστήματος αναπτύσσει το δικό του ή δικό της στυλ. Αρκετά

συχνά ο πιθανός πελάτης θα προσδιορίσει το είδος του ραντάρ που χρειάζεται για μια ειδική εφαρμογή. Σε άλλες περιπτώσεις είναι ο μηχανικός αυτός που θα προτείνει μια λύση προσφέροντας μια ικανότητα του ραντάρ που δεν ήταν διαθέσιμη πριν. Ιδανικό, αντί να είναι απομονωμένοι αναμεταξύ τους κατά την διάρκεια της φάσης ανάπτυξης της ιδέας, ο πελάτης και ο μηχανικός θα έπρεπε να δουλεύουν μαζί για να σχεδιάσουν ένα ραντάρ που θα πετύχει καλύτερα το επιθυμητό έργο. Δυστυχώς η συνεργασία σ' αυτό το στάδιο ανάμεσα στον πελάτη και τον σχεδιαστή του ραντάρ δεν εφαρμόζεται τόσο συχνά όσο θα έπρεπε.

Σε γενικές γραμμές παρακάτω είναι τα βήματα που ίσως παρθούν για τον σχεδιασμό ενός ραντάρ (ή οποιουδήποτε άλλου συστήματος ) για να ικανοποιήσει τις ανάγκες του πελάτη. Δεν υπάρχει τίποτα κρυφό για την διαδικασία και ίσως ακόμη να μπορεί να ονομαστεί φανερό. Όμως είναι εκπληκτικό πόσο συχνά το φανερό αγνοείται.

## **1.5 Βήματα σχεδιασμού ραντάρ**

### Ορισμός της ανάγκης ή του προβλήματος

Ο πελάτης πρέπει πρώτα να περιγράψει το πρόβλημα για να λυθεί σε λειτουργικές περιόδους που ξεκάθαρα ορίζουν το έργο που το ραντάρ πρέπει να πετύχει όπως επίσης και οποιουδήποτε περιορισμούς που πρέπει να είναι κατάλληλοι. Όταν ο πελάτης περιγράφει τις ανάγκες του /της όσον αφορά συγκεκριμένες τεχνικές απαιτήσεις, αυτό περιορίζει τις επιλογές που είναι διαθέσιμες για τον σχεδιαστή. Ο πελάτης θα έπρεπε να αποφεύγει τον πειρασμό να το κάνει αυτό.

### Αλληλοεπίδραση ανάμεσα στον πελάτη και τον μηχανικό

Ο μηχανικός πρέπει να περιγράψει τα πιθανά προβλήματα ανάμεσα στην εκτέλεση και το κόστος (ή ρίσκο, χρόνος, ή οτιδήποτε άλλο είναι σημαντικό για τον πελάτη ). Οι εξηγήσεις πρέπει να γίνονται έτσι ώστε να τη καταλαβαίνει ο πελάτης. Θα πρέπει να υπάρχει μια ανταλλαγή "δώσε" και "πάρε" ανάμεσά τους για να καθορίσουν τις απαιτήσεις για να



κατορθώσουν αυτό που είναι επιθυμητό. Ίσως να είναι σοφό σ' αυτό το βήμα να εξετάσουν εάν οποιαδήποτε απ' τις απαιτήσεις μπορεί να αλλαχτεί και ακόμα να επιτύχει τις επιδιώξεις του πελάτη, αλλά με πιο απλό ή λιγότερο ακριβό σύστημα. Ο πειρασμός για τον πελάτη να επεκτείνει τις κατανοητές ανάγκες του /της σε μια ακριβή "λίστα επιθυμιών" αδοκίμαστων, υψηλού ρίσκου ικανοτήτων από μόνο περιθωριακές χρησιμότητες θα έπρεπε να αντισταθεί. Η ειλικρινής ανταλλαγή ανάμεσα στον πελάτη και τον μηχανικό είναι ένα σημαντικό βήμα στη διαδικασία του σχεδίου που δεν εκμεταλλεύεται πλήρως σε πολλές περιπτώσεις εξαιτίας των ασυμβίβαστων απαιτήσεων των ανταγωνιστικών τρόπων προμήθειας (απόκτησης) τα οποία επιβάλλονται για ένα εντελώς διαφορετικό σκοπό απ' το να επιτευχθεί η λύση.

#### Εξακρίβωση και διερεύνηση των πιθανών λύσεων

Υπάρχουν συνήθως περισσότεροι από έναν τρόπο για να λύσεις ένα πρόβλημα (αυτό είναι αποδεδειγμένο εξετάζοντας τη διαφορά ανάμεσα στους καταλόγους των διάφορων κατασκευαστών του ραντάρ). Αυτοί σπάνια λύνουν το ίδιο πρόβλημα με το ίδιο είδος διαμόρφωσης του ραντάρ. Η κάθε μια από τις πιθανές λύσεις θα έπρεπε να εξεταστεί με ικανοποιητικές λεπτομέρειες για να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά τους και για να εξακριβωθούν τα υπέρ και τα κατά.

#### Επιλογή του άριστου

Το άριστο δεν σημαίνει απαραίτητα "το καλύτερο". Είναι το καλύτερο κάτω από τις πιθανότητες που προσδιορίζουν το πρόβλημα. Μερικά καλώς ορισμένα κριτήρια ή μέτρο αποτελεσματικότητας είναι σημαντικά για την εκλογή του άριστου. Μερικές φορές το "σχεδόν άριστο" είναι εξίσου καλό, από άποψη μηχανικής, με το "κάπως ονομαζόμενο άριστο". Είναι η παραδοσιακή δουλειά του μηχανικού να παρέχει μια αποδεκτή λύση που θα συναντήσει τις ανάγκες του πελάτη μέσα στα όρια του κόστους. Κόστος δεν είναι απλώς το οικονομικό κόστος σε δολάρια αλλά το "κόστος" σε μέγεθος και βάρος, και το "κόστος" που συμβαίνει εάν το σύστημα δεν καταφέρει να κάνει τη δουλειά του όπως ήταν αναμενόμενο.

### Λεπτομερής περιγραφή του συλλεκτικού συστήματος προσέγγισης

Αυτό ίσως να έχει τη μορφή ενός διαγράμματος με μια περιγραφή της εκτέλεσης που απαιτείται, κάποια ένδειξη της περιπλοκής του και το τεχνικό ρίσκο.

### Ανάλυση και εκτίμηση των προτεινόμενων λύσεων

Αυτό είναι για το σκοπό εξακρίβωσης πόσο καλά η λύση του ραντάρ συναντά τις ανάγκες του πελάτη. Δεν είναι ασυνήθιστο, μετά από ανάλυση και εξακρίβωση του προτεινόμενου σχεδίου γι' αυτό να είναι απαραίτητο να επιστρέψει σ' ένα προηγούμενο βήμα και να ξεκινήσει ξανά για να σιγουρευτεί ότι δεν υπάρχει ένας καλύτερος τρόπος για να λυθεί το πρόβλημα.

Η επιτυχημένη ολοκλήρωση αυτών των διαδικασιών οδηγεί στην ανάπτυξη και επίδειξη του επιθυμητού συστήματος ραντάρ. Είναι σημαντικό να ξοδέψεις αρκετή ώρα στα στάδια προγραμματισμού (κατάστρωσης του σχεδίου). Ο προγραμματισμός είναι σχετικά φθηνός και αξίζει την ώρα. Απ' την στιγμή που θα αρχίσει η κατασκευή του 'hardware', μεγάλες δαπάνες χρημάτων διαπράττονται και είναι δύσκολο να αλλάξει κάτι χωρίς σημαντικό προστιθέμενο κόστος στον χρόνο, τα χρήματα και άλλες παρόμοιες δυσκολίες.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

### ΠΕΝΗΝΤΑ ΧΡΟΝΙΑ ΡΑΝΤΑΡ

#### 2.1 Εισαγωγή :

Αν και είναι δύσκολο να ορίσεις μια ακριβή ημερομηνία για την γέννηση του μοντέρνου ραντάρ, η πραγματική του ανάπτυξη άρχισε ανεξάρτητα και σχεδόν ταυτόχρονα σε κάμποσες χώρες του κόσμου κατά τα μέσα του 1930, περίπου πριν 50 χρόνια. Γι' αυτό το ειδικό θέμα πάνω στο ραντάρ των ενεργειών του IEEE (Φεβρουάριος 1985) και η IEEE Διεθνής διάσκεψη του ραντάρ (Μάιος 1985) και τα δύο συμβαίνουν, λίγο – πολύ, στην χρυσή επέτειο του μοντέρνου ραντάρ. Σαν μια εισαγωγή σ' αυτό το ειδικό θέμα, μια σύντομη ανακεφαλαίωση των ικανοτήτων των τελευταίων 50 χρόνων θα δοθεί, μαζί με την τωρινή κατάσταση του ραντάρ.

Πριν πενήντα χρόνια, τα παρακάτω γεγονότα του ραντάρ έγιναν :

- Στο ναυτικό εργαστήριο έρευνας στην Ουάσιγκτον, DC, A. HOYE Taylor, L.C. Young, και Robert Paye μόλις είχαν συμπληρώσει τεστ του παλμικού ραντάρ 60-MHz που εντόπιζε αεροσκάφη τον Δεκέμβριο του 1934 (αλλά όχι με μεγάλη επιτυχία απ' τη στιγμή που ο δέκτης ήταν μικρής ζώνης συχνότητας και προκαλούσε έκταση τις αντήχησης).
- Στη Μεγάλη Βρετανία, ο Robert Watson – Watt, επόπτης του τμήματος Ράδιου του εργαστηρίου Εθνικής Φυσικής μετέφερε ένα σημείωμα (υπόμνημα) στην επιτροπή Tizard το Φεβρουάριο του 1935, περιγράφοντας πως τα ραδιοκύματα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για εντοπισμό αεροσκαφών. Του επέτρεψαν να προχωρήσει να εξηγεί (επιδεικνύει) τον Ιούνιο του 1935 αυτό που τώρα θα ονομαζόταν βιοστατικό CW ραντάρ, ακολουθούμενο τον Σεπτέμβριο του 1935 από παλμικό ραντάρ εντοπισμού αεροσκαφών με συχνότητα 30-MHz.
- Το Φεβρουάριο του 1935, το Γαλλικό Ναυτικό κανόνισε για συγκριτικά τεστ ενός βιοστατικού CW ραντάρ με μήκος κύματος 4-m (75-MHz) κατανοητό από τον Pierre David, ενός μηχανικού στο Εθνικό Ραδιοηλεκτρικό Εργαστήριο και ενός ραντάρ με μήκος κύματος 16-cm.

- Πριν, το Σεπτέμβριο του 1935, ο Dr. Rudolph Kuhnold, αρχηγός (ο μεγαλύτερος) του τμήματος έρευνας σημάτων του Γερμανικού Ναυτικού έδειξε πάνω σε πλοίο ένα παλμικό ραντάρ με 600-MHz στον αρχιστράτηγο του Γερμανικού Ναυτικού.
- Την άνοιξη του 1935, ο Guglielmo Marconi, επιδείκνυε στην Ιταλία ένα CW (ντόπλερ) ραντάρ εντοπισμού οχημάτων και ανθρώπων.
- Ένα γκρουπ καθοδηγούμενο από τον B.K. Shembel στο Ηλεκτροφυσικό Ινστιτούτο Leningrad (αργότερα ονομάστηκε το Ινστιτούτο Επιστημονικής Έρευνας ) εξήγησε στις 22 Οκτωβρίου του 1935 τον εντοπισμό αεροσκάφους σε μια απόσταση από 5 ως 6 Km χρησιμοποιώντας ένα (ντόπλερ) CW ραντάρ σ' ένα μήκος κύματος 25 cm ( 1200-MHz, η σημερινή L-ζώνη συχνότητας) με δύναμη (ενέργεια) 8W που παράγεται από ένα θετικό ηλεκτρόδιο μαγνήτρου και δύο ξεχωριστές 2-m διαμέτρου παραβολικές κεραιές μεταβίβασης και κεραιές που δέχονται, δεμένες δίπλα-δίπλα.
- Λίγο αργότερα, το 1936, η αρχή του (ντόπλερ) ραντάρ προτάθηκε και αργότερα εξηγήθηκε απ' τον K. Okabe στην Ιαπωνία.

Κάθε μια απ' αυτές τις χώρες εμφάνισαν και ανέπτυξαν μερικά είδη στρατιωτικών ραντάρ κατά τη διάρκεια του 2<sup>ου</sup> Παγκοσμίου Πολέμου. Φαίνεται ότι η αρχική εμφάνιση σε όλες τις χώρες έγινε κρυφά χωρίς γνώση του τι γινόταν οπουδήποτε αλλού.

## **2.2 Εμφανίσεις (αναπτύξεις) του ραντάρ των πρώτων 5 δεκαετιών**

### **1930s**

Η βασική αρχή του ραντάρ εξηγήθηκε από τον Heinrich Hertz το 1888, και μια τεχνική για τον εντοπισμό των πλοίων, βασισμένη στα πειράματα του, εξετάστηκε στην Γερμανία στις αρχές του 1900. Τίποτα δεν έγινε για να εκμεταλλευτούν αυτές τις πρώτες επιδείξεις, αν και για πολλά χρόνια πριν την πραγματική εφεύρεση του ραντάρ στα μέσα του 1930 υπήρχαν αναφορές για ραδιοκύματα που αντανακλούνταν από αντικείμενα. Αυτό παρέμεινε, όμως, μέχρι τα μέσα του 1930 πριν να εμφανιστεί το ραντάρ στις περισσότερες χώρες το οποίο

είχε μια καλή τεχνολογική βάση στο ράδιο. Ένας πιθανός λόγος για τον σάλο του στο χρόνο ενδιαφέροντος για εντοπισμό ραδίου εκείνο τον καιρό ήταν το ωρίμασμα στις αρχές του 1930 του μοντέρνου αεροπλάνου καθώς ένα βομβαρδιστικό αεροπλάνο με μεγάλη κατεύθυνση ήταν ικανό να προκαλέσει σημαντική ζημιά με το μεγάλο του φορτίο. Γι' αυτό ίσως να ειπώθηκε, ότι το ραντάρ εφευρέθηκε ως απάντηση στο μοντέρνο βομβαρδιστικό αεροπλάνο.

Το 1930 βρήκε τις περισσότερες απ' τις κύριες χώρες να εξερευνούν το βιοστατικό CW ραντάρ, το οποίο χαρακτηρίζεται απ' τις κεραίες μετάδοσης και λήψης που είναι ξέχωρες η μια απ' την άλλη. Αεροσκάφη που διαπέρασαν ανάμεσα απ' τον μεταδότη και τον δέκτη εντοπίστηκαν απ' το χτύπο του (ντόπλερ) ανάμεσα απ' το άμεσο σήμα (απ' τον μεταδότη στον δέκτη) και το σήμα που διαλύθηκε απ' τον στόχο. Αν και ο γαλλικός και ρωσικός στρατός εμφάνισαν το βιοστατικό CW ραντάρ πριν την είσοδο τους στο 2<sup>ο</sup> παγκόσμιο πόλεμο, ο εντοπισμός στόχων με ράδιο για σημαντικές στρατιωτικές εφαρμογές δεν πάρθηκε σοβαρά μέχρι την επιτυχημένη ανάπτυξη του μονοστατικού παλμικού ραντάρ. Το βιοστατικό ραντάρ απλώς ήταν πολύ περιορισμένο.

Οι πρώτοι λογισμοί παλμικού ραντάρ από αεροσκάφος έγιναν το Δεκέμβριο του 1934 από το εργαστήριο ναυτικής έρευνας αλλά δεν ήταν πλήρως επιτυχημένος γιατί ο δέκτης που ήταν διαθέσιμος ήταν μικρής ζώνης συχνότητας. Παρέμεινε μέχρι τον Απρίλιο του 1936 πριν το NRL ξεπεράσει αυτό το πρόβλημα. Το duplexer, το οποίο επέτρεψε να χρησιμοποιηθεί μια συνηθισμένη κεραία και για μετάδοση και για λήψη, συνενώθηκε απ' το NRL σ' ένα παλμικό 200 – MHz ραντάρ κατά την διάρκεια του Ιουλίου του 1936. Αυτό ήταν ένα σημαντικό κατόρθωμα που δεν αντιγράφηκε από άλλους για κάμποσα χρόνια. Η πρώτη επίδειξη του NRL ραντάρ στη θάλασσα ήταν τον Απρίλιο του 1937, το οποίο οδήγησε στην ανάπτυξη ενός ραντάρ που έχει σχέση με στρατιωτικές επιχειρήσεις από το ναυτικό ηνωμένων πολιτειών το CXAM, που άρχισε το 1940. Πριν τον Δεκέμβριο του 1941 υπήρχαν 79 ραντάρ διαφόρων ειδών τοποθετήθηκαν στα πλοία του ναυτικού των ΗΠΑ.

Ο στρατός των ΗΠΑ άρχισε τη δουλειά του παλμικού ραντάρ την άνοιξη του 1936 και έκανε το πρώτο του τεστ τον Δεκέμβριο του 1936. Ένα σύστημα που είχε σχέση με στρατιωτικές επιχειρήσεις δοκιμάστηκε το φθινόπωρο του 1938.

Η μεγάλη Βρετανία άρχισε την ανάπτυξη αργότερα από τις ΗΠΑ αλλά επιταχύνθηκαν γρήγορα και επιτυχημένα επέδειξαν τα πρώτα του ραντάρ που έχουν σχέσεις με στρατιωτικές επιχειρήσεις πριν το 1937. Ήταν σε 24ωρη λειτουργία πριν το Σεπτέμβριο του 1938.

Οι σοβιετικοί ξεκίνησαν την ανάπτυξη του ραντάρ το 1934 και συνέχισαν να εξερευνούν τρία είδη ραντάρ : 1) ένα βιοστατικό CW ραντάρ (RUS – 1) που λειτούργησε σε μήκος κύματος 4 m (75MHz) με χώρισμα 35-kW ανάμεσα απ' τον μεταδότη και το δέκτη, και το οποίο έγινε δεκτό απ' το σοβιετικό στρατό τον Δεκέμβριο του 1939, 2) ένα παλμικό ραντάρ (RUS – 1) που λειτουργεί με μήκος κύματος 4 – m με μέγιστη κατεύθυνση 150 Km, έγινε δεκτό τον Ιούλιο του 1940 και χρησιμοποιήθηκε για την κατεύθυνση αεροσκαφών που παρεμποδίζονται και 3) πειραματικά αντιαεροπορικά ραντάρ ελέγχου πυροβολισμών (σε συχνότητες τόσο υψηλές όσο 2000 MHz με κατευθύνσεις (ταχύτητα) από 12 μέχρι 20 Km.

Η Γαλλία ακολούθησε δύο μονοπάτια στην ανάπτυξη του ραντάρ, και τα δύο CW. Το ένα, κάτω απ' την κατεύθυνση του Pierre David, ήταν σε μεγάλα μήκη κύματος (4m). Αυτό αναπτύχθηκε σ' ένα βιοστατικό CW σύστημα που έχει σχέση με στρατιωτικές επιχειρήσεις λειτουργώντας ως ένα φράγμα, ή φράχτη ( ο David πρώτα πρότεινε αυτή την ιδέα το 1928). Χρησιμοποιώντας παραπάνω από ένα φράγμα (φράχτη), μπορούσαν να αποκτηθούν η πορεία (κατεύθυνση ) του στόχου και η ταχύτητα, (ένα μόνο βιοστατικό CW φράγμα αποκτάει μόνο εντοπισμό αλλά όχι τοποθεσία ή ταχύτητα καθώς ο στόχος διαπερνάει ανάμεσα απ' τον μεταδότη και τον δέκτη. Το άλλο ήταν ένα CW σύστημα με μήκος κύματος 16cm που έπρεπε να εγκαταλειφθεί εξαιτίας της χαμηλής δύναμης. Αν και ο David πρότεινε ένα μονοστατικό σύστημα ραντάρ τον Οκτώβριο του 1938, η Γαλλία δεν έκανε

τίποτα σ' αυτό το πεδίο μέχρι η Βρετανία να αποκαλύψει τις δικές της αναπτύξεις στο ραντάρ σ' αυτούς τον Απρίλιο του 1939.

Όπως τους Γάλλους και τους Ρώσους, οι Γερμανοί επίσης πειραματίστηκαν τα μικροκύματα το 1934 αλλά δεν τα επιδίωξαν εξαιτίας της χαμηλής δύναμης. Το πρώτο πρωτότυπο αυτού που ήταν να γίνει το ευρέως αναπτυξιακό Γερμανικό Freya ραντάρ γρήγορης προειδοποίησης για τον εντοπισμό αεροσκαφών ξεκίνησε το 1936. Ένα ραντάρ ελέγχου φωτιάς (πυροβολισμού) που λειτουργούσε σε 375 MHz με μέγιστη δύναμη 7 kW τοποθετήθηκε στο πλοίο Graf Spee το 1936 και ήταν πάνω στο πλοίο όταν αυτό συμμετείχε στον Ισπανικό εμφύλιο πόλεμο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού το 1938. Αυτό το ραντάρ είχε μια κατεύθυνση (ταχύτητα) 10 nmi εναντίον μεγάλων πλοίων. Οι Γερμανοί επίσης παρήγαγαν το Wurzburg ραντάρ μέχρι το τέλος του 1938. Αυτό λειτουργούσε με 560MHz με μια κατοπτρική κεραία διαμέτρου 3m. Η Γερμανική αεροδύναμη παρήγγειλε 5000 Wurzburg ραντάρ. Στο ξεκίνημα του 2<sup>ου</sup> Παγκοσμίου πολέμου το Γερμανικό ραντάρ ήταν αρκετά καλό. Μια πηγή λει ότι το Γερμανικό ραντάρ ήταν κάπως πιο πάνω απ' το ραντάρ των Ηνωμένων Πολιτειών. Άλλη μια πηγή είπε ότι ο εξοπλισμός εδαφική ακρίβειας ήταν `` δεύτερο προς τίποτα ``.

Εκτός απ' το Chain Home ραντάρ του Ηνωμένου Βασιλείου, το οποίο λειτουργούσε σε HF (25-30 MHz), τα επιτυχημένα ραντάρ του 1930 χαρακτηρίστηκαν από λειτουργία σε VHF και UHF. Τα περισσότερα από τα Allied ραντάρ ήταν σε συχνότητες από περίπου 75 μέχρι 200 MHz, απ' τη στιγμή που αυτό συμβόλιζε (τόνιζε) το όριο της τεχνολογίας της λυχνίας άδεια από αέρα εκείνο τον καιρό ( οι Γερμανοί χρησιμοποίησαν ραντάρ ως και 600 MHz ). Αν και ίσως φαινόταν σαν καθημερινή ρουτίνα, η λειτουργία σε VHF το 1930 ήταν πρωτοποριακή και προκλητική. Αυτή η ζώνη συχνότητας ίσως να μην ήταν πολύ ελκυστική για το μοντέρνο ραντάρ εξαιτίας του μεγάλου πλάτους ακτίνας, του μικρού πλάτους ζώνης συχνότητας και του μεγάλου περιβαλλόμενου θορύβου αλλά εν τούτοις παρείχε μια χρήσιμη ικανότητα που εκτιμήθηκε πολύ εκείνο τον καιρό και εφαρμόστηκε ευρέως. Μια απ' τις πιο

σημαντικές εξελίξεις που επηρέασαν το μοντέρνο ραντάρ συνέβησαν στο τέλος της δεκαετίας, το 1939, όταν το κύμα (μάγκνετρο) υψηλής δύναμης εφευρέθηκε στην Αγγλία.

### **1940s**

Η αρχή του 1940 είδε την ανάπτυξη του πρωτοποριακού VHF ραντάρ του 1930 μαζί με την είσοδο (σύσταση) των μικροκυμάτων, η οποία έγινε δυνατή από την Βρετανική εφεύρεση του magnetron. Το magnetron οδήγησε το ραντάρ στο να λειτουργεί με υψηλότερες συχνότητες που επέτρεψαν να ξεπεραστούν οι κύριοι περιορισμοί του VHF (παρέχοντας μικρά πλάτη ακτίνας και μεγάλα πλάτη ζώνης συχνότητας). Επέτρεψε την ανάπτυξη του μεγάλου ραντάρ εναέριας παρακολούθησης που είχε την βάση του στο έδαφος με L-ζώνη συχνότητας (23-cm μήκος κύματος ) και S-ζώνη συχνότητας ( 10 cm) όπως επίσης και μικρά εναέρια ραντάρ με X-ζώνη συχνότητας ( 3 cm). Στις αρχές της δεκαετίας ο στρατός των Ηνωμένων Πολιτειών αποφάσισε να συνεχίσει να συγκεντρώνεται στην ανάπτυξη του VHF και UHF ραντάρ όπως ξεκίνησε στα τέλη του 1930. Η ευθύνη για την ανάπτυξη των ραντάρ στην ανεξερεύνητη περιοχή μικροκυμάτων του φάσματος δόθηκε στο καινούριο ΜΤΙ εργαστήριο ακτινοβολίας. Η απόφαση να συγκεντρωθούν στο ραντάρ μικροκυμάτων στο ΜΤΙ πάρθηκε πριν να έχουν οι Ηνωμένες Πολιτείες γνώση της ανάπτυξης του magnetron υψηλής δύναμης (ισχύος) από τους Βρετανούς. Το ΜΤΙ εργαστήριο ακτινοβολίας ήταν πολύ πετυχημένο στο να χρησιμοποιεί την καινούρια τεχνολογία μικροκυμάτων σε στρατιωτικά ραντάρ για εναέριες χερσαίες και θαλάσσιες εφαρμογές. Ακριβώς 150 ξεχωριστά συστήματα ραντάρ αναπτύχθηκαν ως αποτέλεσμα του προγράμματος του εργαστηρίου ακτινοβολίας. Σαν παραδείγματα των κατορθωμάτων του εργαστηρίου ακτινοβολίας, τρία ραντάρ μικροκυμάτων θα περιγραφούν σύντομα :

- 1) το SCR-584 ραντάρ εύρεσης στόχου που έγινε από το General Electric και το Westing house,
- 2) το εναέριο SCR-720 ραντάρ αναχάιτισης που κατασκευάστηκε απ' το Western Electric Co.,



3) το εναέριο Eagle ραντάρ βομβαρδισμού που κατασκευάστηκε απ' το Western Electric. Το SCR-584 ήταν το πρώτο και πιο ευρέως χρησιμοποιημένο ραντάρ μικροκυμάτων ανεύρεσης στόχου. Χρησιμοποίησε κωνική εξερεύνηση και με το πλάτος ακτίνας του  $4^\circ$  είχε ικανοποιητική γωνιακή ακρίβεια για να κατευθύνει αντιαεροπορικά όπλα σε στόχους χωρίς την ανάγκη ηλεκτρικών προβολέων ή οπτικών, όπως ήταν στην περίπτωση του παλιότερου συνεχώς κινούμενου VHF SCR-268 ραντάρ. Το SCR-584 λειτουργούσε με S-ζώνη συχνότητας με μια παραβολική κατοπτρική κεραία διαμέτρου 6-ft. Το ψάξιμο έντασης γινόταν εξερευνώντας ελικοειδώς την ακτίνα για να καλύψει οποιοδήποτε τομέα ανύψωσης  $20^\circ$ . Η κατεύθυνση (ταχύτητα) εναντίον βομβαρδιστικών αεροσκαφών ήταν περίπου 30 nmi. Η ανάπτυξη του SCR-584 πρωτοεμφανίστηκε στο MIT εργαστήριο ακτινοβολίας τον Ιανουάριο του 1941, μια κινητή μονάδα συναρμολογούμενων φορτηγών επιδείχτηκε τον Δεκέμβριο του 1941, η παραγωγή άρχισε τον Απρίλιο του 1942, η πρώτη παραγωγική σειρά μεταφέρθηκε στις 15 Ιουνίου του 1943 και το ραντάρ χρησιμοποιήθηκε σε μάχη στις αρχές του 1944 στο Anzio Beach head. Η σύστασή (εισαγωγή) του ήταν αρκετά έγκαιρη απ' τη στιγμή που οι Γερμανοί είχαν δυναμικά αποσιωπήσει τον προκάτοχό του, το SCR-268, με ηλεκτρονικές καταμετρήσεις. Η σύσταση (εισαγωγή) του ραντάρ μικροκυμάτων βρήκε τους Γερμανούς απροετοίμαστους. Σχεδόν 2000 απ' αυτά τα ραντάρ παραγγέλθηκαν. Το SCR-584 ήταν ένα καλό ραντάρ. Μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για διάφορες εφαρμογές του ραντάρ πολλά χρόνια μετά το τέλος του πολέμου.

Συνειδητοποιήθηκε αρκετά νωρίς στο εργαστήριο Ακτινοβολίας ότι το ραντάρ μικροκυμάτων μπορούσε να το κάνει δυνατό να γίνει, με λογικού μεγέθους κεραίες, εναέριο ραντάρ με μικρά πλάτη ακτίνας. Το SCR-720 ήταν ένα AL ραντάρ με S-ζώνη συχνότητας που χρησιμοποιήθηκε σε νυχτερινά μαχητικά αεροσκάφη. Το paraboloidal κάτοπτρο διαμέτρου 29 cm περιστρεφόταν συνεχόμενα σε αζιμούθιο και αργά έκλινε προς ανύψωση για να καλύψει μια γωνιακή ανύψωση  $25^\circ$ . Είχε πλάτος ακτίνας  $10^\circ$ , μια μέγιστη δύναμη από 100 ως 150 KW, μέση δύναμη από 112 ως 170 W, βάρος 415 Ib και υποτίθεται ότι είχε

μια κατεύθυνση (ταχύτητα) περίπου 4 nmi σε μαχητικά αεροσκάφη και 8.5 nmi σε βομβαρδιστικά αεροσκάφη. Η μεταφορά του SCR-720 άρχισε την άνοιξη του 1943 και κάμποσες χιλιάδες είχαν παραχθεί μέχρι την D-ημέρα (6 Ιουνίου 1944).

Υπήρχαν πολλά αξιοσημείωτα ραντάρ που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια του πολέμου, αλλά το Eagle ραντάρ βομβαρδισμού υψηλής ανάλυσης ξεχωρίζει σαν προϊόν ανακαινιστικής σκέψης που προκάλεσε τη διαθέσιμη τεχνολογία με το προοδευτικό του σχέδιο και τις ικανότητές του. Ο συγγραφέας έχει μερικές φορές αναρωτηθεί αν ένα τέτοιο ραντάρ θα είχε ποτέ εμφανιστεί και αναπτυχθεί στρατιωτικά χωρίς τις πιέσεις των αναγκών της πολεμικής περιόδου. Αυτό γιατί αν δεν είχε αναπτυχθεί επιτυχώς κατά τη διάρκεια του πολέμου ίσως ποτέ να μην είχε επιχειρηθεί κατά τη διάρκεια ειρήνης. Το Eagle AN/APQ-7 ήταν ένα ραντάρ υψηλής ανάλυσης με μια X-ζώνη συχνότητας για τυφλό βομβαρδισμό σε μεγάλο ύψος. Αυτό είχε μια μοναδική κεραία σε θέση φάσεως, 16 ft σε μήκος η οποία παρήγαγε ένα πλάτος ακτίνας  $0.4^\circ$  που μπορούσε να εξερευνηθεί  $\pm 30^\circ$  σε αζιμούθιο με ένα ρυθμό 1.5 εξερευνήσεως ανά δευτερόλεπτο μεταβάλλοντας μηχανικά το φάρδος της κεραίας σε γραμμική θέση. Αυτό ονομάζεται ένας Eagle εξερευνητής ή δέλτα εξερευνητής. Με μέγιστη δύναμη 50 kW και μέση δύναμη 30W το ραντάρ μπορούσε να παρέχει εικόνες πόλεων σε κατευθύνσεις (ταχύτητες) μέχρι 160 mi. Το ολικό βάρος ήταν 764 lb. Η δουλειά ξεκίνησε τον Νοέμβριο του 1941. Υπήρξε πολύς σκεπτικισμός για την προσέγγιση μέσα στο εργαστήριο ακτινοβολίας έτσι ώστε το σχέδιο αναγκάστηκε να προχωρήσει με χαμηλή προτεραιότητα. Όμως, ηχητικές τεχνικές λύσεις βρέθηκαν για καθένα απ' τα προβλήματα και το Eagle έκανε το πρώτο τεστ πτήσης τον Ιούνιο του 1943. Τον Ιούνιο του 1944, 1660 σετ παραγγέλθηκαν. Το Eagle ραντάρ χρησιμοποιήθηκε στρατιωτικά πολύ αργά στην Ευρώπη αλλά χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία στον Πασιφικό.

Όπως αναφέρθηκε πριν, ο Στρατός και τα Ναυτικά εργαστήρια συγκέντρωσαν τις προσπάθειές τους σχετικά με τα ραντάρ σε συχνότητες χαμηλότερες απ' των μικροκυμάτων. Ένα παράδειγμα είναι το Ναυτικό ραντάρ των Ηνωμένων Πολιτειών που ονομάζεται ASB,

το πρώτο στρατιωτικό εναέριο ραντάρ των Ηνωμένων Πολιτειών που χρησιμοποιήθηκε ευρέως για βομβαρδισμό, εντοπισμό πλοίων και υποβρυχίων και εναέρια αναχαίτιση. Πάνω από 26000 εξοπλισμοί (εφόδια) προμηθεύτηκαν (απ' το 1942 ως το 1944), η μεγαλύτερη προμήθεια οποιουδήποτε άλλου ραντάρ κατά τη διάρκεια του πολέμου. Το ραντάρ λειτουργούσε μια 515 MHz (UHF) με μέγιστη δύναμη από 5 ως 10 kW και μέση δύναμη περίπου 4W. Το ολικό βάρος ήταν 120 Ib. Όμοιες Yagi κεραίες με πλάτος ακτίνας 60° ήταν δεμένες κάτω από κάθε πτερύγιο. Οι δύο κεραίες μπορούσαν να περιστρέφονται ξεχωριστά μάσα από 90° απ' τον χειριστή. Έχει ειπωθεί ότι το ASB ήταν ένα απ' τα πιο επιτυχημένα απ' όλα τα ASV ραντάρ.

Σημειώθηκε προηγουμένως ότι οι Γερμανοί ήταν πιθανόν πολύ πιο μπροστά από οποιαδήποτε άλλη χώρα στην εμφάνιση και ανάπτυξη του ραντάρ στις αρχές του 2<sup>ου</sup> παγκοσμίου πολέμου. Η Βρετανία και οι Ηνωμένες Πολιτείες επιτάχυναν τις προσπάθειες του στις αρχές του 1940 αλλά όχι οι Γερμανοί. Η ανάπτυξη του ραντάρ δεν είχε μεγάλη προτεραιότητα στη Γερμανία κατά τη διάρκεια του πολέμου. Κοντά στα τέλη του 1940, ο Γερμανός διοικητής νόμισε ότι ο πόλεμος θα κερδίζονταν σε μικρό χρονικό διάστημα και ότι τα ραντάρ που υπήρχαν ήταν αρκετά. Σταμάτησαν όλες τις έρευνες που δεν θα παρήγαγαν τελειωμένο εξοπλισμό (εφόδια) σε λιγότερο από ένα χρόνο και πολλοί από τους επιστήμονες πήγαν στον Στρατό. Αυτή η πολιτική (τακτική) υπήρχε μέχρι τις αρχές του 1943. Όταν οι Γερμανοί συνειδητοποίησαν ότι ήταν πίσω, ήταν πολύ αργά να προλάβουν.

Την εποχή της εισβολής της Σοβιετικής Ένωσης στους Γερμανούς, 45 RUS-1 βιοστατικά CW ραντάρ είχαν κατασκευαστεί απ' την Σοβιετική Ένωση. Αυτά στάλθηκαν στην Μακρινή Ανατολή και στον Καύκασο. Η παραγωγή του RUS-1 σταμάτησε με το ξεκίνημα της παραγωγής του RUS-2 και του RUS-2c και τα δυο παλμικά ραντάρ. Λειτουργούσαν με 75 MHz με μέγιστη δύναμη από 70 ως 120 kW, 900-Hz PRF και Yagi κεραίες με μεγάλο πλάτος ακτίνας. Η μέγιστη κατεύθυνση (ταχύτητα) ήταν περίπου 150 Km. Το RUS-2 χρησιμοποιούσε ξεχωριστά συστήματα μεταδότη και δέκτη πάνω σε ξεχωριστά οχήματα,

αραιωμένα περίπου 300W για να παρέχουν απομόνωση κεραίας. Το RUS-2c ήταν ικανό να λειτουργεί με μια μονή κεραία και για μετάδοση και για λήψη κόνοντάς το ένα πιο χρήσιμο εξοπλισμό. Πέρα απ' αυτά τα δύο ραντάρ παρακολούθησης, η Σοβιετική Ένωση χρησιμοποίησε για την άμυνα της απ' τη Μόσχα τα πειραματικά χαμηλής δύναμης αντιαεροπορικά ραντάρ μικροκυμάτων που ήταν διαθέσιμα.

Ένα μεγάλο μέρος της Σοβιετικής ανάπτυξης του ραντάρ έγινε στο Leningrad. Το Leningrad έγινε μέρος του πεδίου μάχης και ήταν υπό πολιορκία για το περισσότερο καιρό του αγώνα προκαλώντας τη μεταφορά στην ανατολή αυτών που ασχολούνταν με την ανάπτυξη του ραντάρ. Η μεταφορά προκάλεσε διάρρηξη αλλά μέχρι το τέλος του πολέμου κάμποσα εργοστάσια ήταν ικανά να κατασκευάσουν κάμποσες εκατοντάδες RUS-2 και RUS-2c ραντάρ.

Η ανάπτυξη του ραντάρ μικροκυμάτων που ξεκίνησε κατά τη διάρκεια του πολέμου στις Ηνωμένες Πολιτείες συνεχίστηκε και μετά που τελείωσε ο πόλεμος αλλά με πολύ πιο αργά βήματα. Ο μονοπαλμικός ιχνηλάτης και το MTI (ένδειξη κινούμενου στόχου) ραντάρ, που και τα δύο ξεκίνησαν κατά τη διάρκεια του πολέμου, εξελίχθηκαν στα τέλη του 1940 όπου μπορούσαν να θεωρηθούν χρήσιμα για εφαρμογές. Το μονοπαλμικό, εξαιτίας της ακρίβειάς του και της σχετικής εξαίρεσης σε μερικά είδη ECM, είναι το κύριο ραντάρ τεχνικής ανεύρεσης που είναι διαθέσιμο σήμερα. Όλα τα μοντέρνα ραντάρ εναέριας παρακολούθησης χρησιμοποιούν κάποιο είδος MTI για να εντοπίσουν επιθυμητούς κινούμενους στόχους υπό την παρουσία μεγάλων ανεπιθύμητων αντηχήσεων από τη ξηρά και τη θάλασσα.

Οι ικανότητες του ραντάρ μικροκυμάτων κατά τη διάρκεια του 2<sup>ου</sup> παγκοσμίου πολέμου στο MIT εργαστήριο ακτινοβολίας εγγράφηκαν πλήρως σε μια εντυπωσιακή σειρά 28 τόμων που εκδόθηκαν απ' το

McGraw-Hill Book Co. στα τέλη του 1940. Δυστυχώς άλλες ικανότητες του ραντάρ κατά τη διάρκεια του 2<sup>ου</sup> παγκοσμίου πολέμου δεν εγγράφηκαν με παρόμοιο τρόπο.

## 1950s

Αν και μερικοί απ' τους ιδρυτές του ραντάρ απ' τον 2<sup>ο</sup> παγκόσμιο πόλεμο και στις αρχές του 1930 συνέχισαν να συμμετέχουν στο ραντάρ πολλοί πήγαν σε άλλες δουλειές. Το 1930 είδε την είσοδο της ανάπτυξης του ραντάρ της δεύτερης γενιάς ανάπτυξης μηχανικών ραντάρ. Τα 1950s έχτισαν πάνω στη δουλειά των δύο προηγούμενων δεκαετιών για να αναπτύξουν (επεκτείνουν) τη τεχνολογία. Για παράδειγμα η αρχή του μονοπαλμικού ραντάρ που αναπτύχθηκε το 1940 εφαρμόστηκε στο πολύ επιτυχημένο AN/FPS-16 ραντάρ ανίχνευσης. Αυτό ήταν ένα ενορχηστρωμένο ραντάρ ακριβείας που πέτυχε μια γωνιακή ακρίβεια ανίχνευσης 0.1 mil, μια ικανότητα που δεν υπερβαίνεται ακόμη και σήμερα.

Μια απ' τις χαρακτηριστικές αναπτύξεις του 1950 ήταν η επιστροφή σε χαμηλότερες συχνότητες στο VHF και UHF. Κατά τη διάρκεια του 1940 υπήρξε μια γρήγορη ανοδική εξέλιξη (πορεία) στην συχνότητα από HF και VHF σε μικροκύματα, μέχρι και K-ζώνη συχνότητας. Όμως ενδιαφέρον για το ραντάρ μεγάλης κατεύθυνσης (ταχύτητας) για αξιόπιστο εντοπισμό αεροσκαφών και εντοπισμό διηπειρωτικών βαλλιστικών πυραύλων προκάλεσε μια επιστροφή στο VHF και UHF όπου μεγάλη μέση δύναμη (μέγα-βατ) και μεγάλες κεραίες (εκατοντάδες πόδια σε γραμμική διάσταση) μπορούσαν να αποκτηθούν, όπως επίσης και καλύτερο MTI και λιγότερο θόρυβο απ' ότι σε ψηλές συχνότητες. Τα μεγάλα ραντάρ κατά τη διάρκεια αυτής της δεκαετίας επίσης χρησιμοποιήθηκαν για παρατηρήσεις του φεγγαριού, της αυγής, των μετεωριτών και της Αφροδίτης.

Ο Klystron ενισχυτής υψηλής δύναμης πρωτό-χρησιμοποιήθηκε στο ραντάρ κατά τη διάρκεια αυτής της δεκαετίας. Η διαθεσιμότητα ενός ενισχυτή δύναμης επέτρεψε μια σημαντική αλλαγή στην αρχιτεκτονική του ραντάρ. Προσέφερε αξιόλογα υψηλότερη δύναμη απ' ότι μπορούσε να κατορθωθεί με το magnetron. Θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει πιο παραποιημένα είδη κύματος απ' ότι μια απλή παλμική σειρά και πολλαπλά μηχανήματα θα μπορούσαν να λειτουργήσουν σε σύγκριση για να πετύχουν ακόμα μεγαλύτερη δύναμη απ' ότι από ένα μονό σωλήνα. Ο ενισχυτής Klystron εφευρέθηκε πριν τον 2<sup>ο</sup> παγκόσμιο

πόλεμο και περιγράφηκε στην εφημερίδα εφαρμοσμένης φυσικής το 1939. Αλλά η δυνατότητά του για ραντάρ δεν εκτιμήθηκε μέχρι που ένα χαρτί εμφανίστηκε το 1953 περιγράφοντας ένα σωλήνα μέγιστης δύναμης 20MW και με S-ζώνη συχνότητας που αναπτύχθηκε για το γραμμικό επιταχυντή του πανεπιστημίου Stanford.

Είδη κύματος με παλμική συμπίεση επίσης παρουσιάστηκαν στο ραντάρ το 1950. Η αρχή της παλμικής συμπίεσης ήταν γνωστή πολύ νωρίτερα αλλά πήρε μέχρι το 1950 για να την επιδείξουν σε πρακτικά συστήματα ραντάρ. Η παλμική συμπίεση είναι η χρήση μεγάλου παλμού, με εσωτερική διαμόρφωση, για να αποκτηθεί η ενέργεια μεγάλου παλμού αλλά με την ανάλυση μικρού παλμού. Η πρώτη επίδειξη ραντάρ υψηλής δύναμης παλμικής συμπίεσης έγινε με φάση διαμορφωμένου κώδικα στο οποίο ένας μεγάλος παλμός χωρίστηκε σε 200 υπό-παλμούς, ο καθένας ή με  $0^\circ$  ή με  $180^\circ$  επιλεγμένης σειράς στη τύχη. Το γραμμικό FM είδος κύματος επιδείχτηκε αργότερα ραντάρ με σύνθετο άνοιγμα (SAR) έκανε επίσης την εμφάνισή του κατά της διάρκειάς αυτής της περιόδου. Το SAR είναι μια τεχνική για να πετύχεις ανάλυση στο αζιμούθιο, συγκρινόμενη με την ανάλυση που μπορεί να κατορθωθεί σε κατεύθυνση (ταχύτητα). Αυτό χρησιμοποιεί μια σχετικά μικρή κεραία πλάγιας όψης που κουβαλιέται από ένα αεροσκάφος ( ή από δορυφόρο) για να παράγει ένα χάρτη μιας λωρίδας εδάφους. Η χρήση ραντάρ για εναέρια αποφυγή καιρού και για παρατήρηση καιρού στο έδαφος επίσης ξεκίνησε κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Εναέριο παλμικό (ντόπλερ) ραντάρ, όπως είναι γνωστό σήμερα, πρώτα κατανοήθηκε στις αρχές του 1950 και χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς στα τέλη του 1950 σαν ένα στρατιωτικό ραντάρ αναγνώρισης και στοχεύσεις του στόχου από ψηλά για το πύραυλο αέρος-αέρος Bomarc που αναπτύχθηκε για εναέρια άμυνα απ' την Πολεμική Αεροπορία (αυτή η εμφάνιση πήρε το 1984 το IEEE AES-S πρωτοποριακό βραβείο ).

Υπήρχαν επίσης μερικές "αρνητικές" εμφανίσεις σ' αυτή τη δεκαετία. Το βιοστατικό CW ραντάρ για εντοπισμό αεροσκαφών ξανά ανακαλύφθηκε, τοποθετήθηκε στην DEW γραμμή στον Αρκτικό σαν το AN/FPS-23, αλλά αργότερα μετακινήθηκε. Έγιναν προσπάθειες για να

χρησιμοποιηθεί πολυστατικό ραντάρ στα Plato και Ordir συστήματα εντοπισμού διηπειρωτικών βαλλιστικών πυραύλων αλλά και οι δύο εμφανίσεις αποβλήθηκαν.

Η δεκαετία του 1950, πιθανόν περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη δεκαετία, είδε την πρόοδο της θεωρητικής βάσης του ραντάρ. Πριν από αυτή την περίοδο, το σχέδιο του ραντάρ ήταν βασισμένο αρχικά (όπως θα έπρεπε να είναι) σε μηχανική εμπειρία, τέχνη και κρίση. Η εισαγωγή (σύσταση) των θεωρητικών απόψεων του ραντάρ που συνέβησαν το 1950 επέτρεψαν μια πιο σταθερή βάση για το σχέδιο του ραντάρ απ' ότι ήταν διαθέσιμο πριν. Ευτυχώς η θεωρία που αναπτύχθηκε για το ραντάρ δεν διέψευσε τις πρακτικές εφαρμογές που αναπτύχθηκαν τα προηγούμενα χρόνια. Δεν έδωσε μόνο αυτό πεποίθηση στις υπάρχοντες μηχανικές εφαρμογές που αναπτύχθηκαν από εμπειρία, αλλά έδειξε πως η τέχνη του ραντάρ μπορούσε να επεκταθεί στα θεωρητικά της όρια. Όλη αυτή η θεωρητική δουλειά δεν ήταν διαθέσιμη στην ανοιχτή λογοτεχνία το 1950 και ορισμένη, ήταν ταξινομημένη. Αλλά ήταν σ' αυτή τη δεκαετία που η θεωρία του ραντάρ αναγνωρίστηκε ως μια σημαντική άποψη σχεδίου και ανάπτυξης και χρησιμοποιήθηκε απ' τους μηχανικούς του ραντάρ. Οι θεωρητικές ιδέες που άρχισαν να εκτιμούνται κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου είναι οι παρακάτω

**Εφάμιλλο φίλτρο.** Αυτό αρχικά συστήθηκε από τον D. O. North σε μια ταξινομημένη αναφορά το 1943 και ανατυπώθηκε στο PROCEEDINGS του IEEE τον Ιούλιο του 1963. Ήταν το 1950, όμως, που αυτή η ιδέα έγινε πολύ πιο γνωστή. Ο North έδειξε ότι υπάρχει ένα καλύτερο φίλτρο λήψης που μεγιστοποιεί την αναλογία απόδοσης σήματος προς θόρυβο και επιπλέον μεγιστοποιεί τον εντοπισμό στόχου. Αυτό ονομάζεται εφάμιλλο φίλτρο. Έχει μια λειτουργία αντίδρασης συχνότητας ανάλογη με την πολύπλοκη ένωση του φάσματος,  $S^*(f)$ , του σήματος  $S(t)$  του ραντάρ, όπου  $S(f)$  είναι ο Fourier μετασχηματισμός του  $S(t)$ . Σχεδόν χωρίς εξαίρεση, κάθε δέκτη του ραντάρ σχεδιάζεται όπως το εφάμιλλο φίλτρο ή σαν μια κοντινή προσέγγιση.

**Στατιστική θεωρία του εντοπισμού.** Ο J. Marcum σε μια κλασική Rand Corporation αναφορά που γράφτηκε το 1947, επανεκδόθηκε το 1952 και δημοσιεύτηκε στο IRE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY το 1960, εξέφρασε καθαρά την ανάγκη να θεωρηθεί ο εντοπισμός του ραντάρ σε μια στατιστική βάση. Έδειξε ότι η πιθανότητα εντοπισμού έπρεπε να προσδιοριστεί πριν η αναλογία σήματος -θορύβου που απαιτείται στον δέκτη του ραντάρ μπορούσε να καθοριστεί. Αυτός επίσης έδειξε την ποσοτική αποτελεσματικότητα χρησιμοποιώντας ένα αριθμό παλμών για εντοπισμό. Πριν από αυτό πολλές προβλέψεις για την κατεύθυνση (ταχύτητα) του ραντάρ δεν περιείχαν σωστά την αναλογία σήματος -θορύβου έτσι ώστε η μετρημένη κατεύθυνση (ταχύτητα) των πραγματικών ραντάρ ήταν συχνά απογοητευτική απ' ότι προβλεπόμενη. Αν και η αναφορά του Marcum ήταν μη ταξινομημένη και ευρέως γνωστή στην κοινότητα των ραντάρ των Ηνωμένων Πολιτειών, ήταν περιορισμένης διανομής και το 1960 δημοσιεύτηκε πλήρως στο IRE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY μαζί με την προέκταση του Peter Swerling σε κυμαινόμενους στόχους.

**Διάγραμμα διαφορούμενης έννοιας.** Σ' ένα βιβλίο που δημοσιεύτηκε το 1953, ο P. M. Woodward περιέγραψε το διάγραμμα διαφορούμενης έννοιας το οποίο είναι ένα σχεδιάγραμμα της απόδοσης του εφάμιλλου\_φίλτρου ως μια λειτουργία ωριαίας μετατόπισης στην συχνότητα. Το διάγραμμα διαφορούμενης έννοιας απεικονίζει τα χαρακτηριστικά ενός είδος κύματος σε σχέση με την ικανότητά του αν αποσαφηνίζει στόχους σε κατεύθυνση και σχετική ταχύτητα, την ακρίβεια με την οποία η κατεύθυνση και η σχετική ταχύτητα μπορούν να μετρηθούν και τις ασάφειες που παράγονται στον καθορισμό της κατεύθυνσης και της σχετικής ταχύτητας. Είναι μια εικονογραφημένη μέθοδος για τη διευκρίνιση των ιδιοτήτων ενός συγκεκριμένου είδους κύματος του ραντάρ. Ο Woodward επίσης σύστησε την μαθηματική στατιστική ιδέα αντίστροφης πιθανότητας στο ραντάρ και την εφάρμοσε στον εντοπισμό του ραντάρ και στην πρόβλεψη της ακριβούς μέτρησης του ραντάρ.



**MTI θεωρία.** Η αρχή του MTI ραντάρ συστήθηκε κατά τη διάρκεια του πολέμου, αλλά ήταν η κλασική Rand Corporation αναφορά του Emerson το 1954, η οποία παρείχε μια σταθερή θεωρητική εκτίμηση των ορίων του και έδειξε πώς τα MTI ραντάρ, τα είδη κυμάτων τους και η επεξεργασία, θα έπρεπε να σχεδιαστούν. Αυτός περιέγραψε την ιδέα του άριστου MTI φίλτρου, τη χρήση εγκάρσιων φίλτρων και αραιωμένων παλμικών επαναλαμβανόμενων συχνοτήτων. Η αναφορά του Emerson παρέμεινε ταξινομημένη για λίγο καιρό και δεν ήταν διαθέσιμη για να διαβαστεί. Από τότε από -ταξινομήθηκε και εκδόθηκε. Όταν η αναφορά ήταν ταξινομημένη ήταν αρχικώς "ακαδημαϊκού" ενδιαφέροντος, απ' τη στιγμή που η τεχνολογία επεξεργασίας των σημάτων δεν είχε προχωρήσει σε σημείο που η θεωρία μπορούσε να διαβαστεί. Πρακτικές εφαρμογές της θεωρίας έγιναν δυνατές το 1960 όταν MTI ακουστικές επιβραδυνόμενες γραμμές αντικαταστάθηκαν από ηλεκτρολογική (δακτυλική) επεξεργασία.

### **1960s**

Το 1960 σημειώνεται για τις πρώτες μεγάλες ηλεκτρονικά κατευθυνόμενες θέσεις φάσεως και για το ξεκίνημα της στροφής προς τη ηλεκτρολογική διαδικασία αργά σ' αυτή τη δεκαετία. Το ραντάρ AN/SPS-33 εναέριας άμυνας με θέση φάσεως (τοποθετημένο σε 2 πλοία) του Ναυτικού των Ηνωμένων Πολιτειών και το ραντάρ AN/FPS-85 ανευρέσεως δορυφόρου της πολεμικής αεροπορίας των Ηνωμένων Πολιτειών τέθηκαν σε λειτουργία. Το AN/SPS-33 ήταν ένα ραντάρ σε θέση φάσεως και S-ζώνη συχνότητας με ηλεκτρονικούς μεταθετές φάσεως για να οδηγούν την ακτίνα στο αζημούθιο καθώς η εξερεύνηση συχνότητας οδηγούσε την ακτίνα σε ανύψωση. Το AN/FPS-85 ήταν η πρώτη μεγάλη στρατιωτική σειρά που οδηγούσε την ακτίνα σε δύο γωνιακές συντεταγμένες με τη βοήθεια ηλεκτρονικών μεταθετών φάσεως. Η ανάπτυξη του AN/FPS-85 έδειξε επίσης τη σημαντικότητα του computer με πλήκτρα για τον έλεγχο ραντάρ με θέση φάσεως και ότι τα δεδομένα του computer μπορούν να είναι ένα σημαντικό μέρος του ολικού κόστους του συστήματος.

Η ανάπτυξη της ηλεκτρολογικής τεχνολογίας στα τέλη του 1960 προκάλεσε μια στροφή στην επεξεργασία σήματος του ραντάρ, η οποία ακόμα συνεχίζεται. Η ηλεκτρολογική επεξεργασία επέτρεψε την πρακτική εφαρμογή της θεωρίας του ραντάρ που ήταν μόνο περιορισμένης χρήσεως όταν ανάλογες μέθοδοι ήταν οι μόνες διαθέσιμες.

Η ηλεκτρολογική τεχνολογία εισήχθη στο ραντάρ ήσυχα, χωρίς την υπερβολική έκθεση στην εμπορική βιβλιογραφία που μερικές φορές συνοδεύει καινούρια τεχνολογία.

Οι σχεδιαστές ήταν πολύ απασχολημένοι συγχωνεύοντας την ηλεκτρολογική διαδικασία στα ραντάρ τους και δεν είχαν ώρα ή την ανάγκη για να στενοχωριούνται για την γνωστοποίηση (διαφήμιση) της υπόσχεσης της. Εκτός από μερικά ανάλογα μηχανήματα παλμικής συμπίεσης σχεδόν όλη η επεξεργασία σήματος και δεδομένων στοιχείων είναι τώρα ηλεκτρολογική.

Οι ειδικές τροποποιήσεις σε ένα ΜΤΙ ραντάρ για να το επιτρέψουν να λειτουργήσει πάνω σ' ένα αεροσκάφος όπως ένα ΑΜΤΙ ραντάρ πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του 1960 με την ανάπτυξη του Ε2-ΑΕW ραντάρ του Ναυτικού το 1964. Η επιτυχία του ΑΜΤΙ ραντάρ οφείλεται στην χρήση του ΡΡCΑ και ΤΑCСΑR για ικανοποιητική κίνηση. Το ΑΜΤΙ αρχικά δοκιμάστηκε κατά τη διάρκεια του 2<sup>ου</sup> παγκοσμίου πολέμου αλλά πήρε σχεδόν 20 χρόνια για να εντοπίζει σίγουρα στόχους αεροσκαφών πάνω απ' το νερό μ' ένα ραντάρ πάνω Δε μια κινούμενη αποβάθρα (εξέδρα). Πήρε σχεδόν άλλα 10 χρόνια πριν η τεχνική του ΑΜΤΙ μπορούσε να επεκταθεί επιτυχημένα σε χερσαία λειτουργία όπου ο θόρυβος είναι πολύ μεγαλύτερος απ' ότι πάνω απ' τη θάλασσα. Κατά τη διάρκεια του 1960 το πειραματικό ΟΤΗ (πάνω απ' τον ορίζοντα) ραντάρ, ικανό για εντοπισμό στόχου μέχρι και 2000 nmi ή περισσότερο οδήγησε στην επίδειξη των ικανοτήτων του ΟΤΗ ραντάρ που συμπεριλάμβανε τον εντοπισμό αεροσκαφών, διηπειρωτικών, βαλλιστικών πυραύλων και πλοίων καθώς επίσης και στον προσδιορισμό της κατάστασης της θάλασσας και των συνθηκών του ανέμου πάνω απ' τον ωκεανό.

Η εποχή των δορυφόρων που ξεκίνησε στα τέλη του 1950 επίσης εγκαινίασε τη χρήση του ραντάρ για εντοπισμό και ανίχνευση διαστημικών οχημάτων. Το πρώτο πειραματικό ραντάρ που χρησιμοποιήθηκε σ' αυτό το ρόλο ήταν το MT Lincoln Laboratory Millstone Hill UHF ραντάρ. Το AN/FPS-85, που αναφέρθηκε προηγουμένως ήταν το πρώτο στρατιωτικό σε θέση φάσεως που χρησιμοποιήθηκε για εντοπισμό και ανίχνευση διαστημικών αντικειμένων. Το Spasur σύστημα που αποτελείται από τρία VHF ραντάρ υψηλής δύναμης και είναι τοποθετημένο στο νοτιότερο μέρος των Ηνωμένων Πολιτειών, χρησιμοποιήθηκε για να εντοπίζει δορυφόρους που διασχίζουν τις Ηνωμένες Πολιτείες. Ένα μετριοπαθές, αλλά πρωτότυπο ραντάρ ήταν τοποθετημένο στο διαστημόπλοιο Gemini για απόδειξη συνάντησης ανάμεσα σ' ένα διαστημόπλοιο και άλλα διαστημικά αντικείμενα.

Η συγχώνευση (ενσωμάτωση) του ECCM για να μετράει τα βλαβερά αποτελέσματα (επιδράσεις) εχθρικών εμπλοκών, άρχισε να προκαλεί ενδιαφέρον το 1960. Τα ραντάρ του συστήματος Nike-Hercules AAW του στρατού (τώρα διαθέσιμα στη πλεονάζουσα αγορά), ήταν ένα καλό παράδειγμα της φιλοσοφίας του ECCM ραντάρ εκείνο τον καιρό. Περιείχε ένα ραντάρ εναέριας παρακολούθησης με L-ζώνη συχνότητας το οποίο λειτουργούσε με υψηλή μέση δύναμη, είχε πολεμικές αποθεματικές συχνότητες, χρησιμοποιούσε μια μεγάλη κεραία και έχει cancelers με πλάγιες προεξοχές. Επιπλέον λειτουργούσε συνδεδεμένο μ' έναν **\*\*\*##\*\*** ύψους με κεκλιμένη ακτίνα και S-ζώνη συχνότητας, με ιχνηλάτες X-ζώνης συχνότητας και μ' ένα ραντάρ μόνο κατεύθυνσης (ταχύτητας) με K-ζώνη συχνότητας, το οποίο έκανε το ECM ακόμα πιο δύσκολο.

Η σύσταση (είσοδος) του ομοαξονικού magnetron βελτίωσε την εκτέλεση του magnetron ταλαντωτή δύναμης (ισχύος), ειδικά την σταθερότητά του. Αυτό σχεδόν αντικατέστησε εντελώς το τυπικό (συνηθισμένο) magnetron σε εφαρμογές όπου ένας μετριοπαθής αγωγός μέσης δύναμης είναι η προτιμότερη πηγή δύναμης (ισχύος).

## **1970s**

Η αυξανόμενη ικανότητα της ηλεκτρολογικής επεξεργασίας που άρχισε στα τέλη του 1960 επιταχύνθηκε το 1970. Η ηλεκτρολογική ΜΤΙ επεξεργασία επέτρεψε τη χρήση ενός μεγάλου αριθμού παλμών για να κατορθωθούν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του ΜΤΙ (ντόπλερ) φίλτρου. Η αραιωμένη ΜΤΙ παλμική επαναλαμβανόμενη συχνότητα έγινε πρακτική. Ο αυτόματος εντοπισμός και ανίχνευση (ADT), ξεκίνησε στο 1950 με κενούς αγωγούς (σωλήνες) στο SAGE σύστημα που ωφελήθηκε αξιολογικά απ' την σμίκρυνση σε μέγεθος και απ' την αύξηση σε ικανότητα που προσφέρθηκε από μικρό- κομπιούτερ. Με την τεχνολογία του κομπιούτερ του 1970, οποιοδήποτε ραντάρ μπορούσε να έχει το δικό του ADT. Η ηλεκτρολογική επεξεργασία μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στο SAR για να κατορθωθεί εναέρια χαρτογράφηση σε πραγματική ώρα αντί να πρέπει να καταγράφεις στον αέρα και να επεξεργάζεσαι στο έδαφος όπως ήταν απαραίτητο με την οπτική επεξεργασία.

Μπροσ-πίσω δέκτες με χαμηλό θόρυβο επιδείχτηκαν αρχικά το 1950, αλλά τα masers και οι παραμετρικοί ενισχυτές που ήταν διαθέσιμοι τότε δεν ήταν πολύ ελκυστικοί για τις περισσότερες εφαρμογές του ραντάρ. Πήρε πάνω από 20 χρόνια για τον τρανζίστορ ενισχυτή να γίνει προτιμότερη τεχνική το 1970 όταν απαιτούνταν ένας με χαμηλό θόρυβο.

Η πρακτικότητα υψηλής ανάλυσης παλμικής συμπίεσης αυξήθηκε κατά τη διάρκεια αυτής της δεκαετίας με τη σύσταση των SAN αργοπορημένων γραμμών όπως η προτιμότερη προσέγγιση για συμπιεσμένους παλμούς διάρκειας λίγων δέκατων του δευτερολέπτου.

Σημαντικές πρόοδοι έγιναν στο ραντάρ εναέριας παρακολούθησης με την άνοδο του E2 (AEW) αντί του Ναυτικού σε μια χερσαία ικανότητα με την χρήση βελτιωμένης επεξεργασίας σήματος και με την είσοδο του E3 (AWACS) παλμικού (ντόπλερ) ραντάρ της πολεμικής αεροπορίας. Η επιτυχία του εναέριου παλμικού (ντόπλερ) ραντάρ βασίζεται στο να υπάρχει μια κεραία με πολύ χαμηλές πλάγιες προεξοχές έτσι ώστε να μην φωτίζει (τονίζει) μεγάλους ανεπιθύμητους θορύβους. Η επίδειξη απ' το Westing house τις κεραίες με πολύ χαμηλές πλάγιες προεξοχές είναι ένας απ' τους κύριους παράγοντες που έκανε

δυνατή τη λειτουργία του εναέριου παλμικού (ντόπλερ) ραντάρ. Οι κεραίες με χαμηλές πλάγιες προεξοχές είναι επίσης επιθυμητές σε εφαρμογές όπου αναμένεται εμπλοκή.

Ένα ενδιαφέρον υπό-παράγωγο της ανάπτυξης του ραντάρ την εποχή του Βιετνάμ που προόδευε κατά τη διάρκεια του 1970 ήταν η χρήση του VHF ραντάρ ευρείας συχνότητας για υπόγειο εντοπισμό. Στις πολιτικές του εφαρμογές αυτή η τεχνολογία του ραντάρ έχει χρησιμοποιηθεί για εντοπισμό υπόγειων αγωγών και συρμάτων, όπως επίσης και για επιστημονικούς σκοπούς.

Στο διάστημα, το ραντάρ χρησιμοποιήθηκε για να βοηθήσει την προσγείωση του Apollo στο φεγγάρι και χρησιμοποιήθηκε σε δορυφόρους ως ένα υψόμετρο (όργανο) για να μετράει την γεωειδές και εδαφική σκληρότητα και ως ένα scatterometer για τον καθορισμό εδαφικής σκληρότητας. Το Cobra Dane ραντάρ της πολεμικής αεροπορίας είναι ένα παράδειγμα ενός μεγάλου, εύκαμπτου ραντάρ υψηλής ανάλυσης που σχεδιάστηκε για να παρατηρεί και να ανιχνεύει επιστρεφόμενους διηπειρωτικούς, βαλλιστικούς πυραύλους. Το ραντάρ επίσης ήταν σημαντικό για την καθοδήγηση πυραύλων, όπως χρησιμοποιήθηκε για τα Harpoon και Tomahawk συστήματα.

### **Αναπτύξεις του 1980**

Είναι φυσικά πρόωρο να πούμε τι θα χαρακτηρίσει τις αναπτύξεις του ραντάρ της τωρινής δεκαετίας. Υπάρχουν όμως, κάποιες τάσεις (κλήσεις). Αυτή θα είναι η δεκαετία όταν οι ελπίδες των ιδρυτών μεγάλων θέσεων φάσεως θα εξεταστούν (δοκιμαστούν) απ' το Patriot του στρατού, το Aegis του ναυτικού και τα B-1B της πολεμικής αεροπορίας. Μεταδότες σε στερεή (συμπαγή) κατάσταση συστήνονται (εισάγονται) με L-ζώνη συχνότητας και πιο κάτω σε ραντάρ όπως το Marine Corps AN/ TPS-59 των Ηνωμένων Πολιτειών, το AN/ FPS-117 της πολεμικής αεροπορίας και το Marconi Martello. Το Pave Paws της πολεμικής αεροπορίας (με UHF συντονιστές ρυθμιστές) μεταδότη/ δέκτη σε στερεή κατάσταση σε κάθε στοιχείο μιας μεγάλης θέσης φάσεως, και το VHF sparsur δορυφορικό σύστημα παρακολούθησης (το οποίο απαιτεί μια συνολική μέση δύναμη της σειράς του 1 MW). Η

παλμική (ντόπλερ) επεξεργασία προστίθεται στο ραντάρ καιρού (Nexrad) για να αποκτήσει ένα συστατικό (συνισταμένη) της ταχύτητας του ανέμου. Με τη σύσταση (εισαγωγή) του VHSIC αργότερα σ' αυτή τη δεκαετία αναμένεται ότι βελτιωμένες ικανότητες της επεξεργασίας σήματος θα κατορθωθούν. Στο μέλλον, το ραντάρ ίσως να είναι ικανό να αποκτάει περισσότερες πληροφορίες για τη φύση του στόχου απ' ότι απλώς για την τοποθεσία. Ο τομέας της ασαφή (αδύνατης) εκτίμησης του περιβάλλοντος ενδιαφέρεται ειδικά με την απόσπαση πληροφοριών του στόχου. Υπάρχει επίσης μια δραστηριότητα του ραντάρ στο διάστημα για ασαφή (αδύνατη) εκτίμηση, ειδικά το SAR που χρησιμοποιείται απ' το Shuttle.

### **2.3 Εξέλιξη (πορεία) των εφαρμογών του ραντάρ**

Η αρχική ανάπτυξη του ραντάρ ήταν το αποτέλεσμα στρατιωτικών ενδιαφερόντων και οι περισσότερες απ' τις κύριες αναπτύξεις που συνέβησαν κατά τη διάρκεια των 50 χρόνων του ραντάρ ήταν στην αρχή και χρηματοδοτήθηκαν από στρατιωτικές ανάγκες. Το ραντάρ χρησιμοποιείται στο στρατό για παρακολούθηση και ανίχνευση εναέριων, θαλάσσιων, χερσαίων και διαστημικών στόχων από εναέριες, θαλάσσιες, χερσαίες και διαστημικές εξέδρες (αποβάθρες). Είναι σημαντικό ένα στρατιωτικό ραντάρ να είναι ικανό να εκτελεί την αποστολή του ακόμα και αν υπάρχουν εχθρικές συνθήκες, ηλεκτρονικές καταμετρήσεις και ακόμα και αν είναι στόχος για εχθρικά όπλα. Πρέπει να είναι διαθέσιμο για χρήση όταν χρειάζεται. Αντίθετα με τα πολιτικά ραντάρ, τα στρατιωτικά ραντάρ πρέπει να είναι ικανά να εντοπίζουν στόχους που προσπαθούν να αποφύγουν εντοπισμό, π.χ. εκείνους που πετάν πολύ χαμηλά, πολύ ψηλά ή πολύ γρήγορα.

Πολλές απ' τις τεχνικές και εφαρμογές του ραντάρ που αναπτύχθηκαν πρώτα για το στρατό βρήκαν το δρόμο τους και στον πολιτικό τομέα. Η τεχνολογία του ραντάρ είχε σημαντική επίδραση και σε άλλες τεχνολογίες περιλαμβάνοντας τις επίγειες και δορυφορικές τηλεπικοινωνίες, συστήματα ναυσιπλοΐας, τις ηλεκτρονικές καταμετρήσεις, τα αισθητικά

όργανα βιομηχανικού ελέγχου, την ράδιο-αστρονομία και τη φασματοσκοπία μικροκυμάτων.

Μια ενδιαφέρουσα πολιτική εφαρμογή του ραντάρ είναι η ασαφής (ή αδύνατη) εκτίμηση του περιβάλλοντος. Αυτό περιλαμβάνει τέτοιες εφαρμογές "ρουτίνας" όπως παρατήρηση του καιρού και της ιονοσφαιρικής βυθομέτρησης, δύο εφαρμογές όπου ο μηχανικός του ραντάρ πιθανόν δεν ήταν ενήμερος του όρου "ασαφής (ή αδύνατη) εκτίμηση του περιβάλλοντος" όταν αυτοί οι εξοπλισμοί πρωτοεμφανίστηκαν και αναπτύχθηκαν. Το ίδιο είναι πιθανόν αλήθεια για εκείνους που πρώτο-χρησιμοποίησαν ραντάρ για την έρευνα μετεώρων και αυγής. Η ασαφής (ή αδύνατη) εκτίμηση απ' το διάστημα έχει θεωρηθεί για πολλές εφαρμογές και κάμποσα διαφορετικά συστήματα ραντάρ που έχουν εξεταστεί για διάφορους σκοπούς. Εμπορικές εφαρμογές του ραντάρ (εκείνες όπου ένας επενδυτής είναι πρόθυμος να ρισκάρει το κεφάλαιό του με επιστροφή κάποιου νομισματικού κέρδους) ήταν σπάνιες αλλά υπάρχουν δύο που ίσως αναφερθούν

- 1) Οι εταιρείες πετρελαίου στο παρελθόν έχουν χρησιμοποιήσει τυπικό ραντάρ υψηλής ανάλυσης και ραντάρ με σύνθετο άνοιγμα για τον προσδιορισμό περιοχών του κόσμου όπου γεωλογικά χαρακτηριστικά υπόσχονται παρακαταθήκες λαδιού, και
- 2) Εταιρείες παραγωγής ηλεκτρισμού χρησιμοποιούν ραντάρ ώθησης (ορμής) υψηλής ανάλυσης για να εξερευνούν υπόγεια για κρυμμένους αγωγούς και γραμμές δύναμης. Το ραντάρ έχει επίσης αποδειχτεί να έχει σημαντική αξία στην ορνιθολογία και εντομολογία.

Το ραντάρ που είναι βασισμένο στο έδαφος χρησιμοποιείται για ανίχνευση αεροσκαφών καθ' οδό και στα κυριότερα αεροδρόμια του κόσμου για τον ασφαλή έλεγχο της εναέριας κυκλοφορίας. Το εμπορικό εναέριο ραντάρ παρέχει το ύψος του αεροσκάφους, δείχνει περιοχές βροχής για να αποφευχθούν, καθορίζει την ορισμένη κατά μήκος και διεύθυνση ταχύτητα του αεροσκάφους και αναγνωρίζει (εξακριβώνει) εδαφικά χαρακτηριστικά. Όλα τα μεγάλα πλοία στη θάλασσα κουβαλούν ένα ή περισσότερα ραντάρ για αποφυγή σύγκρουσης

και ναυσιπλοΐα. Αυτά είναι ανάμεσα στα φθηνότερα ραντάρ, είναι τα πιο αξιόπιστα και απ' τα πιο ευρέως χρησιμοποιημένα. Υπάρχει επίσης φυσικά το γνωστό και ευρέως χρησιμοποιημένο αστυνομικό ραντάρ για την μέτρηση της ταχύτητας των οχημάτων. Στο διάστημα, τα ραντάρ χρησιμοποιούνται για συνάντηση διαστημοπλοίων, είσοδο και προσγείωση, όπως επίσης και για εκτίμηση του περιβάλλοντος της γης και πλανητική εξερεύνηση.

#### **2.4 Στρατιωτικά ραντάρ του 1980ς**

Οι εικόνες μέχρι 29 είναι ένα δείγμα των ραντάρ που λειτουργούν τώρα, ή που θα λειτουργήσουν κατά τη διάρκεια αυτής της δεκαετίας. Τα παραδείγματα που δείχνονται δεν είναι όλα αυτά που θα μπορούσαν να είχαν συμπεριληφθεί. Ο συγγραφέας ζητάει συγνώμη εκ των προτέρων για οποιεσδήποτε αμελείς παραλείψεις. Τα ραντάρ που επεξηγούνται στα άλλα χαρτιά γι' αυτό το θέμα δεν συμπεριλαμβάνονται εδώ.

#### **2.5 Το μέλλον του ραντάρ**

Είναι σχετικά εύκολο να προβλέψεις τι ίσως να είναι διαθέσιμο στα συστήματα του ραντάρ για να αναπτυχθεί από τρία ως πέντε χρόνια απ' τη στιγμή που αυτά τα συστήματα είναι ήδη στο "αναπτυξιακό αγωγό" (μερικές φορές παίρνει μέχρι και 15 χρόνια ή περισσότερα απ' την αρχή της ανάπτυξης ως την εκτεταμένη λειτουργία σ' αυτό τον τομέα). Απ' την άλλη μεριά, δεν είναι εύκολο να προβλέψεις το μακροπρόθεσμο μέλλον μιας τεχνολογίας όπως το ραντάρ. Είναι ανόητο να προσπαθήσεις να το κάνεις εκτός και αν είναι γραμμένο με εξαφανιζόμενη μελάνη. Μια απ' τις δυσκολίες στη πρόβλεψη του μέλλοντος του ραντάρ είναι ότι απρόοπτες αναπτύξεις μπορούν να εμφανισθούν από μια καινούρια τεχνολογία που δεν ήταν γνωστή πριν. Αυτό έχει συμβεί πολλές φορές. Παραδείγματα του παρελθόντος τέτοιων απρόβλεπτων αναπτύξεων συμπεριλαμβάνουν τον Klystron ενισχυτή υψηλής δύναμης, σιδηρομαγνητικά υλικά, το τρανζίστορ, τον ενισχυτή χαμηλού θορύβου, SANαργοποιημένες γραμμές, μαγνητικό όργανο καταγραφής ευρείας ζώνης συχνότητας, μικρό-κομπιούτερ και η τεχνολογία ηλεκτρολογικής επεξεργασίας. Θα έπρεπε να



αναμένεται ότι το μέλλον θα προσφέρει άλλα παραδείγματα των τώρα άγνωστων αναπτύξεων από άλλες τεχνολογίες που ίσως να έχουν μια βαθιά επιρροή στα μελλοντικά ραντάρ. Επίσης, καινούριες ανάγκες εμφανίζονται που ήταν πριν απροσδόκητες, όπως εκείνες που εμφανίστηκαν με τη σύσταση του δορυφόρου και τη χρήση του διαστήματος.

Απ' το να μαντέψεις ποιο θα είναι το μέλλον του ραντάρ, θεωρείται σοφότερο να περιγράψεις μερικά απ' τα επίκαιρα τεχνικά θέματα που έχουν σχέση με το ραντάρ και μπορούν να έχουν επίδραση σε μελλοντικές ικανότητες.

## **2.6 Θόρυβος**

Πολλά είναι γνωστά για τον εδαφικό, θαλάσσιο, καιρικό και άλλους θορύβους, αλλά δεν υπάρχει τώρα το "συγκεκριμένο εγχειρίδιο" που παρέχει όλα όσα κάποιος χρειάζεται να ξέρει για το θόρυβο και το οποίο θα το έκανε μη αναγκαίο να κάνει παραπέρα μετρήσεις του θορύβου. Θα φαινόταν ότι είναι ένα αξιόλογο σχέδιο για να πετύχει τέτοιο σκοπό.

## **2.7 Πληροφορίες στόχου**

Το ραντάρ στο παρελθόν ήταν ένας "μικρός" ανιχνευτής (εξακριβωτής) παρέχοντας μόνο την τοποθεσία του στόχου. Οι πληροφορίες που είναι διαθέσιμες στην αντήχηση του ραντάρ θα έπρεπε να μπορούν να παρέχουν περισσότερα απ' τη τοποθεσία του στόχου. Η θεωρία δείχνει ότι το μέγεθος του στόχου, το σχήμα και οι εδαφικές κυριότητες (ιδιοκτησίες) ίσως διακριθούν (ξεχωριστούν).

## **2.8 Μεταδότης (ή πομπός)**

Υπήρξε λίγη καινούρια ανάπτυξη στους αγωγούς μικροκυμάτων υψηλής δύναμης κατά τη διάρκεια των τελευταίων είκοσι χρόνων. Αυτό ίσως να συμβαίνει εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν έχει μείνει τίποτα να κατορθωθεί ή ότι δεν είχε ληφθεί ικανοποιητική ανακαινιστική έρευνα. Το επίκαιρο μηχάνημα δύναμης είναι ένας δυνατός ανταγωνιστής του αγωγού δύναμης (ισχύος) σε συχνότητες κάτω από L-ζώνη συχνότητας και αυτό έχει κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα. Όμως, αυτό δεν μπορεί να πραγματοποιήσει κάποια πράγματα με αγωγούς δύναμης (ισχύος).

## **2.9 Μηχανικές κατοπτρικές κεραίες**

Όπως με τον αγωγό δύναμης (ισχύος), η μηχανικά εξερευνούμενη κατοπτρική κεραία δεν προόδευσε αρκετά πρόσφατα. Παρομοίως, η έλλειψη καινούριων ιδεών μπορεί να οφείλεται στο ότι είτε είναι μια κορεσμένη τεχνολογία ή κανένας δεν έχει ρίξει γερή ματιά σε πιθανές προόδους. Και ο αγωγός δύναμης και η μηχανικά εξερευνούμενη κεραία θα συνεχίσουν να χρησιμοποιούνται σε μελλοντικά ραντάρ. Άρα, είναι σημαντικό να είσαι προσεκτικός για πιθανές προόδους (εξελίξεις).

## **2.10 Ραντάρ σε θέση φάσεως**

Πολλά λεφτά και χρόνος ξοδεύτηκαν για την ανάπτυξη του ραντάρ σε (ή με) θέση φάσεως και υπάρχουν πολλά παραδείγματα επιτυχίας. Όμως, η πρόβλεψη που ακούστηκε το 1960 ότι " όλα τα ραντάρ στο μέλλον θα είναι σε θέση φάσεως " δεν έχει υλοποιηθεί και δεν είναι πιθανόν να συμβεί στο προβλεπόμενο μέλλον. Αυτό δεν θα έπρεπε να μειώσει (ή δυσφημήσει) απ' το γεγονός ότι οι θέσεις φάσεως μπορούν αν έχουν μια σημαντική θέση στο ραντάρ. Η θέση φάσεως θα μπορούσε να έχει ακόμα μεγαλύτερη εφαρμογή εάν μπορούσε να γίνει πιο οικονομικά. Ίσως μια καινούρια, όχι άγνωστη, προσέγγιση σε ευκίνητη διεύθυνση (ή κυβέρνηση) ακτίνας χρειάζεται για να κάνει την τεχνολογία πιο παγκόσμια (γενική). Ένας άλλος πιθανός τομέας ενδιαφέροντος είναι η προσαρμοσμένη σειρά, της οποίας οι θερμοαγωγοί προσαρμόζονται σε μια μη επίπεδη (ή αυθαίρετη) επιφάνεια, αλλά αυτό είναι κάτι το οποίο τώρα δεν είναι διαθέσιμο στο βαθμό που θα ευχόταν κάποιος.

## **2.11 Κάλυψη (προστασία)**

Είναι συνήθως επιθυμητό το ραντάρ να καλύπτει μια μεγάλη περιοχή παρατήρησης, αλλά, το ραντάρ μικροκυμάτων είναι περιορισμένο απ' τη σφαιρικότητα της γης. Για να αυξηθεί η κάλυψη, ένα ραντάρ μπορεί να ανυψωθεί σ' ένα πύργο ή να λειτουργήσει σ' ένα ελικόπτερο, μπαλόνι, μικρό αερόστατο, αεροσκάφος ή διαστημόπλοιο. Όσο πιο μεγάλο είναι το ύψος τόσο μεγαλύτερη είναι η κατεύθυνση στον ορίζοντα και μεγαλύτερη πρέπει να είναι

η κεραία και το άνοιγμα της κεραίας. Όμως, όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος τόσο πιο δύσκολο είναι να κουβαλήσεις μεγάλη δύναμη και μια μεγάλη κεραία. Το ραντάρ μικροκυμάτων στο διάστημα, προσφέρει την δυνατότητα για παγκόσμια κάλυψη, αλλά, με μεγαλύτερο κόστος (έξοδα). Πολλοί από εκείνους που ενδιαφέρονται για ραντάρ εκτίμησης του περιβάλλοντος βασίζονται πολύ σε δορυφορικά ραντάρ (SBR). Το SBR είναι επίσης υποψήφιο για τον παγκόσμιο εντοπισμό πλοίων στον ωκεανό. Το HF πάνω απ' τον ορίζοντα ραντάρ μπορεί να επεκτείνει κάλυψη σχεδόν ως και 2000 nmi (ιονοσφαιρική διάθλαση) και είναι μια καλή μέθοδος για εντοπισμό και ανίχνευση αεροσκαφών πάνω απ' τον ωκεανό.

### **2.12 Αξιοπιστία**

Το πιο αξιόπιστο απ' τα ραντάρ τυπικά ίσως να έχει ενδιάμεσες αποτυχίες (ελλείψεις) περίπου 800 ως 1200h. Αν και συχνά δίνεται αρκετή προσοχή στην αξιοπιστία κατά τη διάρκεια της κατασκευής, σχεδόν δεν δίνεται καθόλου προσοχή στην αξιοπιστία κατά τη διάρκεια του σταδίου του εννοιολογικού σχεδίου όταν αναπτύσσεται η βασική αρχιτεκτονική του ραντάρ. Σε εφαρμογές όπου είναι απολύτως σημαντικό να υπάρχει ραντάρ που να δουλεύει αξιόπιστα, διαφορετικές προσεγγίσεις έχουν παρθεί. Η NASA, για παράδειγμα, στην κατασκευή ενός είδος διαστημικού ραντάρ, χρησιμοποιεί τις πολύ επιτυχημένες μεθόδους αξιοπιστίας που επινοούνται για διαστημικά προγράμματα. Οι εμπορικές αερογραμμές αυξάνουν την αξιοπιστία με συντηρητικά (μετριοπαθή) σχέδια. Τα ραντάρ ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας του FAA έχουν πολύ λίγη ώρα λειτουργώντας (χρησιμοποιώντας) δύο ραντάρ ταυτόχρονα έτσι ώστε τουλάχιστον το ένα από τα δύο λειτουργεί πάντα καθώς το άλλο επισκευάζεται. Αυτό οδηγεί σε υψηλή διαθεσιμότητα που καθορίζεται απ' το ποσοστό του χρόνου που λειτουργεί το ραντάρ. Η αξιοπιστία, η διαθεσιμότητα και η υπερασπιστικότητα χρειάζεται να είναι ένα ουσιώδης μέρος του αρχικού σχεδίου του συστήματος.

### **2.13 Επεξεργασία σήματος και δεδομένων στοιχείων**

Η τεχνολογία των πλήκτρων έχει επιτρέψει σημαντικές καινούριες ικανότητες στην επεξεργασία σήματος και δεδομένων στοιχείων και το VHSIC δίνει την υπόσχεση ακόμα μεγαλύτερης εκτέλεσης. Οι περισσότερες από τις προτεινόμενες εφαρμογές του ραντάρ του VHSIC φαίνεται να περιγράφονται σαν αν κάνουν περισσότερα απ' αυτά που ήδη γίνονται. Αυτή είναι συνήθως η υπόθεση για οποιαδήποτε καινούρια τεχνολογία, αλλά, δεν θα ήταν παράξενο αν μια δεκαετία μπροστά, το VHSIC χρησιμοποιείται για να πετύχει κάποια καινούρια ικανότητα του ραντάρ που δεν επιδιώκεται τώρα. Είναι πιθανόν όμως, να "παρασυρθεί" απ' την υπόσχεση επεξεργασίας μεγάλου σήματος. Οι επεξεργαστές σήματος του ραντάρ μπορούν, αν δεν ελεγχθούν να είναι μεγάλοι, να καταναλώνουν μεγάλη δύναμη και να είναι μια κύρια συνεισφορά στην αναξιοπιστία του ραντάρ.

#### **2.14 Χειριστής**

Ο χειριστής του ραντάρ είχε ένα κύριο ρόλο στο παρελθόν στην άντληση και χρησιμοποίηση πληροφοριών που ήταν διαθέσιμες απ' το ραντάρ. Με αυτόματο εντοπισμό και ανίχνευση, καθώς επίσης και με βελτιωμένη επεξεργασία σήματος που εξαλείφει τις ανεπιθύμητες αντηχήσεις, ο ρόλος του χειριστή αλλάζει. Ο ρόλος του χειριστή είναι κάτι που χρειάζεται να παρακολουθηθεί καθώς η περισσότερη επεξεργασία του ραντάρ είναι αυτόματη.

#### **2.15 Μέγεθος και βάρος**

Πολλές εφαρμογές του ραντάρ, όπως στο αεροσκάφος ή στο διάστημα, δεν μπορούν να αντέξουν μεγάλο μέγεθος και βάρος. Το μέγεθος και το βάρος μπορούν να μειωθούν με καινούρια τεχνολογία, αλλά, όπως και με την αξιοπιστία, οι περιορισμοί του μεγέθους και του βάρους πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων του σχεδίου του ραντάρ.

#### **2.16 Το ραντάρ έξω απ' την περιοχή μικροκυμάτων**

Το ραντάρ χρησιμοποιήθηκε το 1930 στο VHF και HF κάτω από συχνότητες μικροκυμάτων. Δεν είναι δυνατόν να είναι μια μαζική επιστροφή σ' αυτές τις ζώνες συχνότητας αλλά

υπάρχουν ειδικευμένες εφαρμογές που μπορούν να ωφεληθούν από λειτουργία στις χαμηλότερες συχνότητες. Το HF πάνω απ' τον ορίζοντα ραντάρ είναι ένα καλό παράδειγμα. Υπήρξε μεγάλο ενδιαφέρον για σχεδόν 40 χρόνια στην απόκτηση ραντάρ που λειτουργούν στο άλλο άκρο του φάσματος, σε μήκη κύματος χιλιοστών. Αν και ίσως να υπάρχουν μερικές πιθανές ειδικευμένες εφαρμογές του ραντάρ σε χιλιοστά, δεν θα είναι εκτεταμένες – τουλάχιστον στο κοντινό μέλλον.

### **2.17 Υποστηρίγματα του ραντάρ**

Υπάρχουν μερικά πράγματα που βρίσκονται στο σύστημα του ραντάρ που μπορούν να θεωρηθούν "υποστηρίγματα". Υπάρχουν εκεί επειδή χρειάζονται, αλλά, είναι κάτι που κάποιος θα προτιμούσε να κάνει χωρίς. Ένα παράδειγμα είναι το CFAR, το οποίο παρέχει έναν διαρκή λάθος συναγερμό στην απόδοση του ραντάρ. Αυτό συμπεριλαμβάνεται για να εμποδίσει αυτόματα συστήματα εντοπισμού και ανίχνευσης απ' το να είναι υπερφορτωμένο με λανθασμένους στόχους που πρέπει να επεξεργαστούν απ' το κομπιούτερ. Το CFAR είναι σημαντικό στο μοντέρνο ραντάρ, αλλά, προκαλεί έλλειψη ευαισθησίας περίπου 1 ή 2dB ή περισσότερο και μπορεί να κάνει επιθυμητούς στόχους να χαθούν. Το CFAR δεν θα ήταν απαραίτητο αν το ραντάρ απομάκρυνε όλους τους λανθασμένους στόχους πριν την αυτόματη ανίχνευση ή αν η αυτόματη ανίχνευση είχε ικανοποιητική απόδοση για να επεξεργάζεται όλες τις αντηχήσεις χωρίς κορεσμό. Άλλα παραδείγματα "υποστηρίγματος" του ραντάρ περιλαμβάνουν το Dicke Fix, το χρόνο ελέγχου ευαισθησίας, τον περιορισμό στο MTI και την παλμική συμπίεση. Όλα έχουν κάποιο χρήσιμο σκοπό αλλά θα ήταν καλύτερα σε πολλές περιπτώσεις αν δεν χρειαζόντουσαν.

### **2.18 Τι θα μπορούσε / τι θα γίνει ;**

Περίληπτικά, το ραντάρ του μέλλοντος θα μπορούσε να είναι πιο αξιόπιστο απ' την άποψη της έλλειψης εξοπλισμού και της παρουσίας ανεπιθύμητων αντηχήσεων, θα μπορούσε να παρέχει περισσότερες πληροφορίες για τον στόχο απ' ότι τώρα, θα μπορούσε να λειτουργεί επιτυχημένα κάτω από αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες και (για στρατιωτικά ραντάρ), θα

μπορούσε να εκτελεί την αποστολή του παρά το γεγονός εχθρικών ενεργειών και καταμετρήσεων. Το μόνο παράδειγμα που μπορεί να ειπωθεί γι το τι θα είναι το ραντάρ κατά τη διάρκεια της 2<sup>ης</sup> πεντηκονταετίας του είναι ότι πιθανόν θα είναι διαφορετικό απ' ότι ήταν κατά τη διάρκεια της 1<sup>ης</sup> πεντηκονταετίας του.

### Παράρτημα

Είναι πάντα επικίνδυνο να προσπαθήσεις να εγγράψεις σε κατάλογο σημαντικά προσόντα (ικανότητες) σε οποιοδήποτε τομέα. Τι είναι σημαντικό βασίζεται στο παρελθόν κάποιου και στις πηγές πληροφοριών όπως επίσης και στο προσωπικό κριτήριο κάποιου για σπουδαιότητα (σημασία). Γι' αυτό κάθε ατομική λίστα σημαντικών γεγονότων του ραντάρ πιθανόν θα είναι διαφορετική από οποιαδήποτε άλλη. Η λίστα που δίνεται παρακάτω προσφέρεται σαν ένα παράδειγμα από ένα άτομο. Στηρίζεται πολύ στη γνώση του συγγραφέα για το τι έγινε, η όποια είναι ομολογουμένως περιορισμένη. Ο συγγραφέας ζητάει συγνώμη για οποιεσδήποτε παραλείψεις και θα εκτιμούσε να μάθει για τα γεγονότα του ραντάρ που θεωρούνται σημαντικά από άλλους, τα οποία θα έπρεπε να συμπεριληφθούν. Η λίστα θα μπορούσε να ήταν πολύ μεγαλύτερη εάν όλα τα κύρια γεγονότα του ραντάρ είχαν συμπεριληφθεί αντί να περιορίζονται εκείνα τα γεγονότα που είχαν κάποια ειδική σπουδαιότητα ή κύρια επίδραση σε αναπτύξεις που ακολούθησαν.

Παρομοίως, οι ιστορικές εμφανίσεις (αναπτύξεις) που αναφέρθηκαν ότι κύριο μέρος αυτού του κειμένου είναι περιορισμένες απ' τις πηγές που είναι διαθέσιμες στο συγγραφέα και απ' τη προοπτική του συγγραφέα ως ένας μηχανικός, παρά ως ένας ιστορικός της τεχνολογίας. Οι ιστορικές περιγραφές του ραντάρ είναι κυρίως εκείνες των Ηνωμένων Πολιτειών, ειδικά μετά το 2<sup>ο</sup> παγκόσμιο πόλεμο εξαιτίας της μη διαθεσιμότητας στο συγγραφέα επαρκών ιστορικών πληροφοριών για τις αναπτύξεις του ραντάρ στην Ευρώπη και οπουδήποτε αλλού. Ένα αξιόλογο μελλοντικό σχέδιο για μερικούς ιστορικούς θα ήταν μια τελειωμένη και επίσημη (ή έγκυρη) ιστορία αυτής της σημαντικής τεχνολογίας. Η λίστα που δίνεται παρακάτω είναι σε κάποια, αλλά όχι ακριβή χρονολογική σειρά.

## **2.19 Σημαντικά γεγονότα του ραντάρ**

- Τα πειράματα του Heihrich Hertz το 1888 που αρχικά επέδειξαν τα αντανακλώμενα χαρακτηριστικά των ραδιοκυμάτων.
- Το βαρύ στρατιωτικό βομβαρδιστικό αεροπλάνο μεγάλης κατεύθυνσης που εμφανίστηκε στις αρχές του 1930, το οποίο ήταν πρόκληση για στρατιωτικό ραντάρ.
- Ο μη σχεδιασμένος εντοπισμός αεροσκαφών σε πολλές χώρες κατά τη διάρκεια του 1930 με υπάρχων εξοπλισμό ράδιο-τηλεπικοινωνιών, που έδειχναν ότι τα ραδιοκύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον εντοπισμό αεροσκαφών.
- Η επιτυχημένη επίδειξη απ' το NRL το 1936 του VHF μονοστατικού παλμικού ραντάρ χρησιμοποιώντας μια μονή κεραία με duplexer.
- Η ανάπτυξη το 1926 του Γερμανικού πολεμικού σκάφους Graf Spee του 375-MHz Septakt ραντάρ.
- Το Chain Home δίκτυο ραντάρ, αποτελούμενο από επτά θέσεις του ραντάρ για την άμυνα της Αγγλίας, τοποθετημένο το 1938 και το οποίο έπαιξε ένα ρόλο κλειδί στη μάχη της Βρετανίας κατά τη διάρκεια του 1940.
- Το 200-MHz CXAM, το πρώτο των Ηνωμένων Πολιτειών ναυτικό ραντάρ πάνω σε πλοίο, που κατασκευάστηκε το 1939.
- Το 100-MHz SCR-70, το πρώτο ραντάρ έρευνας αέρα του στρατού των Ηνωμένων Πολιτειών που κατασκευάστηκε το 1939.
- Η εφεύρεση του magnetron υψηλής δύναμης στην Αγγλία το 1939, το οποίο οδήγησε τις συχνότητες μικροκυμάτων σε πρακτική ανάπτυξη του ραντάρ.
- Το 500-MHz ASB εναέριο ραντάρ, που εμφανίστηκε το 1940, ευρέως χρησιμοποιημένο κατά τη διάρκεια του 2<sup>ου</sup> παγκοσμίου πολέμου για έρευνα εδάφους –αέρος.
- Η ίδρυση του MTI εργαστηρίου ακτινοβολίας που αφιερώθηκε στην ανάπτυξη του ραντάρ μικροκυμάτων.

- Η εφαρμογή της αντανάκλασης Klystron σαν τον τοπικό ταλαντωτή για τον υπερετερόδουνο δέκτη, κάνοντας τους δέκτες μικροκυμάτων να είναι ευαίσθητοι και αρμονικοί.
- Ο SCR-584 ιχνηλάτης ιωνικής ανίχνευσης που αναπτύχθηκε το 1944. Ο πρώτος ιχνηλάτης μικροκυμάτων χρησιμοποιήθηκε απ' το στρατό των Ηνωμένων Πολιτειών για τον ακριβή έλεγχο αντιαεροπορικού πυροβολικού.
- Η εφεύρεση της μόνο-παλμικής ανίχνευσης το 1942 που οδήγησε στην ανάπτυξη του AN/ FPS-16 ιχνηλάτη (ή ανιχνευτή) ακριβείας.
- Η ανάπτυξη του MTI ραντάρ.
- Η έκδοση των τόμων της σειράς του MTI εργαστηρίου ακτινοβολίας πάνω στο ραντάρ.
- Τα μεγάλα VHF και UHF ραντάρ στα τέλη του 1950, ένα παράδειγμα του οποίου ήταν το VHF AN/ FPS-24 ραντάρ εναέριας παρακολούθησης με μια κεραία περίπου 120ft φάρδος, από 20ft ύψος και μια μέση δύναμη 25KW.
- Το Bomarc αέρος –αέρος ραντάρ καθοδήγησης αεροσκάφους χωρίς πιλότο, το οποίο πρώτα επέδειξε στα τέλη του 1950 το παλμικό (ντόπλερ) ραντάρ υψηλής συχνότητας επαναλαμβανόμενων παλμών σ' ένα τρόπο κατάρριψης αεροπλάνων.
- Η θεωρία εντοπισμού του ραντάρ του Marcum, η οποία παρείχε μια ποσοτική σχέση ανάμεσα στη πιθανότητα εντοπισμού, στη πιθανότητα λάθος συναγερού, στην ολοκληρωτική απώλεια και στην απαιτούμενη αναλογία σήματος –θορύβου.
- Η σύσταση του Klystron ενισχυτή υψηλής δύναμης στο ραντάρ το 1950.
- Το BMEWS, ένα μεγάλο UHF ραντάρ εντοπισμού διηπειρωτικών βαλλιστικών πυραύλων, τοποθετημένο το 1960, που παρείχε μια μεγάλη αύξηση στις ικανότητες κατεύθυνσης (ταχύτητας) του ραντάρ.
- Το ραντάρ με σύνθετο άνοιγμα, πρώτα επιδείχτηκε στις αρχές του 1950 και το οποίο συνεχώς προόδευε σε ικανότητα ανάμεσα απ' τα χρόνια.



- Ο AN/ FPS-6 ευρέτης ύψους με κεκλιμένη ακτίνα και S-ζώνη συχνότητας, ακόμα μία απ' τις πιο ακριβείς και φθηνές μεθόδους για καθορισμό του ύψους των αεροσκαφών.
- Η επιτυχημένη εφαρμογή του AMTI (εναέρια ένδειξη κινούμενου στόχου) με την ανάπτυξη του EZA του ναυτικού στα μέσα του 1960.
- Η επίδειξη του HF πάνω απ' τον ορίζοντα ραντάρ το 1960 για τον εντοπισμό αεροσκαφών και πλοίων.
- Η ανάπτυξη του μοντέρνου καθ' οδό ραντάρ ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας στις αρχές του 1960.
- Η εφεύρεση του ομοαξονικού magnetron στα τέλη του 1960.
- Το AN/ FPS-85 UHF δορυφορικό ραντάρ παρακολούθησης μεγάλης κατεύθυνσης τοποθετημένο στα τέλη του 1960, το πρώτο παράδειγμα μιας μεγάλης θέσης φάσεως χρησιμοποιώντας ηλεκτρολογικούς μεταθετές φάσεως για να κατευθύνουν την ακτίνα σε δύο ίσες γωνίες και το οποίο επιστά την προσοχή στο κομπιούτερ σαν ένα κύριο συστατικό των θέσεων φάσεως.
- Το ηλεκτρολογικό MTI, ξεκινώντας στα τέλη του 1960.
- Η χρήση του μικρό –κομπιούτερ στις αρχές του 1970 για ADT.
- Κεραίες με πολύ χαμηλές πλάγιες προεξοχές, όπως επιδείχτηκαν στο AWACS.
- Εντοπισμός αεροσκαφών στην ξηρά με το ναυτικό E2C AEW και το E3A AWACS της πολεμικής αεροπορίας.
- Επίδειξη υψηλής διαθεσιμότητας με FAA ραντάρ ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας.
- Το AWG-9, ανιχνεύει καθώς εξερευνεί, εναέριο παλμικό (ντόπλερ) ραντάρ ανίχνευσης πολλαπλών στόχων μεγάλης κατεύθυνσης.
- Το σύστημα εντοπισμού κινούμενου στόχου (MTD) επιδείχτηκε απ' το MTI Lincoln εργαστήριο.
- Χρήση ενός μεταδότη στο AN/TPS-59.
- Το Harpoon ραντάρ καθοδήγησης πυραύλων στα τέλη του 1970.

- Ακέραιο (πλήρης) ADT, όπως στο AN/ SYS-1 στις αρχές του 1980.
- Διαδοχική παραγωγή των Aegis και Patriot ραντάρ.

Η λίστα δεν τελειώνει. Καινούριες και σημαντικές αναπτύξεις του ραντάρ μπορούν να αναμένονται στο μέλλον όπως και καινούριες εφαρμογές, καινούριες τεχνολογίες και καινούριες ικανότητες του ραντάρ αναπτύσσονται.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

### **Ραντάρ ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας**

#### **3.1 Το ραντάρ στον έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας**

Το σύστημα ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας (ATC) που λειτούργησε από την διεύθυνση ομοσπονδιακής αεροπορίας (FAA) έχει σαν σκοπό του την ασφαλή και ικανή λειτουργία των αεροσκαφών που πετάνε στην περιοχή αεροδρομίων, αεροσκαφών που πετάνε καθ' οδό από ένα αεροδρόμιο σε άλλο και αεροσκαφών και οχημάτων στο έδαφος σε αεροδρόμια. Η εμπορική και γενική αεροπορία, όπως επίσης και το στρατιωτικό αεροσκάφος, όλα περιλαμβάνονται μέσα στα όρια του συστήματος ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας. Όσοι ταξιδεύουν με αεροπλάνα είναι ενήμεροι της σημαντικότητας αυτής της αποστολής.

Κάμποσα διαφορετικά ραντάρ χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της εναέριας κυκλοφορίας. Το ραντάρ παρακολούθησης του αεροδρομίου (ASR) παρέχει πληροφορίες για την τοποθεσία και την κίνηση όλων των αεροσκαφών που πετάνε μέσα στην περιοχή των αεροδρομίων. Μερικές φορές ονομάζεται ένα "τελικό ραντάρ". Το ραντάρ παρακολούθησης εναέριας πορείας (ARSR) έχει σκοπό του τον εντοπισμό και ανίχνευση αεροσκαφών που είναι καθ' οδό από ένα αεροδρόμιο σε άλλο. Γι' αυτό το λόγο μερικές φορές ονομάζεται ένα "καθ' οδό ραντάρ". Ο εξοπλισμός εντοπισμού εδάφους του αεροδρομίου (ASDE) είναι ένα ραντάρ που συντάσσει το χάρτη του εδάφους του αεροδρομίου για να παρέχει πληροφορίες στον ρυθμιστή που αφορά αεροσκάφη στο

έδαφος, όπως επίσης και την κυκλοφορία οχημάτων μέσα στο αεροδρόμιο. Το ASR και ARSR επίσης παρέχουν στον ελεγκτή εναέριας κυκλοφορίας πληροφορίες για την παρουσία επικίνδυνου και άβολου καιρού που το αεροσκάφος θα έπρεπε να αποφύγει. Το Nexrad ραντάρ είναι ένα (ντόπλερ) ραντάρ καιρού σχεδιασμένο για να παρέχει στον ελεγκτή εναέριας κυκλοφορίας πληροφορίες για τον τοπικό και διεθνή καιρό που δεν είναι διαθέσιμες από το ASR και ARSR. Το FAA ενδιαφέρεται επίσης για ειδικά σχεδιασμένα ραντάρ τοπικού καιρού για να αναπτυχθούν στην περιοχή των αεροδρομίων ώστε να προειδοποιούν για την παρουσία επικίνδυνων μετεωρολογικών συνθηκών, όπως ο άνεμος που μπορούν να επηρεάσουν την ασφαλή πτήση όσον αφορά την προσγείωση ή την απογείωση. Το ραντάρ ακριβής προσέγγισης (PAR) είναι ένα ραντάρ διαμορφωμένο για να βοηθάει στην προσγείωση αεροσκαφών σε πολιτικά αεροδρόμια. Τα συστήματα ραντάρ προσγείωσης δεν χρησιμοποιούνται τώρα για πολιτικό ATC. Αντί γι' αυτό, έχουν αντικατασταθεί απ' το σύστημα μικροκυμάτων προσγείωσης, το οποίο αυτόματα παρέχει στον πιλότο πληροφορίες απαραίτητες γι' αυτό ή γι' αυτήν για να κάνει προσγείωση με μειωμένη ορατότητα, παρά να βασίζεται σε οδηγίες μέσω του ραδίου από έναν ελεγκτή βασισμένο στο έδαφος.

Φαίνεται να υπάρχει μια ζώνη συχνότητας που προτιμάται για κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή του ραντάρ. Η εκλογή μπορεί συνήθως να δικαιολογηθεί από βασικές αρχές του ραντάρ. Το υψηλό ανταγωνιστικό έδαφος του ATC ραντάρ οδήγησε σε μια φυσική εκλογή στην "αγορά" συχνοτήτων που οδηγούν σε αποτελεσματικά (ενεργά) ραντάρ. Εκείνα τα ραντάρ με χαμηλή συχνότητα για την συγκεκριμένη λειτουργία τελικά κυριαρχούνται από εκείνα που λειτουργούν με την συχνότητα "που προτιμάται".

Η τάση να περιστρέφεται γύρω από μια συγκεκριμένη ζώνη συχνότητας βασισμένη στα αποτελέσματα του συναγωνισμού είναι αρκετά προφανής στο ATC ραντάρ. Το μέσης κατεύθυνσης ASR συνήθως βρίσκεται σε S-ζώνη συχνότητας ώστε να αποκτήσει ένα μικρό φάρδος (πλάτος) ακτίνας με μια κεραία μέτριου μεγέθους και για να εντοπίζει βιαστικές

(ενεργές) αντηχήσεις. Το ARSR μεγάλης κατεύθυνσης είναι σε L-ζώνη συχνότητας απ' τη στιγμή που οι χαμηλότερες συχνότητες προτιμούν μεγάλη κατεύθυνση. Τα ραντάρ εντοπισμού εδάφους του αεροδρομίου είναι συνήθως σε K-ζώνη συχνότητας όπου η υψηλή ανάλυση αποκτιέται χωρίς σοβαρή εξασθένηση στη βροχή. Τα ραντάρ καιρού μεγάλης κατεύθυνσης είναι σε S-ζώνη συχνότητας για να εντοπίζουν τις επιδράσεις του καιρού χωρίς τις συνέπειες της εξασθένησης στη βροχή που δοκιμάζονται σε υψηλότερες συχνότητες. Τα ραντάρ καιρού μέτριας κατεύθυνσης είναι σε C-ζώνη συχνότητας για να πετύχουν καλή ανάλυση με μικρά ραντάρ (σε αντίθεση με τα μεγαλύτερα ραντάρ σε S-ζώνη συχνότητας). Η εξασθένηση στη βροχή μπορεί να κανονιστεί (προσαρμοστεί) σε C-ζώνη συχνότητας απ' τη στιγμή που σχεδιάζονται για να έχουν μικρότερη κατεύθυνση απ' τα ραντάρ καιρού σε S-ζώνη συχνότητας. Τα ραντάρ προσγείωσης είναι σε X-ζώνη συχνότητας για να αποκτήσουν καλή ανάλυση γωνίας και κατεύθυνσης.

Αν και το ραντάρ παίζει ένα σημαντικό ρόλο στον έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας, οι κύριοι τρόποι για απόκτηση πληροφοριών σε συνεργάσιμα αεροσκάφη είναι το σύστημα του ραντάρ ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας με φωτεινό σήμα (ATCRBS). Παρέχει την ταυτότητα και το ύψος του συνεργάσιμου αεροσκάφους μαζί με την τοποθεσία τους σε κατεύθυνση και αζιμούθιο. Το ATCRBS είναι ένα καλό σύστημα για την πραγματοποίηση εντοπισμού, τοποθεσίας και αναγνώριση συνεργάσιμων αεροσκαφών. Όμως, δεν έχει καθόλου ικανότητα με αεροσκάφη που δεν κουβαλάνε έναν transponder, όταν το αεροσκάφος με transponder είναι ανίσχυρο.

Το ATC σύστημα ραντάρ με φωτεινό σήμα μερικές φορές ονομάζεται "δευτερεύον ραντάρ" για να διαφοροποιηθεί απ' το "πρωτεύον ραντάρ".

Σύμφωνα με το FAA, το πρωτεύον ραντάρ παρέχει τις παρακάτω υπηρεσίες ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας :

- Πληροφορίες κυκλοφορίας σε αεροσκάφη χωρίς φωτεινό σήμα.

- Ραντάρ υπηρεσιών βοήθειας και αεροπλοΐας σε αεροσκάφη χωρίς φωτεινό σήμα σε δυσκολίες ή επείγοντα περιστατικά.
- Ραντάρ παρατήρησης καιρού και βοήθεια στην αποφυγή περιοχών με κακές καιρικές συνθήκες.
- Σχέδιο (μοντέλο) παρακολούθησης για αεροσκάφη χωρίς φωτεινό σήμα.
- Ραντάρ για το διαχωρισμό αεροσκαφών με φωτεινό σήμα και αεροσκαφών χωρίς φωτεινό σήμα.
- Υποστήριγμα του συστήματος παρακολούθησης σε περίπτωση αποτυχίας του εναέριου transponder.
- Συμβουλευτικές υπηρεσίες του ραντάρ για αεροσκάφη που λειτουργούν προς και από αεροδρόμια χωρίς πύργους ελέγχου.

Αυτό το μέρος εξετάζει τα χαρακτηριστικά και τις εφαρμογές των διαφόρων ραντάρ που χρησιμοποιούνται για έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας. Τα δύο πρώτα ανατυπωμένα χαρτιά δίνουν μια άποψη των βασικών ιδεών του ραντάρ εναέριας παρακολούθησης. Ανατυπωμένο χαρτί 2.1: 'Η τεχνολογία του ραντάρ που χρησιμοποιείται στον έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας', απ' τον W.W. Shrader, είναι μια άριστη εξέταση των βασικών αρχών που συμπεριλαμβάνονται σε τέτοια ραντάρ. Απ' την έκδοση αυτού του χαρτιού το 1973, αρκετή πρόοδος κατορθώθηκε στην επεξεργασία του ΜΤΙ και στην τεχνολογία για την εφαρμογή τέτοιων ραντάρ, αλλά, είναι ακόμα ένα καλό μέρος να ξεκινήσεις ώστε να αποκτήσεις μια αντίληψη της βασικής φιλοσοφίας του σχεδίου πολιτικών ραντάρ για τον εντοπισμό αεροσκαφών. Τα ραντάρ ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας κατασκευάζονται από πολλές εταιρίες στον κόσμο (ο ανταγωνισμός ανάμεσα στις διάφορες εταιρίες είναι ένας λόγος που τα ATC ραντάρ ήταν τόσο αποτελεσματικά με λογικό κόστος). Ανατυπωμένο χαρτί 2.2: 'Μια οικογένεια των ραντάρ ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας', απ' τον E. Giaccari και τον G. Nucci, περιγράφει τα ATC ραντάρ που κατασκευάστηκαν απ' τη Selenia της Ρώμης, Ιταλία. Επίσης περιλαμβάνει μια συζήτηση του γενικού σχεδίου του ραντάρ για τον

εντοπισμό στόχων “στα καθαρά”, υπό την παρουσία εδαφικού θορύβου και κάτω από αντίξοες μετεωρολογικές συνθήκες.

### **3.2 Ραντάρ παρακολούθησης αεροδρομίου**

Το ραντάρ παρακολούθησης αεροδρομίου μέσης κατεύθυνσης (ASR) παρέχει εντοπισμό και ανίχνευση αεροσκαφών και καιρού σε αποστάσεις από περίπου 40 ως 60nmι και κάλυψη ύψους που επεκτείνεται σε περίπου 25000ft (οι αποστάσεις και η κάλυψη ύψους θα βασιστούν στο συγκεκριμένο ραντάρ). Τα ASR είναι τα ραντάρ που συνήθως βλέπονται στα κύρια (μεγάλα) αεροδρόμια. Τα ASR σχεδόν αμετάβλητα λειτουργούν σε S-ζώνη συχνότητας (2.7 ως 2.9 GHz), αν και υπήρξαν κάποια σε L-ζώνη συχνότητας. Τα χαρακτηριστικά ενός S-ζώνης συχνότητας και ενός L-ζώνης συχνότητας ραντάρ δίνονται στον πίνακα 2.1. Μετά χρόνια το S-ζώνης συχνότητας ASR έκανε συνεχόμενη πρόοδο και η πρόσφατη FAA εκδοχή, το ASR-9 περιγράφεται στο ανατυπωμένο χαρτί 2.3: “Σχέδιο ραντάρ παρακολούθησης ενός καινούριου αεροδρομίου (ASR-9)”, απ’ τον J. W. Taylor και G. Brunins. Αυτό το ραντάρ λειτουργεί ασυνόδευτο και έχει υπέρτερη (ανώτερη) εκτέλεση στον εντοπισμό στόχων με θόρυβο και προοδευμένη ικανότητα εντοπισμού καιρού συγκρινόμενο με προηγούμενα μοντέλα.

Το ASR πρέπει να λειτουργεί αξιόπιστα υπό την παρουσία εδαφικών αντηχήσεων ή θορύβου. Επιπλέον πρέπει να έχει μια καλή ικανότητα Ένδειξης Κινούμενου Στόχου (MTI). Η MTI τεχνική που είναι γνωστή ως Ανιχνευτής Κινούμενου Στόχου (MTD), αναπτύχθηκε απ’ το εργαστήριο MIT Lincoln, είναι κατάλληλη για την ASR εφαρμογή. Ανατυπωμένο χαρτί 2.4 : “Προοδευμένη επεξεργασία σήματος για ραντάρ παρακολούθησης αεροδρομίων”, απ’ τον R. M. O’Donnell, C. E. Muehe, M. Labitt, W. H. Drury και L. Cartledge, περιγράφει την φιλοσοφία του MTD. Παρά τον συνηθισμένο ακυρωτή καθυστερημένης γραμμής που είναι συνηθισμένος στα προηγούμενα MTI ραντάρ, το MTD χρησιμοποιεί μια συσσώρευση φίλτρου (ένας αριθμός συνεχόμενων (ντόπλερ) φίλτρων) για να ξεχωρίσει τους

σταθερούς και /ή κινούμενους (καιρικούς) θορύβους από (κινούμενους) στόχους του αεροσκάφους. Άλλο ένα χαρακτηριστικό του MTD είναι το ότι έχει ένα κανάλι που παρακάμπτει τα (ντόπλερ) φίλτρα ώστε να εντοπίσει αεροσκάφη που πετάνε σε μια εφαιπόμενη πορεία (εκείνα με μηδέν (ντόπλερ) συχνότητα). Το MTD είναι ένα άριστο παράδειγμα ενός επεξεργαστή σήματος συναρμολογημένο στο ASR που φέρνει στο μέγιστο την ικανότητα του ραντάρ να εντοπίζει επιθυμητούς στόχους υπό την παρουσία ανεπιθύμητων θορύβων. Το MTD θεωρήθηκε υψηλά προοδευμένο στην τεχνολογία των ASR ραντάρ. Και όμως, πήρε πολύ χρόνο πριν χρησιμοποιηθεί σοβαρά σε ποσότητα σε στρατιωτικά ραντάρ. Η πρώτη έκδοση του MTD ήρθε το 1974, αλλά η σύστασή του στο ASR-9 ήταν σχεδόν 14 χρόνια αργότερα. Αυτοί που έχουν δει τις ιδέες τους για καινούρια τεχνολογία να παίρνουν υπερβολικό ποσό χρόνου για να χρησιμοποιηθούν σ' ένα προϊόν, θα έπρεπε να θυμηθούν το παράδειγμα του MTD. Ήταν κάτι που ήταν επιθυμητό και ευρέως αποδεχόμενο, αλλά η συνηθισμένη αδράνεια στην αποδοχή οποιασδήποτε καινούριας ιδέας πήρε χρόνο να ξεπεραστεί. Άλλες ιδέες που δεν είναι τόσο καλά δεχόμενες όπως το MTD, παίρνουν ακόμα περισσότερο.

### **3.3 Ραντάρ παρακολούθησης εναέριων πορείας**

Ο εντοπισμός και ανίχνευση αεροσκαφών καθ' οδό από ένα αεροδρόμιο σ' ένα άλλο απαιτεί μια μεγαλύτερη ταχύτητα του ραντάρ απ' ότι εκείνο για παρακολούθηση αεροσκαφών στην περιοχή εναέριων πόλων. Τα ARSR ραντάρ για έλεγχο εναέριων κυκλοφορίας καθ' οδό έχουν μια ονομαστική ταχύτητα των 200nm<sup>2</sup> και μια κάλυψη ύψους περίπου 60000ft. Μερικά ραντάρ καθ' οδό έχουν λειτουργήσει σε S-ζώνη συχνότητας και μερικά σε UHF, αλλά οι βασικές αρχές του σχεδίου του ραντάρ-όπως επίσης και ο ανταγωνισμός της αγοράς-δείχνει ότι η L-ζώνη συχνότητας είναι προτιμότερη.

Τα χαρακτηριστικά του ARSR-3 ραντάρ καθ' οδό αναγράφονται στον πίνακα 2.1. Αυτό έχει μια πολύ μεγαλύτερη κεραία απ' τα ASR ραντάρ σε S-ζώνη συχνότητας και ο ρυθμός

περιστροφής του είναι αργότερος. Γενικά, όσο μικρότερη είναι η ταχύτητα του ραντάρ τόσο μικρότερος είναι ο εκ νέου χρόνος. Επί αυτού, μεγαλύτερος ρυθμός περιστροφής για το ASR. Ανατυπωμένο χαρτί 2.5: 'Ραντάρ παρακολούθησης μεγάλης κατεύθυνσης για συστήματα αυτόματου ελέγχου', απ' τον J. W. Taylor, Jr. και G. Brunins, περιγράφει μερικά απ' τα προσόντα του ARSR-3.

### **3.4 Ειδικά χαρακτηριστικά των ATC ραντάρ παρακολούθησης**

Κάθε εφαρμογή έχει μερικές ειδικές απαιτήσεις που κάνουν το ραντάρ της διαφορετικό από ραντάρ σχεδιασμένα για άλλες εφαρμογές. Είναι ασυνήθιστο να βρεις ένα ραντάρ που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ικανοποιητικά για περισσότερες από μια εφαρμογές. Δεν είναι εκπληκτικό ότι και το ASR τερματικό ραντάρ και το ARSR ραντάρ καθ' οδό είναι αρκετά διαφορετικά το ένα από το άλλο (όπως επεξηγήθηκαν απ' τη σύγκριση στον πίνακα 2.1). Όμως, αυτές οι δύο κατηγορίες ραντάρ έχουν κάμποσα χαρακτηριστικά κοινά που είναι χαρακτηριστικά της πολιτικής εφαρμογής ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας και δεν βρίσκονται συνήθως σε παρόμοιες στρατιωτικές εφαρμογές εναέριας παρακολούθησης. Αυτά περιλαμβάνουν τεχνικές για : 1) απομάκρυνση κινούμενων αντηχήσεων οχημάτων που βρίσκονται στο έδαφος, 2) απόκτηση υψηλής διαθεσιμότητας και 3) απομάκρυνση ανεπιθύμητων ήχων από πουλιά και έντομα. Το καθένα θα συζητηθεί σύντομα.

### **3.5 Αντηχήσεις από κινούμενα εδαφικά οχήματα**

Τα αυτοκίνητα και τα φορτηγά μπορούν να έχουν ταχύτητες που ελαττώνονται μέσα στο passband του ΜΤΙ (ντόπλερ) φίλτρου. Η κυκλοφορία των οχημάτων σε κύριες εθνικές οδούς μπορεί να εκτεθεί στο ραντάρ εναέριας παρακολούθησης και να προκαλέσει αντηχήσεις που αναμειγνύονται με τον εντοπισμό των αεροσκαφών. Γυρνώντας με τα χέρια την ακτίνα κεραίας προς τα πάνω για να αποφύγεις την διευκρίνιση του εδάφους αυτό θα μειώσει αυτές τις ανεπιθύμητες αντηχήσεις. Γυρνώντας την κεραία, όμως, θα προκαλέσει την έλλειψη των επιθυμητών αποδόσεων του αεροσκάφους στις μεγαλύτερες ταχύτητες. Απ' τη στιγμή που η



κυκλοφορία εδαφικών οχημάτων δεν φαίνεται σε μεγάλη απόσταση (όταν καλύπτεται απ' τη σφαιρικότητα της γης), το γύρισμα της κεραίας μπορεί να μειωθεί απ' τη στιγμή που ο παλμός μεταβιβαστεί σε μεγαλύτερη ταχύτητα. Γι' αυτό, η απομάκρυνση ενοχλητικής κυκλοφορίας απ' το ραντάρ απαιτεί να ανυψωθεί η ακτίνα απ' το έδαφος όταν ο μεταδιδόμενος παλμός είναι σε μικρή ταχύτητα, αλλά, να χαμηλωθεί ξανά όταν ο παλμός είναι σε μεγάλη ταχύτητα. Το αποτέλεσμα του να αλλάζεις το γύρισμα της ακτίνας χρησιμοποιώντας δύο επικλινείς ακτίνες ανύψωσης, όπως περιγράφεται στην εικόνα 17 του ανατυπωμένου χαρτιού 2.1. Η χαμηλότερη ακτίνα χρησιμοποιείται για μετάδοση. Σε μικρή απόσταση, η εισδοχή είναι στην πάνω ακτίνα έτσι ώστε να διευκρινίζονται οι εδαφικοί στόχοι με λιγότερη ενέργεια. Ο δέκτης τότε αλλάζει στην χαμηλότερη ακτίνα για να εντοπίσει στόχους σε μεγάλη απόσταση. Η διάσχιση απ' τη ψηλότερη προς τη χαμηλότερη ακτίνα στο ARSR-3 συμβαίνει σε απόσταση από 50 ως 60nmι.

### **3.6 Διαθεσιμότητα**

Ένα ραντάρ δεν έχει αξία αν δεν μπορεί να επιδιορθωθεί εξαιτίας μιας δυσλειτουργίας. Η ικανότητα του ραντάρ να λειτουργεί όταν χρειάζεται περιγράφεται απ' την "διαθεσιμότητα" που ορίζεται απ' το κλάσμα της ώρας που το ραντάρ είναι ικανό να εκτελέσει την αποστολή του. Η διαθεσιμότητα μπορεί να εκφραστεί καθώς το MTBF διαιρείται από (MTBF+MTTR), όπου το MRBF είναι η μέση ώρα ανάμεσα στις αποτυχίες και το MTTR είναι η μέση ώρα για να επιδιορθωθεί. Το MTBF ενός πολύπλοκου 3D ραντάρ εναέριας παρακολούθησης μεγάλης ταχύτητας κλασικού σχεδίου ίσως να είναι (για παράδειγμα) 50 ως 200 ώρες. Ένα παρόμοιο 2D ραντάρ εναέριας παρακολούθησης μεγάλης ταχύτητας, το οποίο είναι λιγότερο πολύπλοκο από τα 3D ραντάρ, ίσως να έχει τα MTBF από 200 ως 600 ώρες (ένα 3D ραντάρ μετράει ταχύτητα (κατεύθυνση), αζιμούθιο και ανύψωση ενός στόχου. Ένα 2D ραντάρ μετράει ταχύτητα (κατεύθυνση) και γωνία. Τα ATC ραντάρ παρακολούθησης είναι 2D). Αν δοθεί ειδική προσοχή στην αξιοπιστία, ένα MTBF

600 ως 1200 ωρών, ίσως να είναι εφικτό. Όμως, τα MTBF που είναι πολύ μεγαλύτερα από 1200 ώρες δεν πετυχαίνονται (πραγματοποιούνται) ευκόλως σε πολύπλοκα ραντάρ.

Η διαθεσιμότητα είναι ένα καλύτερο μέτρο απ' ότι η αξιοπιστία χρησιμότητας του ραντάρ απ' τη στιγμή που εκφράζει το κλάσμα της ώρας που είναι διαθέσιμο για τον χειριστή να το χρησιμοποιήσει (η αξιοπιστία ενός ραντάρ δείχνεται απ' το MTBF του). Η υψηλή διαθεσιμότητα μπορεί να αποκτηθεί επιτελώντας ένα μεγάλο διάστημα ανάμεσα στις αποτυχίες (ελλείψεις) [υψηλή αξιοπιστία] ή ένα μικρό διάστημα να πραγματοποιήσει μια επιδιόρθωση ή κάποιο συνδυασμό και των δύο. Ένας κοινός καθορισμός (όχι παγκοσμίως κατορθωμένος στην πράξη) για το μέσο χρόνο να επιδιορθώσει ένα ραντάρ είναι 30 λεπτά. Μ' ένα MTTR 30 λεπτών και ένα MTBF 200 ωρών, η διαθεσιμότητα είναι 0.9975. Αυτό είναι ένα άριστο νούμερο αλλά όχι απαραίτητα σχετικό με τον "πραγματικό κόσμο", απ' τη στιγμή που κάνει υποθέσεις που δεν βρίσκονται πάντα στην πράξη. Ένα MTTR 30 λεπτών που αναλαμβάνει το μέρος που χρειάζεται για επιδιόρθωση είναι στη θέση του ραντάρ που είναι έτοιμο να εγκατασταθεί. Σε μερικές περιπτώσεις, όμως, ίσως πάρει μεγαλύτερο χρόνο να απαιτήσει το μέρος (κάμποσες εβδομάδες ίσως να μην είναι ασυνήθιστες). Αν το μέρος που χρειάζεται δεν είναι ήδη στη θέση του ραντάρ. Ένα MTTR μιας εβδομάδας, για παράδειγμα, μειώνει την διαθεσιμότητα σε περίπου 0.54 όταν το MTBF είναι 200 ωρών. Γι' αυτό η διαθεσιμότητα του ραντάρ μπορεί μερικές φορές να είναι αρκετά χαμηλή, ίσως τόσο χαμηλή όσο μόνο το μισό της ώρας ή λιγότερο. Η υψηλή διαθεσιμότητα απαιτεί να παρθούν καθιερωμένες ενέργειες για να εξασφαλίσουν ότι είναι κατορθωτή και στηρίζεται στην πράξη.

Περισσότερο από πολλούς άλλους χρήστες του ραντάρ, το FAA απαιτεί εξαιρετικά υψηλή διαθεσιμότητα. Η προσέγγιση που πάρθηκε απ' το FAA για να κατορθώσει υψηλή διαθεσιμότητα του ραντάρ περιλαμβάνει τα παρακάτω :

- Χτίσιμο στην εύρεση του λάθους για να αναγνωρίσεις εύκολα τα αποτυχημένα μέρη.

- Κατασκευή για να διευθετήσεις τις ανάγκες επιδιόρθωσης (τα αποτυχημένα μέρη θα έπρεπε να είναι προσιτά).
- Πειραμαμένη, δικαιολογημένη επιδιόρθωση προσώπου που ξέρει το ραντάρ.
- Μια έτοιμη προμήθεια εφεδρικών μερών στη θέση του ραντάρ ή γρήγορη πρόσβαση στα μέρη όταν χρειάζεται.
- Διπλά κανάλια λειτουργίας (όλα εκτός απ' την κεραία), ώστε όταν συμβαίνει ένα λάθος σ' ένα κανάλι, το σύστημα να μπορεί να παραμείνει στον αέρα καθώς το κανάλι επιδιορθώνεται. (Όταν παρέχονται δύο ίδια κανάλια, όπως στα περισσότερα FAA ραντάρ λειτουργούν αυτόματα για να βεβαιώσουν ότι το "εφεδρικό" κανάλι θα είναι ικανό να λειτουργήσει όταν χρειαστεί. Τα δύο κανάλια είναι σε διαφορετικές συχνότητες για να εκμεταλλευτούν την αύξηση του εντοπισμού. Το ανατυπωμένο χαρτί 2.5 δείχνει ότι το decorrelation του στόχου όταν χρησιμοποιούνται δύο συχνότητες παρέχει ένα 4-dB πλεονέκτημα συγκρινόμενο με όταν υπάρχει μια μόνο συχνότητα αναλαμβάνοντας μία 0.8 πιθανότητα εντοπισμού. Αυτό, μαζί με 3-dB αύξηση σε δύναμη εξαιτίας του δεύτερου μεταδότη, καταλήγει σε μία ολική αύξηση 7-dB του εντοπισμού όταν χρησιμοποιείται το σύστημα διπλού καναλιού ).

Οι παραπάνω οδηγίες για υψηλή διαθεσιμότητα ίσως να φαίνονται πολύ φανερές σε οποιοδήποτε στάδιο, αλλά υπάρχουν μόνο λίγες λειτουργίες του ραντάρ που μπορούν να ισχυριστούν ότι αυτές ακολουθούνται σε έκταση όταν χρειάζονται.

Επειδή εμπλέκεται η ασφάλεια της ζωής, το FAA παίρνει στα σοβαρά την ανάγκη (απαίτηση) ότι τα ραντάρ πρέπει να είναι ικανά να λειτουργούν χωρίς πολύ χρόνο. Έχουν δείξει με παράδειγμα, ότι αυτό μπορεί να κατορθωθεί. Υπάρχουν άλλες μέθοδοι για να πετύχεις υψηλή διαθεσιμότητα από εκείνες που επιδεικνύονται απ' το FAA, όπως για παράδειγμα, η πρακτική υψηλής αξιοπιστίας που χρησιμοποιείται απ' το διαστημικό πρόγραμμα της NASA. Η FAA προσέγγιση, όμως, προσαρμόζεται στο ραντάρ εναέριας παρακολούθησης που είναι βασισμένο στο έδαφος.

Σύμφωνα με το έγγραφο G-2100/1 του FAA, ο μέσος χρόνος ανάμεσα στις αποτυχίες για ένα μονό κανάλι ενός ραντάρ δύο καναλιών δεν θα έπρεπε να είναι λιγότερος από 750 ώρες και το σύστημα διαθεσιμότητας για λειτουργία δύο καναλιών δεν θα έπρεπε να είναι λιγότερος από 0.997. Όταν η παραπάνω απαίτηση προσαρμόστηκε στο SRE-M5 ραντάρ παρακολούθησης μέσης κατεύθυνσης που κατασκευάστηκε από την AEG-Telefunken (Γερμανία), κατορθώθηκε μια διαθεσιμότητα 0.9998, αναλαμβάνοντας ένα συνοδευόμενο σύστημα με ικανότητα πλήρους επιδιόρθωσης. Αυτό συζητιέται στο ανατυπωμένο χαρτί 2.6 : "Ανάγκες (απαιτήσεις) αξιοπιστίας και η πραγματοποίησή του σε έναν εξοπλισμό ραντάρ παρακολούθησης μεσαίας κατεύθυνσης, απ' τον D. Krause.

### **3.7 Πουλιά και έντομα**

Οι αντηχήσεις από πουλιά και έντομα μπορούν εύκολα να εντοπιστούν από τα είδη ραντάρ που χρησιμοποιούνται για το ATC. Ένα ραντάρ που μπορεί να εντοπίσει ένα 0.01 sq m, στόχο σε 200 nmi μπορεί να εντοπίσει ένα 0.01 sq m στόχο σε 63 nmi και ένα μόνο 10<sup>-5</sup> sq m στόχο σε πάνω από 11 nmi. Για την αποφυγή αυτών των ενοχλητικών αντηχήσεων χρησιμοποιείται το STC.

Το STC απορρίπτει (αποκρούει ) την δεχόμενη αύξηση σε μικρές κατευθύνσεις όπου οι μικροί ενοχλητικοί στόχοι εντοπίζονται αλλά αποκαθιστά την αύξηση στο μέγιστο σε μεγαλύτερη κατεύθυνση όπου χρειάζεται η πλήρως ικανότητα του ραντάρ για να δει αεροσκάφη. Τα περισσότερα ATC ραντάρ περιλαμβάνουν STC για να αποφύγουν πουλιά και έντομα, αλλά, όπως εξηγείται στο ανατυπωμένο χαρτί 2.1, το σχέδιο της τετραγωνικής συντέμνουσας κεραίας των ATC ραντάρ που ενσωματώνουν STC πρέπει να τροποποιηθεί ώστε να μην χάνει αεροσκάφη σε μικρή κατεύθυνση και μεγάλο ύψος εξαιτίας του μειωμένου κέρδους που παρουσιάζεται απ' το STC. Το τροποποιημένο σχέδιο τετραγωνικής συντέμνουσας κεραίας τοποθετεί πρόσθετη αύξηση κεραίας σε γωνία μεγάλου ύψους για να αντισταθμίσει το μειωμένο δεχόμενο κέρδος (ή αύξηση). Αυτό το είδος κεραίας είναι άλλο ένα διακριτικό χαρακτηριστικό των ATC ραντάρ. (Το STC δεν χρησιμοποιείται σε όλα τα

ραντάρ εναέριας παρακολούθησης. Για παράδειγμα, τα στρατιωτικά ραντάρ με παλμική (ντόπλερ) μορφή κύματος και τα ραντάρ για εντοπισμό μικρών στόχων δεν το χρησιμοποιούν).

Μια άριστη εξέταση (ανασκόπηση) του ραντάρ για πουλιά και έντομα έχει δοθεί απ' το C. R. Vaughn. Αυτός ανακεφαλαίωσε τις υπάρχοντες πληροφορίες για τα ραντάρ αυτών των στόχων, έδωσε εκτιμήσεις του θορύβου τους και περιέγραψε τη φύση των διαμορφώσεων.

### **3.8 Εξοπλισμός εντοπισμού του εδάφους του αεροδρομίου**

Το μεγάλο μέγεθος των μοντέρνων αεροδρομίων για Τζετ (Jet) και η μεγάλη πυκνότητα κυκλοφορίας κάνουν δύσκολο για τον ελεγκτή στον πύργο ελέγχου του αεροδρομίου να διατηρήσει οπτική επαφή του αεροσκάφους στους διαδρόμους προσγείωσης, στους αεροδιάδρομους και στις περιοχές παρκαρίσματος αν ο καιρός είναι καλός. Σε συνθήκες μειωμένης ορατότητας είναι ακόμα πιο δύσκολο για τον ελεγκτή να ξέρει τι συμβαίνει. Ο ελεγκτής πρέπει να είναι ενήμερος για όλες τις εδαφικές κινήσεις αν πρέπει να αποφευχθούν συγκρούσεις και τα τροχοδρομημένα αεροσκάφη πρέπει να κατευθυνθούν αποτελεσματικά από ένα μέρος σ' ένα άλλο.

Αν και δεν υπάρχουν τεχνικές του ραντάρ για προειδοποίηση της εδαφικής κυκλοφορίας, το ραντάρ υψηλής ανάλυσης έχει αποδείξει ότι είναι μια αποτελεσματική τεχνική για την επίλυση του προβλήματος του ελέγχου εδαφικής κυκλοφορίας. Τα πρωτότυπα (αρχικά) ADS ραντάρ (ASDE-1 και ASDE-2) λειτούργησαν σε Κ-ζώνη συχνότητας με μια ανάλυση περίπου 10ft σε κατεύθυνση. Το ASDE-2 περιλήφθηκε σ' ένα radome και δέθηκε σε ένα ψηλό μέρος στο αεροδρόμιο, συνήθως στην κορυφή του πύργου ελέγχου. Αυτά τα ASDE είχαν κάμποσους περιορισμούς. Η συχνότητα έπρεπε να είναι υψηλή ώστε να έχει καλή γωνιακή ανάλυση αλλά τα αποτελέσματα της βροχής σε υψηλή συχνότητα προκάλεσαν φθορά. Για να κάνει τα πράγματα χειρότερα, η 24-GHz συχνότητα του αρχικού ASDE ήταν κοντά σε μια γραμμή απορρόφησης ατμών νερού έτσι ώστε η εκτέλεση του ραντάρ έπασχε

εξαιτίας της αυξανόμενης εξασθένησης. Μερικά radome υλικά βασικά απορροφούσαν παρά απωθούσαν το νερό και προκαλούσαν προστιθέμενη απώλεια όταν ήταν βρεγμένα.

Αργότερα τα ASDEs λειτουργούσαν σε μια χαμηλότερη συχνότητα, K-ζώνη συχνότητας, για να αποφύγουν την γραμμή απορρόφησης εξατμισμένου νερού. Ακόμα και χωρίς το πρόβλημα απώλειας εξαιτίας της απορρόφησης, χρειαζόντουσαν καινούρια ραντάρ απ' τη στιγμή που η τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε στα υψηλής ανάλυσης ASDEs δεν ήταν επαρκής όπως θα ήταν επιθυμητό. Η τεχνολογία υψηλής ανάλυσης προόδευσε σημαντικά απ' τη στιγμή του σχεδίου του αρχικού (πρωτοτύπου) ASDE, ειδικά οι ενισχυτές ευρείας ζώνης συχνότητας, οι κεραίες με μεταβλητές εστίες και οι προοδευμένοι μεταδότες.

Τα ASDEs κατασκευάζονται από έναν αριθμό εταιριών σ' όλο τον κόσμο. Το ανατυπωμένο χαρτί 2.7: 'Εξοπλισμός εντοπισμού του εδάφους του αεροδρομίου'', από τον C. E. Schwab και τον D. P. Rost περιλαμβάνει έναν πίνακα με τα χαρακτηριστικά των διαφόρων ASDEs που έχουν δημιουργηθεί. Το χαρτί τους όμως, ενδιαφέρεται κυρίως για τον εξοπλισμό που είναι γνωστός ως το ASDE-3, ένα ραντάρ με K-ζώνη συχνότητας μ' ένα rotodome. Αυτό το rotodome έχει ένα ρυθμό περιστροφής 60rpm.

### **3.9 Ραντάρ καιρού για έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας**

Το ARSR και το ASR έχουν σαν μέρος της αποστολής τους τον εντοπισμό του καιρού που θα έπρεπε να αποφευχθεί απ' το αεροσκάφος. Το ASR-9 όμως περιγράφεται στο ανατυπωμένο χαρτί 2.3, έχει ένα ξεχωριστό κανάλι δέκτη για την επίδειξη δύο επιπέδων της έντασης αντηγήσεων του καιρού που διαλέγονται από έξι πιθανά επίπεδα. Τα ραντάρ εναέριας παρακολούθησης προορίζονται για εντοπισμό αεροσκαφών και δεν είναι ειδικά σχεδιασμένα για παρατήρηση του καιρού. Γι' αυτό εκτελούν μόνο το μέρος της δουλειάς που χρειάζεται για την ακριβή και έγκαιρη γνώση των συνθηκών του καιρού που μπορεί να είναι επικίνδυνες για τα αεροσκάφη.

Είναι σημαντικό για το αεροσκάφος να αποφεύγει το χαλάζι απ' τη στιγμή που το χαλάζι μπορεί να προκαλέσει ζημιά στην κατασκευή του αεροσκάφους. Η φυσιολογική διατάραξη δεν είναι απαραίτητα απειλητική αλλά θα έπρεπε να αποφεύγεται απ' τη στιγμή που μπορεί να προκαλέσει έλλειψη άνεσης στους επιβάτες. Άλλες απειλητικές καιρικές συνθήκες που χρειάζεται να εντοπιστούν με ικανοποιητική ώρα προειδοποίησης είναι ο χαμηλού επιπέδου άνεμος και οι μικρό-εκρήξεις απ' τις θύελλες. Αυτά μπορεί να είναι πολύ σοβαρά ώστε να προκαλέσουν τη συντριβή (ή πτώση) του αεροσκάφους στην προσγείωση. Η ακριβής γνώση και πρόβλεψη αντίξοου καιρού είναι επίσης σημαντικά για την πρόοδο των οικονομικών, των λειτουργιών των αερογραμμών, όπως επίσης και για ασφάλεια.

Το Nexrad ραντάρ καιρού, που περιγράφεται στην παράγραφο 6.3, είναι μέρος ενός εθνικού συστήματος για να παρακολουθεί τον καιρό που μπορεί να επηρεάσει το αεροσκάφος καθ' οδό. Η ασφαλής πτήση μέσα και έξω απ' τα αεροδρόμια με αντίξοο καιρό απαιτεί ένα ραντάρ παρόμοιο με το Nexrad, αλλά ένα μικρότερης ταχύτητας.

Όπως αναφέρθηκε πριν, το ASR παρέχει πληροφορίες για τον καιρό στην περιοχή των αεροδρομίων. Αλλά, ένα ραντάρ για τον καιρό που προορίζεται για προστασία των αεροσκαφών στον αέρα θα έπρεπε να έχει χαρακτηριστικά διαφορετικά από εκείνα του συνηθισμένου ASR. Το ραντάρ για καιρό θα έπρεπε να χρησιμοποιεί μια μικρή ακτίνα (της τάξης του ενός βαθμού) για να αναλύει τα καιρικά φαινόμενα σαν μια λειτουργία του ύψους. Πρέπει επίσης να είναι ικανό να μετράει την μεταβολή της (ντόπλερ) συχνότητας (για να εξάγει την σχετική ταχύτητα του ανέμου) και το πλάτος (φάρδος) του (ντόπλερ) φάσματος (το οποίο είναι μια μέτρηση του ανέμου και της διατάραξης). Η απόκρουση (απόρριψη) του θορύβου είναι απαραίτητη για να απομακρύνει (αποβάλλει) τις εδαφικές αντηχήσεις που παρεμβαίνουν με την ακριβή μέτρηση της (ντόπλερ) συχνότητας και του φασματικού πλάτους (φάρδους).

### **3.10 Ραντάρ ακριβής προσέγγισης**

Το ραντάρ ακριβής προσέγγισης καλύπτει την προσέγγιση στο διάδρομο προσγείωσης και ανιχνεύει τη θέση των προσγειωμένων αεροσκαφών έτσι ώστε να μπορούν να καθοδηγηθούν σε μια ασφαλή προσγείωση, ειδικά με μειωμένη ορατότητα. Η στρατιωτική ερμηνεία ονομάζεται ραντάρ προσέγγισης ελεγχόμενου εδάφους (GCA). Το PAR και το GCA είναι ειδικά σημαντικό όταν οι καιρικές συνθήκες εμποδίζουν τον πιλότο απ' το να δει το διάδρομο προσγείωσης στον οποίο το αεροπλάνο πρέπει να προσγειωθεί. Ο GCA ελεγκτής παρατηρεί το προσγειωμένο αεροσκάφος στο ραντάρ και προφορικά καθοδηγεί τον πιλότο, μέσο ραδίου, να μπει μέσα στην κλίση πορείας του ανέμου έτσι ώστε όταν το αεροσκάφος κατεβαίνει κάτω απ' τα σύννεφα, ο πιλότος θα είναι σε θέση να προσγειωθεί. Όλος ο έλεγχος είναι στο έδαφος. Ο πιλότος ακολουθεί οδηγίες να πετάξει "πάν", "κάτω", "δεξιά" ή "αριστερά". Αυτό το είδος προσγείωσης χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν σε πολιτικά αεροδρόμια, αλλά, στους πιλότους εμπορικών αερογραμμών δεν άρεσε το GCA απ' τη στιγμή που δεν τους άρεσε να έχουν κάποιον στο έδαφος να ελέγχει το αεροπλάνο πέρα απ' αυτούς. Προτιμούσαν να έχουν τις απαραίτητες πληροφορίες που παρουσιάζονται στο πιλοτήριο και να παίρνουν τις δικές τους αποφάσεις για το πώς θα οδηγήσουν το αεροσκάφος σε μια ασφαλή προσγείωση. Γι' αυτό το FAA δεν χρησιμοποιεί πλέον GCA ή PAR αλλά χρησιμοποιεί ένα σύστημα προσγείωσης που εμπλέκει περισσότερο τον πιλότο.

Το σύστημα προσγείωσης απ' το ταμπλό του αεροσκάφους ήταν το πολιτικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε πριν αλλά αντικαταστάθηκε απ' το σύστημα προσγείωσης μικροκυμάτων (MLS). Το MLS είναι ένα σύστημα "που προέρχεται απ' τον αέρα", το οποίο αντιτάσσεται στο GCA το οποίο είναι ένα σύστημα "που προέρχεται απ' το έδαφος". Αυτό μερικές φορές ονομάζεται ένα Σύστημα Χρονικής Αναφοράς Εξερευνημένης Ακτίνας, απ' τη στιγμή που ο πιλότος παράγει την γωνιακή τοποθεσία του αεροσκάφους σε σχέση με το κέντρο του διαδρόμου προσγείωσης σημειώνοντας το χρόνο ανάμεσα στις επιτυχημένες διαβάσεις της εξερευνημένης ακτίνας που εξερευνά τον γωνιακό τομέα σε μια κανονισμένη πισινή και μπροστινή κίνηση. Σε κάθε κύκλο της εξερεύνησης, δύο παλμοί λαμβάνονται απ' το



αεροσκάφος. Το διάστημα χρόνο ανάμεσά τους είναι ανάλογο με τη γωνιακή θέση του αεροσκάφους.

Τα στρατιωτικά αεροσκάφη και οι στρατιωτικοί πιλότοι λειτουργούν διαφορετικά απ' τους πολιτικούς συναδέλφους τους. Αυτοί είναι πιο συνηθισμένοι στο να δέχονται οδηγίες απ' το έδαφος απ' ότι ένας εμπορικός πιλότος. Ο στρατός έχει χρησιμοποιήσει GCA επειδή δεν απαιτεί έξτρα εξοπλισμό στο αεροσκάφος πέρα από το στάνταρ δέκτη επικοινωνίας (το βάρος και το διάστημα είναι συνήθως δυσκολότερο να αποκτηθούν σε στρατιωτικά αεροσκάφη απ' ότι σε πολιτικά αεροσκάφη), δεν απαιτεί ειδική εκπαίδευση απ' τη μεριά του πιλότου και η επιτυχία του έχει αποδειχτεί με πολλά χρόνια λειτουργίας.

Υπήρξαν δυο διαφορετικές μορφές GCA ραντάρ. Η παλιότερη μορφή, ένα παράδειγμα της οποίας είναι το AN/MPN-1, έχει δύο ορθογώνιες περιστρεφόμενες ακτίνες που εξερευνούνταν απ' τον Eagle ηλεκτρομηχανικό εξερευνητή. Η μια περιστρεφόμενη ακτίνα αποκτάει την ανύψωση γωνίας και η άλλη το αζιμούθιο. Παραδείγματα της άλλης μορφής του GCA είναι τα ηλεκτρονικά εξερευνημένα AN/TPN-22 και AN/TPN-19. Αυτά χρησιμοποιούν μια περιορισμένης εξερεύνησης κεραία σε θέση φάσεως που παράγει ένα σχέδιο μονοπαλμικής ακτίνας για την ακτινοβολία που εξερευνείται ηλεκτρονικά σε μια περιοχή 20° σε αζιμούθιο και 15° σε ανύψωση.

Ένα στρατιωτικό GCA σύστημα αποτελείται από περισσότερα από απλώς ένα ραντάρ προσγείωσης. Έχει ένα ASR για να εντοπίζει αεροσκάφη που σχεδιάζουν να προσγειωθούν, ένα IFF (η στρατιωτική ερμηνεία του ATCRBS) για να αναγνωρίζει συγκεκριμένα αεροσκάφη και συνηθισμένο ράδιο επικοινωνίες για να διακόπτει τη επικοινωνία του πιλότου. Τα μοντέρνα GCA συστήματα μπορούν να παρέχουν μια εντελώς αυτόματη προσγείωση χωρίς τη παρέμβαση του πιλότου.

### **3.11 Έλεγχος εναέριας κυκλοφορίας με σύστημα ραντάρ με φωτεινό σήμα**

Αν και δεν είναι ένα σύστημα ραντάρ, ο έλεγχος εναέριας κυκλοφορίας με σύστημα ραντάρ με φωτεινό σήμα (ATCRBS) [8],[9] αναφέρεται εδώ απ' τη στιγμή που είναι ένα σημαντικό μέρος του ATC και χρησιμοποιεί τεχνικές παρόμοιες με του ραντάρ. Συχνά είναι το "κύριο" αισθητήριο όργανο του ATC αν και ονομάζεται "δευτερεύων ραντάρ" (ένα όνομα που χρησιμοποιείται περισσότερο στην Ευρώπη απ' ότι στις Ηνωμένες Πολιτείες). Το ATCRBS είναι ένα "συνεργάσιμο" σύστημα στο ότι το αεροσκάφος πρέπει να έχει πάνω στο πλοίο έναν μεταδότη που απαντάει σε μια ερώτηση απ' το μεταδότη που βρίσκεται στο έδαφος. Το ραντάρ, απ' την άλλη μεριά, δεν χρειάζεται ένα "συνεργάσιμο" στόχο αλλά βασίζεται στο παιχνίδι των αντηχήσεων απ' το αεροσκάφος.

Η συνεργάσιμη φύση του ATCRBS καταλήγει σε μερικά σημαντικά πλεονεκτήματα. Επειδή χρησιμοποιεί δύο μονοδρομικές τροχιές του ραντάρ απ' ότι μια τροχιά δύο δρόμων του ραντάρ, ο ATCRBS μεταδότης μπορεί να είναι χαμηλής δύναμης απ' ότι ο μεταδότης ενός ραντάρ ανάλογης κατεύθυνσης. Η απάντηση απ' τον εναέριο ATCRBS μεταδότη γίνεται σε συχνότητα διαφορετική απ' το ερωτώμενο σήμα. Γι' αυτό οι θορυβώδεις αντηχήσεις που αντανακλώνται απ' το έδαφος ή τον καιρό που ενοχλούν τον εντοπισμό του ραντάρ δεν γίνονται δεκτές απ' τον δέκτη. Απ' την στιγμή που το ATCRBS είναι βασικά ένα σύστημα επικοινωνίας δύο δρόμων, η κρυπτογραφημένη απάντηση απ' τον μεταδότη μπορεί να γίνει για να παρέχει στον ελεγκτή εναέριας κυκλοφορίας την ταυτότητα και το ύψος του αεροσκάφους όπως διαβάζεται απ' το συμπιεσμένο υψόμετρο.

Με τη μέθοδο-S του ATCRBS, το οποίο έχει ένα δύο-δρόμων σύστημα δεδομένων στοιχείων με πλήκτρα, είναι δυνατόν να μεταδώσει στον πιλότο μηνύματα απ' το έδαφος (όπως τον εντοπισμό επικίνδυνου καιρού) που μπορούν να βοηθήσουν στον έλεγχο του αεροσκάφους. Η μέθοδος-S είναι ικανή να κάνει τα αεροσκάφη να συμπεριφέρονται ατομικά παρά να ρωτάει όλα τα αεροσκάφη μέσα στη κάλυψή του. Αυτή η ικανότητα ονομάζεται "ξεχωριστή (διαφορετική) συμπεριφορά". (Η μέθοδος παλαιότερα ονομαζόταν DABS, ή Σύστημα Ξεχωριστής Συμπεριφοράς με Φωτεινό σήμα).

Τα ραντάρ ανεύρεσης ύψους που είναι βασισμένα στο έδαφος και τα 3D ραντάρ μπορούν να δώσουν το ύψος του αεροσκάφους. Όμως, το ύψος δεν μπορεί να μετρηθεί με ραντάρ στην ακρίβεια που απαιτείται για ATC. (Αυτός είναι ένας λόγος που τα ATC ραντάρ παρακολούθησης είναι 2D και όχι 3D). Είναι επίσης δυνατό για ειδικά σχεδιασμένα ραντάρ να αποκτούν πληροφορίες απ' το σήμα αντήχησης που θα επιτρέψει την αναγνώριση μιας κατηγορίας αεροσκάφους από μια άλλη. Το ραντάρ, όμως, δεν μπορεί να αναγνωρίσει τον αριθμό πτήσης ή το πλαϊνό νούμερο (ή να δώσει το όνομα του πιλότου) όπως μπορεί το ATCRBS.

Το ATCRBS παρέχει μια σημαντική ικανότητα για τον έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας. Όμως, δεν μπορεί να κάνει αυτό που κάνει καλά το ραντάρ, το οποίο είναι να εντοπίζει και να καθορίζει αεροσκάφη που δεν έχουν μεταδότες ή των οποίων οι μεταδότες δεν λειτουργούν και να εντοπίζει επικίνδυνο καιρό και δραστηριότητα πουλιών που θα έπρεπε να αποφευχθεί.

### **3.12 Έλεγχος εναέριας κυκλοφορίας απ' το διάστημα**

Υπήρξαν προτάσεις που έγιναν με το χρόνο για χρήση δορυφορικών συστημάτων για έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας, ειδικά πάνω από τους ωκεανούς. Αυτό ίσως να περιλαμβάνει τη χρήση ενός ATCRBS συστήματος τοποθετημένο σ' ένα δορυφόρο ή ένα σύστημα επικοινωνίας παγκόσμιας (συνολικής) ακρίβειας. Η χρήση ραντάρ του διαστήματος για εντοπισμό αεροσκαφών συζητιέται σύντομα στον τομέα 5.4.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **Στρατιωτικά ραντάρ**

#### **4.1 Στρατιωτικές εφαρμογές του ραντάρ**

Τα ραντάρ που χρησιμοποιούνται απ' τον στρατό για άμυνα εναντίον επιθέσεων από αεροσκάφη πυραύλους μπορούν να ταξινομηθούν ως εναέρια παρακολούθηση (μεγάλης, μεσαίας και μικρής κατεύθυνσης), έλεγχος όπλων (ανίχνευση στόχου για τον σκοπό κατεύθυνσης των όπλων), ή καθοδήγηση πυραύλων (ραντάρ που κουβαλιούνται απ' τον πύραυλο για να παρέχουν καθοδήγηση στην ακμή της δράσης της και /ή εσωτερική καθοδήγηση). Αναμφίβολη απόδειξη της σημαντικότητας του ραντάρ για στρατιωτικές εφαρμογές είναι η ύπαρξη του τομέα του "ηλεκτρονικού πολέμου (EW)" που προσπαθεί να υποβιάσει ή να αρνηθεί την αποτελεσματικότητα του ραντάρ. Αυτό το μέρος εξετάζει τις εφαρμογές των στρατιωτικών ραντάρ που είναι βασισμένα στο έδαφος και στο πλοίο. Οι στρατιωτικές εναέριας εφαρμογές συμπεριλαμβάνονται στο μέρος 4 και τα ραντάρ για το διάστημα συζητούνται στο μέρος 5.

Πέρα απ' τον ρόλο του κλειδί στην εναέρια άμυνα, το στρατιωτικό ραντάρ χρησιμοποιείται για παρακολούθηση του πεδίου μάχης και ανίχνευσης, διεισδυτικό εντοπισμό (περιλαμβάνοντας τον εντοπισμό μικρών βαρκών, εντοπισμό και ανίχνευση ολμοβόλων και πυροβολικών οβίδων (βλημάτων), ανεύρεση κατεύθυνσης με λέιζερ ραντάρ, εναέρια αναχαίτιση, εναέρια παρακολούθηση, αντίσταση στα επιθετικά αεροσκάφη, αποφυγή του εδάφους αεροσκαφών, εξερεύνηση (αναγνώριση), άμυνα από διηπειρωτικούς βαλλιστικούς πυραύλους και παρακολούθηση δορυφόρου. Οι μοντέρνες στρατιωτικές λειτουργίες θα έπρεπε να τροποποιηθούν ευρέως, εάν δεν υπήρχαν καθόλου ραντάρ.

Όπως είναι γνωστό, η αποκάλυψη λεπτομερειών του στρατιωτικού ραντάρ είναι συνήθως περιορισμένη απ' τις ανάγκες στρατιωτικής ασφάλειας. Αυτό καταλήγει στον περιορισμό του αριθμού των χαρτιών για τις εφαρμογές του στρατιωτικού ραντάρ που βρίσκονται στην δημοσιευμένη βιβλιογραφία. Όμως, περιορισμοί στην δημοσίευση συμβαίνουν επίσης και σε άλλες εφαρμογές του ραντάρ και όχι για λόγους στρατιωτικής ασφάλειας. Αρκετά συχνά η δημοσιευμένη βιβλιογραφία δεν αντικατοπτρίζει εντελώς την ικανότητα του ραντάρ ακόμα και για μη στρατιωτικές εφαρμογές εξαιτίας της επιθυμίας απ' τη βιομηχανία να

διατηρήσει ένα πλεονέκτημα σε σχέση με τους ανταγωνιστές ή επειδή οι μηχανικοί είναι πολύ απασχολημένοι κάνοντας άλλα πράγματα για να βρουν χρόνο να γράψουν για δημοσίευση (έκδοση).

#### **4.2 Ραντάρ εναέριας παρακολούθησης για άμυνα εναντίον εναέριας επίθεσης**

Τα ραντάρ εναέριας παρακολούθησης παρέχουν πληροφορίες για την εναέρια δραστηριότητα μέσα στην κάλυψή τους, έτσι ώστε να μπορούν να εντοπιστούν απειλητικοί στόχοι, να αναγνωριστούν ως απειλές και να τους γίνει επίθεση από ένα σύστημα άμυνας. Η εναέρια δραστηριότητα συμπεριλαμβάνει αεροσκάφη, ελικόπτερα, οχήματα με πιλότους, πυραύλους και οτιδήποτε άλλο που πετάει και είναι μια πιθανή απειλή. Τα ραντάρ εναέριας παρακολούθησης μπορούν να διαιρεθούν σε τρεις κατηγορίες βασισμένες στην κατεύθυνση τους : “μεγάλη κατεύθυνση”, μεγαλύτερη από περίπου 200nm, “μεσαία κατεύθυνση”, τυπικά μια κατεύθυνση περίπου 100nm, και η “μικρή κατεύθυνση”, συνήθως λιγότερη από 30nm (Αυτοί οι αριθμοί είναι αυστηρών αυθαίρετοι και δεν καθιερώνονται με κανένα τρόπο. Αναφέρονται εδώ μόνο για λόγους εξήγησης ). Τα στρατιωτικά ραντάρ εναέριας παρακολούθησης μερικές φορές ονομάζονται “ραντάρ απόκτησης” όταν παρέχουν πληροφορίες απαραίτητες για τα ραντάρ ελέγχου όπλων για να αποκτήσουν τους στόχους τους. Τα ραντάρ μεγάλης και μεσαίας κατεύθυνσης παρέχουν την γενική εναέρια κατάσταση απ’ την οποία απειλές μπορούν να αναγνωριστούν και να τοποθετηθούν στα ραντάρ ελέγχου όπλων. Τα ραντάρ μικρής κατεύθυνσης είναι συνήθως σχεδιασμένα για να εντοπίζουν τους χαμηλού ύψους στόχους που ξεπροβάλλουν πάνω από τον ορίζοντα σε μικρή κατεύθυνση. Πρέπει να δώσουν στην άμυνα αρκετό χρόνο να αντιδράσει (τα ραντάρ μικρής κατεύθυνσης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για το γέμισμα κενών μικρού ύψους ή για το γέμισμα στην τρύπα στην εναέρια κάλυψη που είναι τυπικά ραντάρ παρακολούθησης μεγάλης κατεύθυνσης ). Όσο μικρότερη είναι η κατεύθυνση του ραντάρ τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος ανάμεσα στις παρατηρήσεις. Όταν ακόμα μεγαλύτερες κατευθύνσεις χρειάζονται για

εναέρια παρακολούθηση απ' ότι μπορούν να αποκτηθούν από ραντάρ μικροκυμάτων, μπορούν να δοθούν απ' το HF ραντάρ πάνω απ' τον ορίζοντα όπως περιγράφεται στο τμήμα 3.5.

#### **4.3 2D ραντάρ**

Ένα ραντάρ που χρησιμοποιεί μια κεραία μ' ένα σχέδιο περιστρεφόμενης ακτίνας για ακτινοβολία (μεγάλο πλάτος ακτίνας σε ανύψωση και μικρό σε αζιμούθιο), για να αποκτήσει την τοποθεσία, τον στόχο, και την κατεύθυνση, ονομάζεται 2D (δύο διαστάσεων) ραντάρ. Ένα παράδειγμα είναι το Raytheon AN-SDS-49, ένα ραντάρ εναέριας παρακολούθησης πάνω στο πλοίο μεγάλης κατεύθυνσης και σε L – ζώνη συχνότητας. Το 2D ραντάρ μεγάλης κατεύθυνσης ήταν στο παρελθόν το κύριο ραντάρ έγκαιρης προειδοποίησης για εναέρια άμυνα. Μπορεί να κατασκευαστεί για να λειτουργεί καλά και μπορεί να πετύχει μεγάλη κατεύθυνση με μέτριο κόστος. Μπορεί να έχει MTI (ντόπλερ) επεξεργασία ενσωματωμένη για καλή απόρριψη θορύβων και ECCM για να επιτρέπει την λειτουργία πέρα από εχθρικές καταμετρήσεις και μπορεί να έχει καλή αξιοπιστία και διαθεσιμότητα. Το 2D ραντάρ, όμως, στερείται της ικανότητας να αποκτάει ύψος του στόχου, εκτός από ειδικές περιπτώσεις. Αλλά το ύψος του στόχου δεν είναι πάντα απαραίτητο σ' ένα ραντάρ παρακολούθησης.

#### **4.4 Σύγκριση του Στρατιωτικού Ραντάρ Εναέριας Παρακολούθησης μεγάλης κατεύθυνσης και του Πολιτικού ATC ραντάρ καθ' οδό**

Το στρατιωτικό ραντάρ εναέριας παρακολούθησης μεγάλης κατεύθυνσης εντοπίζει, εξακριβώνει και ανιχνεύει εναέριους στόχους παρόμοιους, από πολλές απόψεις, με το καθ' οδό ραντάρ για πολιτικό έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας (ATC) που περιγράφεται στο Μέρος 2. Υπάρχουν σημαντικές διαφορές, όμως, ανάμεσα στα πολιτικά και στρατιωτικά ραντάρ εναέριας παρακολούθησης. Το κύριο χαρακτηριστικό ενός στρατιωτικού ραντάρ που το διαφοροποιεί απ' το αντίστοιχο πολιτικό είναι το ότι το στρατιωτικό ραντάρ πρέπει να είναι

ικανό να λειτουργεί σε εχθρικό περιβάλλον. Είναι πιθανόν να πυροβοληθεί, μπορεί να του επιτεθούν καθοδηγούμενοι πύραυλοι και μπορεί να περιμένει ηλεκτρονικές καταμετρήσεις (ECM) που περιλαμβάνουν εσωτερική εμπλοκή, επαναλαμβανόμενη εμπλοκή, μεταλλικά φύλλα για παραπλάνηση εχθρικού ραντάρ, παγίδες και απάτη. Η εκτέλεση του ραντάρ μπορεί να μειωθεί από εχθρικές ενέργειες αλλά ένα χαρακτηριστικό ενός καλού συστήματος είναι το ότι το σύστημα εναέριας άμυνας, του οποίου το ραντάρ είναι ένα μέρος, μπορεί να πετύχει την αποστολή του πέρα από επιχειρούμενη πτώση (φθορά). Αυτή είναι η πρόκληση του στρατιωτικού σχεδίου ραντάρ. Είναι μια πρόκληση που μπορεί να συναντηθεί επιτυχώς αν επιτραπεί να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα μέσα.

Αεροσκάφη που ανιχνεύονται από πολιτικά ραντάρ ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας γενικά μπορεί να αναμένεται να ακολουθήσουν ευθείας γραμμής τροχιές σε επίπεδα μάχης με σταθερό ύψος και να μην δοκιμάσουν γρήγορα αλλαγές στην πορεία, ταχύτητα ή ύψος. Τα στρατιωτικά αεροσκάφη επίθεσης και οι καθοδηγούμενοι πύραυλοι απ' την άλλη μεριά, δεν πετάνε απαραίτητα εύκολα σε προβλεπόμενες τροχιές. Μπορούν να είναι σε υψηλότερα ή χαμηλότερα ύψη απ' ότι είναι συνήθως για πολιτικά αεροσκάφη. Μπορούν να πετάνε με υπερηχητικές ταχύτητες και με ελιγμούς με υψηλές  $-g$  επιταχύνσεις. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλους αριθμούς για να προκαλέσουν κορεσμό των αμυνών και συχνά συνοδεύονται από ηλεκτρονικές καταμετρήσεις για να αυξήσουν την πιθανότητα επιτυχημένης επίθεσης. Πέρα απ' το να αντιμετωπίσει ένα εχθρικό περιβάλλον, το στρατιωτικό ραντάρ πρέπει να είναι ικανό να αντιμετωπίσει το φυσικό περιβάλλον του εδάφους, της θάλασσας και του καιρού.

Υπάρχουν άλλα χαρακτηριστικά στρατιωτικού ραντάρ που διαφέρουν από εκείνα παρόμοιων πολιτικών συστημάτων. Τα πολιτικά ραντάρ ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας πρέπει να έχουν υψηλή " διαθεσιμότητα". Αυτό σημαίνει ότι δεν πρέπει να βρίσκονται εκτός λειτουργίας για πολύ χρόνο. (Απλά ορισμένη, η "διαθεσιμότητα", είναι το τμήμα του χρόνου που το ραντάρ είναι πραγματικά ικανό να εκτελέσει την αποστολή του ). Όπως

αναφέρθηκε στο τμήμα 2.4, μερικά πολιτικά ATC ραντάρ παρακολούθησης απαιτούνται να λειτουργούν καλύτερα από 99,7% του χρόνου. Αυτή είναι μια ασυνήθιστα υψηλή διαθεσιμότητα για ραντάρ αλλά μπορεί να κατορθωθεί ή ακόμα και να ξεπεραστεί. Σίγουρα θα ήταν επιθυμητό για στρατιωτικά ραντάρ να έχουν διαθεσιμότητες τόσο υψηλές όσο εκείνες των πολιτικών ATC ραντάρ. Όμως, λειτουργούν σε διαφορετικές περιστάσεις. Το πολιτικό ραντάρ πετυχαίνει την υψηλή διαθεσιμότητά του μέσα από (1) τη χρήση πλεοναστικών συστημάτων με εκτεταμένη λανθασμένη αναγνώριση και μόνωση,(2) μέσα από τη χρησιμοποίηση πεπειραμένης και δικαιολογημένης επιδιόρθωσης και (3) μέσα απ' την ικανότητα να απαιτεί εφεδρικά μέρη που χρειάζονται χωρίς μεγάλες καθυστερήσεις. Αυτές οι συνθήκες ίσως να μην συναντιούνται πάντα απ' τον χρήστη του στρατιωτικού ραντάρ, ειδικά εν καιρώ ειρήνης. Όπως την τοπική πυροσβεστική εταιρία, το στρατιωτικό ραντάρ δεν χρειάζεται να λειτουργεί συνεχόμενα σε ύψιστη εκτέλεση αλλά πρέπει να είναι προετοιμασμένο να μπαίνει σε λειτουργία όταν επικαλείται και να διατηρεί την εκτέλεσή του κατά τη διάρκεια του χρόνου που χρειάζεται. Το πολιτικό ATC ραντάρ απαιτείται να είναι πάντα σε πλήρη εκτέλεση.

Άλλη μια διαφορά ανάμεσα σε πολιτικά και στρατιωτικά ραντάρ εναέριας παρακολούθησης είναι οι απαιτούμενοι ρυθμοί περιστροφής της κεραίας. Πολλά πολιτικά ATC ραντάρ μεγάλης κατεύθυνσης έχουν ένα ρυθμό περιστροφής την 5rpm. Αυτό είναι συνήθως πολύ χαμηλό για στρατιωτικά ραντάρ. Οι στρατιωτικοί στόχοι είναι ικανοί υψηλού-g ελιγμών, κάτι που δεν ανέχεται σε πολιτικά αεροσκάφη. Οι ανιχνεύσεις ελίσσόμενων στόχων πρέπει να είναι σύγχρονες πιο συχνά απ' ότι εκείνων των στόχων που πετάν φυσιολογικά, σε πορείες ευθείας γραμμής.

Τα πολιτικά ATC ραντάρ μεγάλης κατεύθυνσης είναι τοποθετημένα απ' άκρη σε άκρη στις Ηνωμένες Πολιτείες για να παρέχουν σχεδόν συνεχή κάλυψη. Αν ένα ραντάρ είναι ανεφάρμοστο ή η κατεύθυνσή του είναι μειωμένη, μπορεί να υπάρξει απώλεια κάλυψης και συνέχεια (διάρκεια) ανίχνευσης –το οποίο δεν είναι επιθυμητό για έλεγχο εναέριας



κυκλοφορίας. Γι' αυτό είναι αρκετά σημαντικό να διατηρεί την ικανότητα πλήρης κατεύθυνσης την ATC ραντάρ. Είναι, φυσικά, επιθυμητό να διατηρείται η πλήρης κατεύθυνση των στρατιωτικών ραντάρ αλλά υπό την παρουσία εχθρικών καταμετρήσεων είναι σπάνια δυνατό να συμβεί. Η κατεύθυνση θα μειωθεί και η πραγματικότητα αυτού του γεγονότος πρέπει να αναγνωριστεί. Η μειωμένη κατεύθυνση μπορεί να κανονιστεί αν θεωρηθεί (λογαριασθεί) στο γενικό σχέδιο συστήματος εναέριας άμυνας. Στην εναέρια άμυνα, αυτός που επιτίθεται είναι συνήθως κοντά στον αμυνόμενο και γι' αυτό η κατεύθυνση μειώνεται με τον χρόνο. Αυτό μπορεί να είναι ένα πλεονέκτημα στην άμυνα (αν και ίσως προκαλέσει λίγη νευρική απ' τη μεριά του αμυνόμενου). Το να επιτίθεται σε εναέριους στόχους στην μεγαλύτερη πιθανή κατεύθυνση ίσως να θεωρηθεί μια επιθυμητή επιδίωξη αλλά δεν είναι απαραίτητα η άριστη προσέγγιση αν θεωρήσεις ότι υπάρχουν πάντα ταραχές στα μέσα (διάστημα, βάρος και κόστος ) που είναι διαθέσιμα στην άμυνα. Καθώς η κατεύθυνση μειώνεται ο αμυνόμενος μπορεί να χρησιμοποιήσει έναν μεγάλο αριθμό μικρών και μικρής κατεύθυνσης πυραύλων παρά λίγους, ακριβούς πυραύλους μεγάλης κατεύθυνσης. Αυτή είναι μια συνέπεια της χαμένης απόστασης που είναι μικρότερη (καλύτερα) σε μικρή κατεύθυνση απ' ότι σε μεγάλη κατεύθυνση. Οι ηλεκτρονικοί jammers που απομακρύνονται σε μεγάλη κατεύθυνση θα έχουν μικρότερη επίδραση στις μικρότερες δεσμευμένες (εμπλεκόμενες) κατευθύνσεις. Γι' αυτό είναι πιθανό να υπάρχει μια άριστη κατεύθυνση δέσμευσης (εμπλοκής) και το άριστο δεν είναι απαραίτητα η μέγιστη κατεύθυνση στην οποία είναι πιθανή μια αναχαίτιση. Σε μερικές στρατιωτικές περιπτώσεις ίσως να υπάρξει μικρή εκλογή όσον αφορά την κατεύθυνση εμπλοκής αν αυτός που επιτίθεται πλησιάζει με υψηλή ταχύτητα και χαμηλό ύψος έτσι ώστε να μην τον δουν μέχρι να είναι μικρή η κατεύθυνση ( εξαιτίας περιορισμών που προκαλούνται απ' τη σφαιρικότητα της γης ή την κάλυψη των λόφων ).

Παρά τις πολλές διαφορές ανάμεσα σε πολιτικές και στρατιωτικές εφαρμογές εναέριας παρακολούθησης, ένα μονό ραντάρ πολλές φορές χρησιμοποιείται για δυο λειτουργίες απ'

τη στιγμή που πιστεύεται να είναι πιο οικονομικό από δύο ξεχωριστά ραντάρ. Αυτό δεν συνίσταται πάντα, απ' τη στιγμή που ίσως να πρέπει να γίνουν συμβιβασμοί που μπορούν να υποβιβάσουν (μειώσουν) την αποτελεσματικότητα και των πολιτικών και των στρατιωτικών εφαρμογών. Όταν είναι δυνατό, διαφορετικά ραντάρ θα έπρεπε να χρησιμοποιούνται τα οποία κατασκευάζονται για κάθε εφαρμογή. Αν και ίσως είναι φανερό, ίσως να αξίζει να σημειωθεί ότι αν μόνο ένα είδος ραντάρ είναι να χρησιμοποιηθεί για να εκπληρώσει δύο λειτουργίες, το στρατιωτικό ραντάρ θα έπρεπε να διαλεχτεί απ' τη στιγμή που μεγαλύτερες απαιτήσεις τοποθετούνται πάνω σ' αυτό απ' ότι σ' ένα πολιτικό.

#### **4.5 Ο τρίτος ισόβαθμος στόχος – Ύψος**

Υπάρχουν πολλές εφαρμογές όπου η τοποθεσία του στόχου χρειάζεται να γνωρίζεται μόνο σε αξιμούθιο και κατεύθυνση. Όταν ο τρίτος ισόβαθμος στόχος -το ύψος ή η ανύψωση γωνίας- χρειάζεται, ένα πρόσθετο ραντάρ (ο ευρέτης ύψους με κεκλιμένη ακτίνα ) ή ένα πολύπλοκο μονό ραντάρ (3D ραντάρ) μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Μια απ' τις αρχικές ανάγκες για την μέτρηση του ύψους ήταν για κατεύθυνση (άνυσμα) μαχητικών αεροσκαφών για να αναχαιτίσουν εχθρικά βομβαρδιστικά αεροσκάφη που επιτίθενται. Αυτή η ανάγκη αφύπνισε στο παρελθόν όταν τα ραντάρ για αεροσκάφη και τα όπλα ήταν σχετικά μικρής κατεύθυνσης έτσι ώστε το μαχητικό αεροσκάφος έπρεπε να είναι ακριβώς στο ίδιο ύψος όπως το βομβαρδιστικό αεροσκάφος ώστε να το δεσμεύσει επιτυχώς. (Ένας τυπικός προσδιορισμός της ακρίβειας του ύψους στο παρελθόν ίσως να ήταν  $\pm 500\text{ft}$  σε μια κατεύθυνση των 50nm. Αυτό δεν ήταν πάντα αποκτημένο, ειδικά σε χαμηλό ύψος όπου η διάδοση (πολλαπλασιασμός) της πολύ-τροχιάς εξαιτίας της αντανάκλασης απ' την επιφάνεια της γης προκαλούσε μη ακρίβεια). Με τα χρόνια, η κατεύθυνση και των εναέριων ραντάρ και των όπλων αυξήθηκε σημαντικά, όπως έγινε με την εκτέλεση των αεροσκαφών, έτσι ώστε η ακρίβεια του ύψους του στόχου μπορούσε να "χαλαρωθεί" καθώς συγκρινόταν με προηγούμενες απαιτήσεις.

Η γνώση του ύψους του στόχου μπορεί να είναι χρήσιμη για συστήματα πυραύλων εδάφους-αέρος (SAM). Σε μερικές περιπτώσεις, όμως, τα ραντάρ ελέγχου όπλων του SAM συστήματος μπορούν να παρέχουν την μέτρηση του ύψους. Αν το ύψος του στόχου είναι διαθέσιμο από ένα 3D ραντάρ, ο χρόνος που απαιτείται για να αποκτήσει ένα στόχο ίσως να είναι μειωμένος, αλλά αν είναι καλύτερα να παρέχεις το ύψος του στόχου μ' ένα 3D ραντάρ ή να αποκτάς το ύψος μετά την απόκτηση στόχου απ' το ραντάρ ελέγχου όπλων βασίζεται στη συγκεκριμένη φύση της εφαρμογής.

Το ύψος είναι σημαντικό για τον προσδιορισμό της φύσης μιας εναέριας επίθεσης και για τον καθορισμό των καλύτερων τακτικών και μέσων για να χρησιμοποιηθούν για καταπολέμηση της επίθεσης. Για παράδειγμα, ένας υπερηχητικός εναέριος στόχος μεγάλου ύψους (πάνω από 20Km) είναι πιθανόν να είναι ένας πύραυλος με εξασθένηση αυτοέλεγχου παρά ένα αεροσκάφος με αυτοέλεγχο. Οι διαφορετικές τακτικές άμυνας ίσως χρησιμοποιηθούν εναντίον ενός πυραύλου με μεγάλο ύψος απ' ότι εναντίον ενός αεροσκάφους με αυτοέλεγχο μεσαίου ύψους. Ομοίως, μια διαφορετική ανταπόκριση άμυνας ίσως να διαλεχτεί αν η μέτρηση του ύψους δείχνει ένα στόχο σε πολύ χαμηλό ύψος.

#### **4.6 Ραντάρ ανεύρεσης ύψους**

Ο ευρέτης ύψους χρησιμοποιεί ένα σχέδιο (μοντέλο) κεραίας με περιστρεφόμενη ακτίνα μ' ένα μικρό φάρδος ακτίνας σε ανύψωση και ένα μεγάλο φάρδος ακτίνας σε αζημούθιο. Μετράει την ανυψωμένη γωνία του στόχου, απ' το οποίο μια μέτρηση του ύψους μπορεί να αποκτηθεί. Υπάρχουν κάμποσα διαφορετικά είδη ευρετών ύψους. Ο πιο συνηθισμένος είναι ο "ευρέτης ύψους με κεκλιμένη ακτίνα", που ονομάζεται έτσι εξαιτίας της χαρακτηριστικής πάνω και κάτω κεκλιμένης κίνησης της μηχανικά κινούμενης κεραίας του καθώς αυτό εκτελεί την μέτρηση της ανυψωμένης γωνίας του. Η απόλυτη ακρίβεια ενός ευρέτη ύψους με κεκλιμένη ακτίνα είναι συνήθως πολύ καλύτερη απ' ότι μπορεί να αποκτηθεί με τα

περισσότερα 3D ραντάρ. Η ακρίβεια μπορεί να είναι  $\pm 1500\text{ft}$  σε  $150\text{nm}$ i, με αντιστοίχως καλύτερη ακρίβεια σε μικρότερη κατεύθυνση ( $\pm 500\text{ft}$  σε  $50\text{nm}$ i). Αυτό προϋποθέτει ένα σύστημα σε S-ζώνη συχνότητας με μια  $0.6^\circ$  ανύψωση του πλάτους της ακτίνας και το ότι δεν υπάρχει σημαντική διάδοση (πολλαπλασιασμός) πολύ-τροχιάς.

Ο ευρέτης ύψους χρησιμοποιείται σε σύνδεση μ' ένα "τυπικό" 2D ραντάρ εναέριας παρακολούθησης που ορίζει την κατεύθυνση του στόχου και το αζημούθιο στον ευρέτη ύψους. Ο ευρέτης ύψους μηχανικά κάνει μεταβολή προς την κατεύθυνση του στόχου και ψάχνει σε ανύψωση να βρει τον στόχο και μετράει την ανυψωμένη γωνία του. (Θα ήταν δυνατόν να αναστρέψεις μια κεραία που βρίσκει το ύψος κατά  $180^\circ$  σε αζημούθιο και να είναι στην ανύψωση του στόχου σε περίπου 2 δευτερόλεπτα). Όταν ο ορισμός του στόχου στον ευρέτη ύψους είναι κάτω από αυτόματο έλεγχο του κομπιούτερ απ' ότι κάτω από χειροκίνητο έλεγχο από χειριστές, η μέτρηση σχεδόν 22 υψών στόχου ανά λεπτό μπορεί να γίνει με ένα σύστημα σε C-ζώνη συχνότητας έχοντας μια κεραία 14ft από 4.25ft. Αυτό είναι αρκετά καλό αλλά είναι λιγότερο απ' το ρυθμό των δεδομένων στοιχείων που μπορούν να αποκτηθούν για το αζημούθιο και για την μέτρηση κατεύθυνσης. Δεν είναι απαραίτητο, όμως, να έχεις τον ίδιο ρυθμό δεδομένων στοιχείων για την μέτρηση του ύψους όπως για άλλες μετρήσεις της τοποθεσίας του στόχου απ' τη στιγμή που το ύψος ενός αεροσκάφους (συνήθως) δεν αλλάζει γρήγορα.

Η χρήση ενός ευρέτη ύψους σημαίνει ότι δυο ξεχωριστά ραντάρ απαιτούνται για πληροφορίες τριών διαστάσεων σε εναέριους στόχους. Ο ευρέτης ύψους είναι συνήθως, αλλά όχι πάντα, σε S-ζώνη συχνότητας (10cm μήκους κύματος) και το 2D ραντάρ παρακολούθησης σε L-ζώνη συχνότητας (23cm). Όμως, υπάρχει ένα πλεονέκτημα στο να έχεις αυτά τα δυο ραντάρ να λειτουργούν σε διαφορετικές ζώνες συχνότητας όταν συναντιούνται ηλεκτρονικές καταμετρήσεις. Και οι δυο ζώνες συχνότητας πρέπει να συμπιεστούν για να αρνηθούν εντελώς τις πληροφορίες κατεύθυνσης.

#### **4.7 3D Ραντάρ**

Ένα ραντάρ εναέριας παρακολούθησης που έχει τη βάση του στο έδαφος ή σε πλοίο διαμορφωμένο για να αποκτάει ανυψωμένη γωνία όπως επίσης και γωνία του αζιμούθιου και κατεύθυνση ονομάζεται ένα 3D ραντάρ. Το 3D ραντάρ περιστρέφεται μηχανικά στο οριζόντιο επίπεδο για να καλύψει το μέγεθος του ενδιαφέροντος και για να αποκτήσει το αζιμούθιο του στόχου. Η ανυψωμένη γωνία βρίσκεται χρησιμοποιώντας μια τεχνική σε θέση φάσεως, απ' την οποία υπάρχουν δύο εναλλακτικές. Η μια εναλλακτική είναι να εξερευνήσεις μια ή δυο ακτίνες σε ανύψωση με είτε ηλεκτρονικούς μεταθετές φάσεως ή με εξερεύνηση συχνότητας καθώς η κεραία περιστρέφεται μηχανικά στο αζιμούθιο. Η άλλη εναλλακτική είναι να χρησιμοποιήσεις μια κεραία μ' έναν αριθμό συνεχόμενων σταθερών (στερεωμένων) λαμβανομένων ακτινών σε ανύψωση, με μια φαρδιά μεταδιδόμενη ακτίνα καλύπτοντας το ίδιο μέγεθος όπως οι πολλαπλές σταθερές (στερεωμένες) λαμβανόμενες ακτίνες. Πολλά στρατιωτικά 3D ραντάρ ήταν σε S-ζώνη συχνότητας αλλά βρίσκονται επίσης και σε L-ζώνη συχνότητας.

Ένα παράδειγμα ενός μονού 3D ραντάρ με εξερευνούμενη ακτίνα είναι το GE592 σε L-ζώνη συχνότητας που φτιάχτηκε απ' τη General Electric Co. Είναι ένα παράγωγο του AN/TPS-59, που αναπτύχθηκε για την Marine Corps των Ηνωμένων Πολιτειών. Το AN/TPS-59 ήταν το πρώτο ραντάρ υψηλής δύναμης που χρησιμοποίησε έναν μεταδότη σε εντελώς στερεή κατάσταση. Το AN/FPS-117 ελαχίστως παρακολουθούμενο ραντάρ για την πολεμική αεροπορία των Ηνωμένων Πολιτειών είναι παρόμοιο. Το GE592 περιγράφεται στο ανατυπωμένο χαρτί 3.1 : "Το GE592 ραντάρ σε στερεή κατάσταση", απ' τον J. J. Gostin. Αυτά τα ραντάρ έχουν ένα τρανζίστορ μεταδότη που είναι τοποθετημένος πίσω από κάθε μία απ' τις σειρές (ή γραμμές) της περιστρεφόμενης κεραίας σε επίπεδη γραμμή. Η δύναμη "συνδυάζεται στο διάστημα". Η ίδια αρχή για την στήριξη (μοντάρισμα) των μεταδοτών στις σειρές (γραμμές) της κεραίας χρησιμοποιήθηκαν στο Marconi Martello S723 ραντάρ που χρησιμοποιεί έξι ή οχτώ σταθερές (στερεωμένες) ακτίνες σε ανύψωση για να αποκτήσει 3D πληροφορίες. Είναι επίσης δυνατό να

ενσωματώσεις μεταδότες στερεής κατάστασης σε ραντάρ εναέριας παρακολούθησης χωρίς να στηρίζεις τον μεταδότη στην κεραία. Οι εμβάτες ίσως να συνδυαστούν με περίμετρο μικρής απώλειας μικροκυμάτων και να συνδεθούν στην κεραία με τον συνηθισμένο τρόπο με τη βοήθεια μιας μονής γραμμής μετάδοσης.

Ένα παράδειγμα ενός 3D ραντάρ με σταθερές (στερεωμένες) ακτίνες ανύψωσης δίνεται στο ανατυπωμένο χαρτί 3.2 : "Ένα υψηλής εκτέλεσης επιδέξιο 3D ραντάρ για το 1980", απ' τον K. F. Horenkamp και τον T. E. Keast. Το χαρτί περιγράφει το TPS-70, ένα ραντάρ που γεμίζει τα ανοίγματα σε S-ζώνη συχνότητας που έγινε απ' το Westing house, βασιζόμενο στο δημοφιλές AN/TPS-43 3D ραντάρ μεγάλης κατεύθυνσης. (Οι συγγραφείς του χαρτιού περιγράφουν το ραντάρ σαν παρέχει "τεσσάρων διαστάσεων, ή 4D" πληροφορίες : περιλαμβάνουν ταχύτητα σύμφωνα με την κατεύθυνση, αζημούθιο και ανύψωση. Οι περισσότεροι, όμως, ακόμα θα ονόμαζαν αυτού του είδους το ραντάρ 3D). Το TPS-70 χρησιμοποιεί έξι ταυτόχρονες ακτίνες για να καλύψει 20° σε ανύψωση.

Το 3D ραντάρ αρχικά χρησιμοποιήθηκε για στρατιωτικές εφαρμογές. Δεν έχει δει σχεδόν καθόλου πολιτική εφαρμογή. Ένας λόγος γι' αυτό είναι ότι η ακρίβεια του ύψους που είναι απαραίτητη για πολιτικό έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας πρέπει να είναι πολύ καλύτερη από εκείνη η οποία είναι δεχτή για στρατιωτικές εφαρμογές. Η ακρίβεια που απαιτείται για το πολιτικό ATC είναι αρκετά δύσκολο να κατορθωθεί με ραντάρ. Τα ATC συστήματα, γι' αυτό, βασίζονται στην απόκτηση ύψους ευθέως απ' το υψόμετρο του ίδιου του αεροσκάφους μέσω του μηνύματος του μεταδότη του ATCRBS, όπως αναφέρθηκε στον τομέα 2.8.

#### **4.8 Περιορισμοί στο 3D ραντάρ**

Υπάρχουν κάμποσοι περιορισμοί που συνοδεύουν τα 3D ραντάρ με παρόμοια χαρακτηριστικά εκτέλεσης. (Αν και είναι δύσκολο να συγκρίνεις τα έξοδα των ραντάρ που αναπτύσσονται σε διαφορετικούς χρόνους και για διαφορετικούς πελάτες, φαίνεται ότι τα

3D ραντάρ ήταν από 4 ως 10 φορές πιο ακριβά απ' ό τι ένα συγκρινόμενο 2D ραντάρ). Το 3D ραντάρ είναι πιο δημοφιλές απ' τον συνδυασμό του ευρέτη ύψους και του 2D ραντάρ παρακολούθησης αν και το μονό 3D ραντάρ ίσως κοστίζει περισσότερο απ' ό τι τα δυο ραντάρ συνδυασμένα. (Δεν είναι πάντα αλήθεια ό τι ένα ραντάρ κοστίζει λιγότερο από δύο ξεχωριστά ραντάρ που κάνουν την ίδια εργασία ). Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ό τι πολλά 3D ραντάρ παρέχουν μια μέτρηση του ύψους του στόχου που είναι λιγότερο ακριβής από εκείνη η οποία μπορεί να αποκτηθεί με τον ευρέτη ύψους. Επίσης, τα 3D ραντάρ εξερευνούμενης ακτίνας αποκτούν λιγότερους παλμούς καθώς εξερευνούν από ένα στόχο, έτσι ώστε δεν μπορούν να αποκτήσουν τόσο καλή (MTI) (ντόπλερ) επεξεργασία όπως μπορούν τα 2D ραντάρ τα οποία λαμβάνουν έναν μεγάλο αριθμό παλμών που επιστρέφουν απ' τον στόχο.

Συγκρινόμενο με την συνδυασμένη χρήση ενός 2D ραντάρ εναέριας παρακολούθησης και ενός ραντάρ που βρίσκει το ύψος, το 3D ραντάρ κοστίζει περισσότερο και είναι πιο περίπλοκο, λιγότερο αξιόπιστο, λιγότερο ικανό να χειρίζεται ηλεκτρονικές καταμετρήσεις και συχνά έχει φτωχότερο MTI. Όμως, για κάποιο λόγο η μέτρηση του ύψους του στόχου μ' ένα μόνο 3D ραντάρ φαίνεται να είναι επιθυμητή από πολλούς πελάτες επιδέξιων ραντάρ.

#### **4.9 Ράχη με ράχη κεραίες**

Μια 2D και μια 3D κεραία μπορεί να λειτουργήσει ράχη με ράχη στην ίδια βάση της περιστρεφόμενης κεραίας για να αποκτήσει τα ιδιαίτερα πλεονεκτήματα και των δύο ειδών του ραντάρ. Όταν ένας μονός μεταδότης /δέκτης κατευθύνεται ανάμεσα στις δυο κεραίες, η 2D κεραία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παρακολούθηση και η 3D κεραία για να αποκτήσει το ύψος του στόχου όπως χρειάζεται. Σε μερικές περιπτώσεις οι ράχη με ράχη 2D και 3D κεραίες, η κάθε μια έχει τον δικό της μεταδότη /δέκτη να λειτουργεί σε διαφορετικές συχνότητες.

#### **4.10 Επεξεργασία σήματος**

Τα στρατιωτικά ραντάρ που λειτουργούν σ' ένα εχθρικό περιβάλλον γενικά απαιτούν περισσότερη επεξεργασία σήματος απ' ότι τα παρόμοια πολιτικά ραντάρ. Το ανατυπωμένο χαρτί 3.3 "Ραντάρ παρακολούθησης: Θέση της τέχνης, έρευνα και προοπτικές", απ' τον A. Farina και τον G. Galati, περιγράφει σύντομα πολλές απ' τις τεχνικές που πρέπει να ενσωματωθούν στα στρατιωτικά ραντάρ παρακολούθησης. Συμπεριλαμβανόμενες είναι συζητήσεις του ECCM, του LPI, του αντί-ARM, της προσαρμοστικότητας και άλλων θεμάτων. Μια ρεαλιστική προσέγγιση στην ενσωμάτωση των ηλεκτρονικών καταμετρήσεων σε στρατιωτικά ραντάρ εξετάζεται στο ανατυπωμένο χαρτί 3.4 : "ECCM απ' την άποψη του σχεδιαστή του ραντάρ", απ' τον M. A. Johnson και τον D. C. Stoner.

#### **4.11 Ραντάρ ελέγχου όπλων**

Ραντάρ ανίχνευσης μονού στόχου : Η λειτουργία ενός ραντάρ ελέγχου όπλων σ' ένα σύστημα εναέριας άμυνας είναι να παρέχει την τοποθεσία, την ταχύτητα και την κατεύθυνση απειλητικών στόχων και να προβλέπει τις μελλοντικές θέσεις τους έτσι ώστε οι πύραυλοι ή άλλα όπλα, μπορούν να εκपुरσοκροτήσουν για να τα αναχαιτίσουν. Τα περισσότερα ραντάρ για τον έλεγχο των όπλων είναι μηχανικώς εξερευνημένα ραντάρ που ανιχνεύουν ένα μονό στόχο. Το ανατυπωμένο χαρτί 3.5 : "Το HR-76 ραντάρ ελέγχου πυροβολισμού", απ' τον L. E. Kitchens, περιγράφει ένα μικρό ραντάρ ελέγχου πυροβολισμού για εφαρμογή πάνω σε πλοίο. (Ο όρος "ραντάρ ελέγχου πυροβολισμού", συνήθως υπονοεί ένα ραντάρ για τον έλεγχο των όπλων παρά των πυραύλων). Ο μηχανικός ανιχνευτής μονού στόχου ήταν επίσης το είδος του ραντάρ ελέγχου όπλων που χρησιμοποιήθηκε με τα πρώτης-παραγωγής συστήματα εδάφους-αέρος πυραύλων, όπως τα Nike και Hawk συστήματα εναέριας άμυνας του Στρατού και τα 3Ts του Ναυτικού (Tarter, Terrier και Talos).



Το ραντάρ παίζει ένα σημαντικό ρόλο στα συστήματα αυτοάμυνας μικρής κατεύθυνσης που είναι βασισμένα στο Gatling όπλο υψηλού ρυθμού εκपुरσοκρότησης (περιστρεφόμενο κανόνι (τηλεβόλο) πολλαπλής κάνης ). Στη General Dynamics Corporation Phalanx, ένα παλμικό (ντόπλερ) ραντάρ υψηλού – prf σε Ku-ζώνη συχνότητας χρησιμοποιείται για να εντοπίζει στόχους μεγάλης ταχύτητας που εκθέτονται σε θόρυβο. Ξεχωριστές κεραιές έρευνας και ανίχνευσης μοιράζονται ένα κοινό μεταδότη. Αντίθετα με πολλά άλλα συστήματα ελέγχου κανονιοβολισμού, το Phalanx ραντάρ χρησιμοποιεί μια ηλεκτρονική τεχνική παρατήρησης μικρής στροφής (καμπύλης). Και οι εισερχόμενοι πύραυλοι και τα εξερχόμενα βλήματα στην περιοχή του πυραύλου ανιχνεύονται απ' το ίδιο ραντάρ για να παρέχουν μια μικρής στροφής (καμπύλης) διόρθωση στη βοήθεια του όπλου. Η χαμένη απόσταση ανάμεσα στο κέντρο βάρους του στόχου και των βλημάτων μετρείται και το λάθος διορθώνεται απ' το κομπιούτερ ελέγχου πυροβολισμού.

Τα ραντάρ που ανιχνεύουν μηχανικά το στόχο είναι αρκετά ικανοποιητικά για πολλές εφαρμογές και έχουν χρησιμοποιηθεί για πολλά χρόνια. Είναι πιθανό ότι θα συνεχίσουν να έχουν ένα σημαντικό ρόλο στα συστήματα εναέριας άμυνας στο μέλλον.

#### **4.12 Ραντάρ ελέγχου όπλων σε θέση φάσεως**

Το ραντάρ σε θέση φάσεων ενδιαφέρει τις στρατιωτικές εφαρμογές του ραντάρ όπου το ειδικό χαρακτηριστικό του της ηλεκτρονικής ευκίνητης διεύθυνσης της ακτίνας μπορεί να αξιοποιηθεί για να παρέχει υψηλή ισχύ ανιχνεύοντας πολλούς στόχους ταυτόχρονα. Μπορεί επίσης να αποκτήσει πληροφορίες για τον στόχο υψηλού αριθμού δεδομένων στοιχείων που χρειάζονται για την μέσης κατεύθυνσης καθοδήγηση των αναχαιτιστικών πυραύλων. Αν και θεωρείται ένα μονό ραντάρ, ένα ραντάρ σε θέση φάσεως που είναι σχεδιασμένο για να ανιχνεύει ταυτόχρονα πολλούς στόχους είναι πολύ μεγαλύτερο και πιο περίπλοκο από έναν ανιχνευτή μονού στόχου.

Το Patriot ραντάρ του Στρατού των Ηνωμένων Πολιτειών που φτιάχτηκε απ' το Raytheon περιγράφεται στο ανατυπωμένο χαρτί 3.6 : "Το Patriot ραντάρ σε τακτική (επιδέξια) αεράμυνα", απ' τον D. R. Carey και W. Evans. Το Patriot είναι ένα κινητό σύστημα σε C-ζώνη συχνότητας με μια κεραία με φακό εναέριου αγωγού τροφοδότησης περιέχοντας ακριβώς 5000 στοιχεία κανονισμένα σ' ένα κυκλικό άνοιγμα περίπου 8ft σε διάμετρο. Όλες οι απαραίτητες λειτουργίες για αεράμυνα εκτελούνται απ' τη μονή θέση φάσεως. Αυτό περιλαμβάνει έρευνα για απειλητικούς στόχους, καθορισμό των ανιχνεύσεων τους, ανίχνευση αναχαιτιστικών πυραύλων, επικοινωνία με τον αναχαιτιστικό πύραυλο κατά τη διάρκεια της μέσης κατεύθυνσης καθοδήγησης και παροχή τελικής ημιεπιταχυνσημένης καθοδήγησης χρησιμοποιώντας την τεχνική που είναι γνωστή ως "ανίχνευση μέσω πυραύλου"(TVM), στην οποία ο πύραυλος αναμεταδίδει πίσω στο ραντάρ το σήμα της ανίχνευσης που λαμβάνει απ' τον στόχο.

Το Aegis ραντάρ σε θέση φάσεως του Ναυτικού των Ηνωμένων Πολιτειών περιγράφεται στο ανατυπωμένο χαρτί 3.7 : "AN/SPY-1 σχεδιασμένες πρόοδοι", απ' τον R. L. Britton, T. W. Kimbrell, C. E. Caldwell και G. C. Rose. Το Aegis AN/SPY-1 που φτιάχτηκε απ' το RCA είναι ένα ραντάρ τεσσάρων όψεων και σε C-ζώνη συχνότητας με κάθε όψη να περιέχει περίπου 4000 στοιχεία ακτινοβολίας. Η διάμετρος της κεραίας είναι 12.5ft. Το ημιεπιταχυνσημένο τελικό homing χρησιμοποιείται με ξεχωριστούς φωτοδότες του στόχου σε X-ζώνη συχνότητας που είναι "υποχείρια" της θέσης του στόχου που προβλέπεται από πληροφορίες που παρέχονται απ' το ραντάρ σε θέση φάσεως.

#### **4.13 Πολύ-λειτουργικό ραντάρ αεράμυνας**

Τα ραντάρ σε θέση φάσεως μερικές φορές λέγεται να είναι "πολύ-λειτουργικά" όταν παρέχουν περισσότερες από μια λειτουργίες του ραντάρ σε μια βάση μοιρασμένης ώρας μ' ένα "μόνο" ραντάρ. Σε εφαρμογές αεράμυνας, οι λειτουργίες μπορούν να περιλαμβάνουν παρακολούθηση, ανίχνευση στόχου και καθοδήγηση πυραύλου. Υπάρχουν μερικές

εφαρμογές όπου οι πολύ-λειτουργικές θέσεις φάσεων είναι κατάλληλες. Για παράδειγμα, το UHF AN/FPS-85 ραντάρ παρακολούθησης δορυφόρου, που συζητιέται στον τομέα 3.6, μπορεί να εκτελέσει αποτελεσματικά και παρακολούθηση στόχου και ανίχνευση στόχου με το ίδιο ραντάρ. Επίσης, το ραντάρ σε θέση φάσεως για το B-1B βομβαρδιστικό αεροσκάφος, που αναφέρθηκε στον τομέα 4.4 εκτελεί τις πολλαπλές λειτουργίες αποφυγής εδάφους και ακολουθίας εδάφους,(ντόπλερ) μετρήσεις ταχύτητας, χαρτογράφηση εδάφους υψηλής ανάλυσης, τοποθεσίας με φωτεινό σήμα και χαρτογράφησης καιρού. Και στο B-1B και στο AN/FPS-85 είδος εφαρμογών η πολύ-λειτουργία είναι πρακτική απ' τη στιγμή που όλες οι λειτουργίες μπορούν να εκτελεστούν στην ίδια συχνότητα χωρίς σημαντικό συμβιβασμό. Στην αεράμυνα όμως, οι λειτουργίες παρακολούθησης και ανίχνευσης εκτελούνται σε διαφορετικές συχνότητες. Η παρακολούθηση θα έπρεπε να πραγματοποιηθεί σε χαμηλότερη συχνότητα, όπως σε L-ζώνη συχνότητας. Η ανίχνευση εκτελείται καλύτερα σε υψηλότερη συχνότητα, όπως σε C ή X-ζώνη συχνότητας. Όταν και οι δυο λειτουργίες αποκτιούνται από ένα μονό ραντάρ σε θέση φάσεως, μια μονή συχνότητα πρέπει να διαλεχτεί και πρέπει να γίνουν δεχτοί συμβιβασμοί και στη λειτουργία παρακολούθησης και στη λειτουργία ανίχνευσης. Γι' αυτό δεν είναι φανερό ότι τα πολύ-λειτουργικά ραντάρ αεράμυνας είναι μια επιδίωξη που θα έπρεπε να αναζητηθεί σε όλες τις εφαρμογές. Η θέση φάσεως χρησιμεύει καλύτερα στην αεράμυνα όπως ένα ραντάρ ελέγχου όπλων σε εφαρμογές όπου η επίθεση σε πολλούς στόχους είναι σε μικρό χρονικό διάστημα απαραίτητη.

#### **4.14 Η καθοδήγηση πυραύλων**

Οι αρχές του ραντάρ χρησιμοποιούνται ευρέως για την καθοδήγηση των πυραύλων. Η συζήτηση εδώ αφορά την καθοδήγηση πυραύλων εναντίον εναέριων στόχων, όπως χρησιμοποιείται σε εφαρμογές αεράμυνας. Εφαρμόζεται κυρίως σε εδάφους-αέρος πυραύλους και σε κάποια έκταση σε αέρος-αέρος πυραύλους. Τα συστήματα καθοδήγησης για εδάφους-αέρος πυραύλους που κατευθύνονται σε στόχους επιφάνειας συνήθως είναι

αρκετά διαφορετικά από συστήματα καθοδήγησης αεράμυνας. Κάποιο είδος ραντάρ καθοδήγησης έχει χρησιμοποιηθεί για εδάφους-αέρος συστήματα πυραύλων όπως Nike, Hawk, Patriot, Tarter, Terrier, Talos και Aegis. Υπάρχουν κάμποσα διαφορετικά είδη συστημάτων καθοδήγησης πυραύλων που χρησιμοποιούν ραντάρ, όπως περιγράφεται στο ανατυπωμένο χαρτί 3.8 : "Αποψη της καθοδήγησης πυραύλων", από τον J. F. Gulick.

Σε καθοδήγηση που έχει διαταχθεί και ο στόχος και ο πύραυλος ανιχνεύονται από ραντάρ. Η κατάλληλη τροχιά για τον πύραυλο να πετάξει για να αναχαιτίσει τον στόχο υπολογίζεται από τα δεδομένα στοιχεία του ραντάρ. Δύο ξεχωριστά ραντάρ χρησιμοποιήθηκαν για ανίχνευση του στόχου και του πυραύλου στο αρχικό Nike Ajax SAM σύστημα. Εναλλακτικά, ένα μόνο ραντάρ με μια μηχανική ικανότητα να ανιχνεύει καθώς εξερευνάει ή ένα ραντάρ σε θέση φάσεως ίσως χρησιμοποιηθεί για να ανιχνεύσει και τον στόχο και τον πύραυλο. Εντολές στον πύραυλο μπορούν να μεταδοθούν μέσω ενός εδάφους-αέρος συνδέσμου δεδομένων στοιχείων. Η καθοδήγηση που έχει διαταχθεί ελαχιστοποιεί τον εξοπλισμό που απαιτείται στον πύραυλο. Επίσης επιτρέπει στον πύραυλο να πετάξει σε μια άριστη τροχιά. Η ακρίβεια μειώνεται με την αύξηση της κατεύθυνσης από τα ραντάρ που ανιχνεύουν.

Σ' ένα σύστημα καθοδήγησης με πρόσθετη ακτίνα ο στόχος ανιχνεύεται από ένα ραντάρ και ο πύραυλος πετάει έτσι ώστε να διατηρηθεί κεντρικά στην ακτίνα του ραντάρ. Το αρχικό Ναυτικό Terrier SAM σύστημα των Ηνωμένων Πολιτειών χρησιμοποίησε καθοδήγηση με πρόσθετη ακτίνα. Ο εξοπλισμός που απαιτούνταν στον πύραυλο είναι σχετικά απλός αλλά η ακρίβεια του είναι αντίστροφα ανάλογη με την κατεύθυνση του στόχου από το ραντάρ που ανιχνεύει. Επίσης, ο πύραυλος πρέπει να ελίσσεται συνεχώς για να παραμείνει στην ακτίνα ακόμα και όταν η τροχιά του στόχου είναι μία ευθεία γραμμή. Για ένα καθορισμένο ποσό προώθησης, ένας πύραυλος με πρόσθετη ακτίνα θα έχει μικρότερη κατεύθυνση από ότι αν ήταν καθοδηγούμενο μετά από διαταγή από τη στιγμή που πρέπει να παραμείνει στην ακτίνα της κεραίας και για αυτό δεν μπορεί να πετάξει σε μια άριστη τροχιά. Η καθοδήγηση μετά

από εντολή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σ' όλη τη πτήση του πυραύλου αλλά είναι συνήθως πιο αποτελεσματικό να την χρησιμοποιείς μόνο για το μέρος της μέσης κατεύθυνσης της πτήσης του πυραύλου και να χρησιμοποιείς ένα ξεχωριστό εσωτερικό σύστημα για να πλησιάσεις τον στόχο. Η "εσωτερική καθοδήγηση" απαιτεί ένα αισθητήριο όργανο πάνω σε πλοίο για να αντιληφθεί την τοποθεσία του στόχου και να καθοδηγήσει τον πύραυλο σε μια αναχαίτιση. Τα εσωτερικά συστήματα του ραντάρ μπορεί να είναι ενεργητικά και ημιενεργητικά. Ένα ενεργητικό σύστημα είναι ένα μικροσκοπικά ραντάρ που κουβαλιέται από τον πύραυλο. Τα ενεργητικά συστήματα καθοδήγησης του ραντάρ είναι γενικά περιορισμένα σε κατεύθυνση εκτός αν ο πύραυλος είναι μεγάλος και μπορεί να κουβαλήσει μια μεγάλη κεραία και έναν μεταδότη υψηλής δύναμης. Στην ημιενεργητική καθοδήγηση ο στόχος διευκρινίζεται από ένα ραντάρ που ανιχνεύει τον στόχο. Δυο ξεχωριστοί μεταδότες σε διαφορετικές συχνότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανίχνευση του ραντάρ και για ημιενεργητική καθοδήγηση πυραύλων. Αυτό ονομάζεται ένας "διευκρινιστής ανίχνευσης". Εναλλακτικά, ο διευκρινιζόμενος μεταδότης μπορεί να κατευθυνθεί για να ακολουθήσει την τροχιά του στόχου από πληροφορίες που παρέχονται απ' το ραντάρ ελέγχου όπλων. Αυτό ονομάζεται ένας "υποχείριος διευκρινιστής". Ή στον διευκρινιστή ανίχνευσης ή στον υποχείριο διευκρινιστή, ο πύραυλος κουβαλάει έναν δέκτη και μια κεραία που αντιλαμβάνεται την κατεύθυνση της ενέργειας του διασκορπισμένου στόχου. Η ημιενεργητική καθοδήγηση ήταν μια δημοφιλής, ευρέως χρησιμοποιημένη μέθοδος καθοδήγησης. Είναι μια απ' τις πολύ λίγες επιτυχημένες εφαρμογές της αρχής του bistatic ραντάρ. Το ανατυπωμένο χαρτί 3.9 : "Ραντάρ ημιενεργητικής καθοδήγησης", απ' τον Α. Ιβανον, παρέχει μια άριστη εξέταση αυτής της σημαντικής μεθόδου καθοδήγησης.

Η ανίχνευση μέσο πυραύλου είναι ένα είδος ημιενεργητικής καθοδήγησης στην οποία τα σήματα αντανακλόμενου στόχου που λήφθηκαν στον πύραυλο μεταδίδονται πίσω στο έδαφος όπου μια πιο πολύπλοκη επεξεργασία σήματος μπορεί να κατορθωθεί απ' ότι σ' ένα μικρό πύραυλο. Αυτό χρησιμοποιείται στο Patriot SAM σύστημα. Ένας ελεγχόμενος

σύνδεσμος εδάφους-πυραύλου μεταδίδει πληροφορίες καθοδήγησης στον πύραυλο. Το TVM έχει το πρόσθετο χαρακτηριστικό να παρέχει ανεξάρτητο τριγωνισμό και ικανότητα συσχετισμού χρησιμοποιώντας το ραντάρ και τον πύραυλο εν πτήση.

Μια κύρια σπουδαιότητα στο σχέδιο του συστήματος καθοδήγηση για αναχαίτιση στόχων σε χαμηλά ύψη είναι η ανάγκη να εντοπίζει και να ανιχνεύει την αντήχηση του στόχου υπό την παρουσία μεγάλου θορύβου. Η μετατόπιση της (ντόπλερ) συχνότητας που προέρχεται από την μεγάλη ταχύτητα του στόχου είναι η βάση για διαχωρισμό του στόχου από τον θόρυβο. Και του CW και του παλμικού (ντόπλερ) ραντάρ οι αρχές μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Το σύστημα καθοδήγησης του CW ραντάρ είναι γνωστό για την ικανότητά του να εντοπίζει κινούμενους στόχους σε στάσιμο θόρυβο. Χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς για πολλά χρόνια στο σύστημα Hawk SAM για ανίχνευση σε χαμηλό ύψος. Τα CW είδη κύματος δεν έχουν τις τυφλές ταχύτητες που εμποδίζουν το MTI ραντάρ ή το επισκιάζουν, πρόβλημα του παλμικού (ντόπλερ) ραντάρ. Ένας σοβαρός περιορισμός του CW ραντάρ υψηλής δύναμης, όμως, είναι η ανάγκη για κράτηση του θορύβου του μεταδότη έξω απ' τον δέκτη όπου παρεμβαίνει με τον εντοπισμό της μετατόπισης του στόχου. Γι' αυτό, όλα εκτός απ' τα CW συστήματα μικρής κατεύθυνσης απαιτούν ξεχωριστές κεραιές μετάδοσης και λήψης για να πετύχουν ικανοποιητική απομόνωση. Επίσης, χρειάζονται ένα μεταδότη με χαμηλό θόρυβο. Απ' τη στιγμή που ο μεταδότης και ο δέκτης λειτουργούν όλη την ώρα, το CW σύστημα βλέπει πολύ περισσότερο θόρυβο απ' ότι ένα παλμικό ραντάρ. Γι' αυτό απαιτεί μεγαλύτερη καταπολέμηση (εξαφάνιση) θορύβου.

Η καθοδήγηση ενός παλμικού (ντόπλερ) ραντάρ έχει το πλεονέκτημα σε σχέση με CW συστήματα στο ότι μια μονή κεραία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για μετάδοση και για λήψη. Μια συχνότητα υψηλής επανάληψης παλμού (prf) μερικές φορές χρησιμοποιείται στο παλμικό (ντόπλερ) ραντάρ έτσι ώστε η (ντόπλερ) επεξεργασία είναι σχεδόν σαν εκείνη ενός CW ραντάρ. Μια μονή περιοχή περίπου στην κεντρική γραμμή του παλμικού(ντόπλερ)

φάσματος απομονώνεται με φιλτράρισμα και ο δέκτης μετά επεξεργάζεται τα σήματα όπως σ' ένα CW ραντάρ. Το prf συνήθως είναι αρκετά υψηλό για να αποφευχθούν οι ασάφειες του (ντόπλερ) αλλά η κατεύθυνση είναι πολλή ασαφής. Πολλαπλά prf χρησιμοποιούνται για να διαλύσουν τις ασάφειες.

Πέρα απ' τις μεθόδους του ραντάρ, η καθοδήγηση πυραύλου μπορεί να αποκτηθεί με παθητικά υπέρυθρα συστήματα, με οπτικά συστήματα, με συστήματα λέιζερ και με αδρανή συστήματα. Είναι μερικές φορές επιθυμητό να χρησιμοποιείς περισσότερα από ένα είδος εσωτερικού συστήματος για να ματαιώσεις (ακυρώσεις) καταμετρήσεις. Τα συστήματα που έχουν την προοπτική να διαλέξουν ανάμεσα από περισσότερες από μία μεθόδους καθοδήγησης ονομάζονται "ποικιλότροπα".

Ίσως σημειωθεί ότι οι τεχνικές του ραντάρ χρησιμοποιούνται επίσης για τους πυροσωλήνες εκρηκτικής συσκευής που αντιλαμβάνονται την κατάλληλη ώρα για να εκपुरσοκροτήσουν το warhead.

#### **4.15 HF ραντάρ πάνω απ' τον ορίζοντα (OTH)**

Είναι γνωστό ότι η κατεύθυνση ενός ραντάρ μικροκυμάτων είναι περιορισμένη στη γραμμή σκόπευσης από διάδοση ευθείας γραμμής της ενέργειας των μικροκυμάτων. Το HF μέρος του φάσματος (που ορίζεται από 3 ως 30 MHz) έχει το σημαντικό χαρακτηριστικό ότι η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια σ' αυτή τη συχνότητα κατεύθυνσης διαθλάται απ' τη ιονόσφαιρα ώστε να επιστρέψει στη γη σε μεγαλύτερες κατευθύνσεις, πέρα απ' το κανονικό ορίζοντα που καθορίζεται απ' τη γραμμή σκόπευσης. Η διάθλαση απ' την ιονόσφαιρα μερικές φορές ονομάζεται η "μέθοδος ουράνιων κυμάτων" της διάδοσης. Μια μονή διάθλαση της ενέργειας του ραντάρ επιτρέπει τον εντοπισμό στόχων σε κατευθύνσεις από περίπου 500 ως 2000 nmi. Σε μερικές περιπτώσεις οι κατευθύνσεις μπορεί να είναι μεγαλύτερες με πολλαπλές απογειώσεις αεροπλάνων. Ένα HF ραντάρ που χρησιμοποιεί την ιονόσφαιρα για να μεταδώσει πέρα απ' τον ορίζοντα ονομάζεται HF OTH ραντάρ. Το HF

ραντάρ, γι' αυτό, έχει σημαντικό πλεονέκτημα να είναι ικανό να λειτουργεί σε κατευθύνσεις πολύ πέρα απ' τον κανονικό ορίζοντα. Οι κατευθύνσεις μπορούν να είναι μεγαλύτερες από εκείνες που συνήθως αποκτιούνται με ραντάρ μικροκυμάτων από γραμμή σκόπευσης.. Αυτή η ικανότητα είναι ειδικά σημαντική όταν απαιτείται κάλυψη από μεγάλες περιοχές όπου δεν είναι πρακτικό να βάλεις ραντάρ μικροκυμάτων όπως για παράδειγμα, στους ωκεανούς του κόσμου.

Το HF OTH ραντάρ είναι ειδικά χρήσιμο γι τον εντοπισμό αεροσκαφών. Αυτός είναι ο στόχος για τον οποίο ταιριάζει καλύτερα. Μπορεί επίσης να εντοπίσει πλοία και διηπειρωτικούς, βαλλιστικούς πυραύλους και όπως αναφέρθηκε στον τομέα 6.3, μπορεί να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για τις συνθήκες του ανέμου και των κυμάτων στον ωκεανό. Το σχέδιο ενός HF OTH ραντάρ, τα είδη κύματός του και η επεξεργασία σήματος θα διαφέρουν βασιζόμενα πάνω στο είδος του στόχου που είναι να εντοπιστεί. Γενικά, ένα HF OTH ραντάρ πρέπει να είναι σχεδιασμένο ειδικά για τον εντοπισμό ή αεροσκαφών, ή πλοίων, ή πυραύλων. Ένα σχέδιο μονού HF OTH ραντάρ δεν πετυχαίνει πολλαπλούς στόχους καλά – μια δήλωση η οποία είναι εξίσου αληθινή για τα περισσότερα ραντάρ μικροκυμάτων.

Το HF OTH ραντάρ μπορεί να προσφέρει μια σημαντική λειτουργία στην αεράμυνα. Παρέχει ένα πολύ μεγαλύτερο χρόνο προειδοποίησης προσέγγισης του αεροσκάφους απ' ότι μπορεί να αποκτηθεί με ραντάρ μικροκυμάτων. Αυτό είναι ειδικά σημαντικό για την άμυνα των ηπειρωτικών Ηνωμένων Πολιτειών ή για τις απόκεντρες περιοχές που συνορεύουν με εκτάσεις νερού από όπου οι επιθέσεις μπορούν να γίνουν χωρίς προειδοποίηση. Είναι επίσης χρήσιμο για την επιφυλακή πλοίων στον ανοιχτό ωκεανό από επικείμενες επιθέσεις για αεράμυνα από αμφίβιες λειτουργίες και για άλλες εφαρμογές όπου είναι απαραίτητο να ξέρεις τι συμβαίνει πέρα απ' τον κανονικό ορίζοντα του ραντάρ. Αεροσκάφη μπορούν να εντοπίζονται με HF OTH ραντάρ σε οποιοδήποτε ύψος είναι ικανά να πετάξουν. Το HF OTH ραντάρ μπορεί να γίνει έτσι ώστε να έχει αξιόπιστη λειτουργία και καλή εκτέλεση



ακόμα και με προβλήματα που έχουν σχέση με ιονοσφαιρική διάδοση. Τα αντίθετα αποτελέσματα της ιονόσφαιρας μπορούν να αντισταθμιστούν εξερευνώντας σε πραγματική ώρα τη φύση της ιονόσφαιρας για να καθορίσεις την καλύτερη μέθοδο διάδοσης, έχοντας μια μεγάλης ζώνης συχνότητα λειτουργίας ώστε να είσαι ικανός να συλλέξεις την κατάλληλη συχνότητα για διάδοση σύμφωνα με τη φύση της ιονόσφαιρας και βάζοντας μέσα στο ραντάρ υπερβολική δύναμη μετάδοσης και /ή άνοιγμα κεραίας για να αντισταθμίσεις την απώλεια της διάδοσης που συμβαίνει κατά τη διάρκεια εκείνων των στιγμών όταν η απώλεια στην ιονόσφαιρα είναι μεγάλη. Το HF OTH ραντάρ, όταν σχεδιάζεται και χρησιμοποιείται κατάλληλα, μπορεί να είναι ένα σημαντικό αισθητήριο όργανο για στρατιωτική αεράμυνα. Το ανατυπωμένο χαρτί 3.10 : "Ραντάρ πάνω απ' τον ορίζοντα στην HF-ζώνη συχνότητας", απ' τον J. M. Headrick και τον M. I. Skolnik, περιγράφει τα χαρακτηριστικά και τις ικανότητες αυτού του είδους ραντάρ, κυρίως για εντοπισμό αεροσκαφών.

Η πολεμική αεροπορία των Ηνωμένων Πολιτειών χρησιμοποιεί HF OTH ραντάρ για τον εντοπισμό αεροσκαφών που προσεγγίζουν τις ηπειρωτικές Ηνωμένες Πολιτείες. Υπάρχει μια κάλυψη 180° και των ανατολικών και των δυτικών ακτών. Η κάλυψη της νότιας περιοχής μπορεί επίσης να αποκτηθεί με HF OTH ραντάρ, αλλά ο εντοπισμός στόχων από τις βόρειες προσεγγίσεις στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι περιορισμένος μ' αυτό το είδος ραντάρ εξαιτίας των δυνατών αντηχήσεων που εισάγονται απ' την πολική αυγή. Το Ναυτικό των Ηνωμένων Πολιτειών έχει επίσης χρησιμοποιήσει HF OTH ραντάρ για κάλυψη των περιοχών του ωκεανού ναυτικού ενδιαφέροντος. Η Αυστραλία χρησιμοποιεί ένα HF OTH ραντάρ που ονομάζεται Jindalee, που είναι σχεδιασμένο για να προστατεύει τις βόρειες προσεγγίσεις στην χώρα.

Η HF ηλεκτρομαγνητική ενέργεια μπορεί επίσης να διαδοθεί στον ορίζοντα με την βοήθεια μιας μεθόδου εδάφους-κύματος. Όμως, οι κατευθύνσεις που πετυχαίνονται με την μέθοδο

εδάφους-κύματος είναι σχετικά μικρές συγκρινόμενες με το τι μπορεί να αποκτηθεί με ΟΤΗ διάδοση ουράνιων κυμάτων.

#### **4.16 Άλλες στρατιωτικές εφαρμογές του ραντάρ**

Η συζήτηση του στρατιωτικού ραντάρ πιο πάνω ήταν για εφαρμογές αεράμυνας. Σ' αυτό το μέρος άλλες εφαρμογές ραντάρ που είναι βασισμένα στο έδαφος πέρα από αεράμυνα θα απαριθμηθούν σύντομα.

#### **4.17 Ραντάρ παρακολούθησης του πεδίου μάχης**

Αυτά είναι φορητά, μικρής κατεύθυνσης (ντόπλερ) ραντάρ για τον εντοπισμό της κίνησης οχημάτων, ειδικά όταν η οπτική παρατήρηση δεν είναι πρακτική. Τα οχήματα μπορούν να εντοπιστούν σε κατευθύνσεις ίσως μερικών χιλιομέτρων. Ένας εκπαιδευμένος χειριστής που ακούει την (ντόπλερ) συχνότητα των λαμβανομένων αντηχήσεων μπορεί να αναγνωρίσει ένα είδος κινούμενου στόχου από έναν άλλο. Ο "ήχος" των αρμάτων είναι διαφορετικός απ' των φορτηγών και ένας άντρας που περπατάει μπορεί να αναγνωριστεί από μια γυναίκα που περπατάει.

Οι εξακριβωτές διεύθυνσης του ραντάρ, όπως στο μέρος 7.2, έχουν στρατιωτική εφαρμογή για εντοπισμό των ανθρώπων στο πεδίο μάχης και για την προστασία στρατιωτικών εγκαταστάσεων και εξοπλισμού. Τα εναέρια ραντάρ μπορούν επίσης να παίξουν ένα σημαντικό ρόλο στην παρακολούθηση του πεδίου μάχης μ' ένα ραντάρ υψηλής ανάλυσης να χαρτογραφεί τη περιοχή και με μια (ντόπλερ) επεξεργασία να εντοπίζει κινούμενα οχήματα, όπως αναφέρθηκε στο μέρος 4.4.

#### **4.18 Ραντάρ εξοπλισμού ολμοβόλου και πυροβολικού**

Το ολμοβόλο είναι ένα αποτελεσματικό στρατιωτικό όπλο που εξηγεί το μέρος των απωλειών απ' τα εδαφικά στρατεύματα. Ειδικά σχεδιασμένο ραντάρ μπορεί να υπολογίζει αυτόματα την τροχιά τους και να καθορίζει την τοποθεσία απ' την οποία πυροβολήθηκαν –

πριν προσκρουστεί το ολμοβόλο. Υπάρχουν δυο είδη εξακριβωτών ολμοβόλου : στο ένα η ακτίνα της κεραίας εξερευνάται ηλεκτρομηχανικά, στο άλλο, η κεραία εξερευνάται ηλεκτρονικά.

Η κεραία για ένα ραντάρ εξακριβωτή ολμοβόλου μπορεί να είναι ένας ηλεκτρονικός κινούμενος Foster εξερευνητής, ή παρόμοιο μηχανήμα, που εξερευνάει την ακτίνα της κεραίας σ' ένα περιορισμένο τομέα αζιμούθιου (τυπικά  $20^\circ$ ) σε χαμηλή ανυψωμένη γωνία, με την ακτίνα τοποθετημένη μόλις πάνω από την τοπική περιοχή. Απ' τη στιγμή που ένας αρχικός εντοπισμός γίνεται, η εξερευνούμενη ακτίνα κινείται προς μια μεγαλύτερη ανυψωμένη γωνία και αποκτιέται μια δεύτερη παρατήρηση. Μ' αυτές τις δυο παρατηρήσεις μπορεί να βρεθεί ο εντοπισμός του όπλου που πυροβολεί το ολμοβόλο. Αυτό το είδος ραντάρ μπορεί να φτιαχτεί ώστε να είναι κινητό και ελαφρύ. Έχει λειτουργήσει καλά, αλλά η κάλυψη του ενός μόνο περιορισμένου τμήματος αζιμούθιου είναι ένα μειονέκτημα.

Η ηλεκτρονικά εξερευνούμενη κεραία σε θέση φάσεως προσφέρει το πλεονέκτημα της ικανότητας εξερεύνησης  $90^\circ$  αζιμούθιου για την τοποθεσία ομοβόλου. Έχει το παραπέρα πλεονέκτημα ότι η ανυψωμένη γωνία της εξερευνούμενης ακτίνας μπορεί να μεταβληθεί με την γωνία του αζιμούθιου σύμφωνα με τον χαρακτήρα της τοπικής περιοχής. Απ' τη στιγμή που γίνεται ένας αρχικός εντοπισμός, ή η ακτίνα της κεραίας μπορεί να τοποθετηθεί ηλεκτρονικά σε μια μεγαλύτερη ανυψωμένη γωνία για να αποκτήσει μια δεύτερη μέτρηση, ή μπορεί να συνεχόμενα να ανιχνεύει την ολμοβομβίδα σε ανύψωση όπως επίσης και σε αζιμούθιο.

Ο εντοπισμός των βλημάτων του πυροβολικού και η τοποθεσία του όπλου που πυροβολεί είναι πιο δύσκολα απ' τον εντοπισμό των ολμοβόλων εξαιτίας της μεγαλύτερης ταχύτητας του, των πιο αβαθών (ρηχών) τριχιών και των μεγαλύτερων κατευθύνσεων της τροχιάς. Γι' αυτό, τα ραντάρ εντοπισμού πυροβολικού είναι μεγαλύτερα απ' τα ραντάρ εντοπισμού ολμοβόλου και είναι συνήθως σε θέσεις φάσεων έτσι ώστε το βλήμα να μπορεί να ανιχνεύεται συνεχόμενα σε μεγαλύτερο διάστημα απ' ότι με συστήματα εντοπισμού

ολμοβόλου. (Ο Milner έχει δηλώσει ότι τα βλήματα του πυροβολικού ίσως να πρέπει να ανιχνεύονται για 10 ως 20 δευτερόλεπτα ). Πέρα από τα ολμοβόλα και το πυροβολικό, το ραντάρ θα έπρεπε επίσης να είναι ικανό να εντοπίζει ρουκέτες (πυραύλους).

Τα ραντάρ εντοπισμού όπλων χαρακτηρίζονται από κίνηση και αυτόματη λειτουργία. Πρέπει να σχεδιάζονται για να λειτουργούν κοντά στη μπροστινή άκρη της ζώνης μάχης. Απ' τη στιγμή που οι ακτίνες της κεραίας θα έπρεπε να είναι κοντά στο έδαφος, το ραντάρ πρέπει να έχει καλή (ντόπλερ) επεξεργασία για να εντοπίζει μικρά βλήματα και ολμοβομβίδες υπό την παρουσία μεγάλων αντηχήσεων. Σε μερικές στρατιωτικές περιπτώσεις, η επίθεση ολμοβόλου μπορεί να έρθει από οποιαδήποτε κατεύθυνση. Απ' το να προσπαθήσεις να καλύψεις 360° σε αζημούθιο με ένα πολύπλοκο ραντάρ είναι καλύτερα να χρησιμοποιήσεις πολλαπλά ραντάρ, το καθένα να καλύπτει ένα περιορισμένο τομέα. Απ' την άλλη μεριά, δεν είναι πάντα φανερό ότι ένα μεγάλο και πολύπλοκο ραντάρ είναι καλύτερο από πολλαπλά μικρότερα ραντάρ.

#### **4.19 Παρακολούθηση δορυφόρου**

Συνεργάσιμοι δορυφόροι μπορούν να εντοπισμού και να ανιχνευτούν ακριβώς με την βοήθεια συστημάτων transponder πάνω σε πλοίο ή με άλλα βοηθήματα. Όμως, τα διαστημικά αντικείμενα στρατιωτικής σημαντικότητας ίσως να μην είναι τόσο εξοπλισμένα (εφοδιασμένα). Γι' αυτό, το ραντάρ χρειάζεται για εντοπισμό μη ακτινωτών δορυφόρων που δεν κουβαλάνε ένα συνεργάσιμο φωτεινό σήμα, όπως επίσης και για εντοπισμό συσσωρευμένων πυραύλων (ρουκετών) και άλλων διαστημικών χαλασμάτων (ερείπιών).

Δύο διαφορετικά είδη ραντάρ έχουν χρησιμοποιηθεί για παρακολούθηση δορυφόρου. Το ένα χρησιμοποιεί ένα σχέδιο (μοντέλο) κάθετης περιστρεφόμενης ακτίνας για ακτινοβολία λειτουργώντας ως ένα "φράγμα". Οι δορυφόροι εντοπίζονται καθώς περνούν μέσα απ' τη

κάλυψη του φράγματος. Το είδος κύματος είναι συνήθως CW. Με CW είδη κύματος, ο δέκτης και ο μεταδότης πρέπει να διαχωριστούν ο ένας απ' τον άλλο από μια σχετικά μεγάλη απόσταση ώστε να κρατήσει τη δύναμη του μεταδότη από παρέμβαση με τον εντοπισμό ασθενών σημάτων των αντηχήσεων του στόχου στο δέκτη. Στο SPASUR σύστημα, που είναι τοποθετημένο κατά μήκος της νότιας πλευράς των Ηνωμένων Πολιτειών, ο λαμβανόμενες τοποθεσίες είναι ακριβώς 250 nmi απ' τον μεταδότη ώστε να κατορθωθεί να η απαραίτητη απομόνωση. Το σύστημα λειτουργεί σε VHF (216 MHz). Υπάρχουν συνολικά τρεις σταθμοί μετάδοσης και έξι σταθμοί λήψης που είναι τοποθετημένοι κατά μήκος μιας βόρρα – νότου κατεύθυνσης. Ο μεταδότης στο κέντρο της γραμμής είναι ο μεγαλύτερος. Έχει μια μέση δύναμη περίπου 1 MW και χρησιμοποιεί μια κεραία με γραμμική σειρά σχεδόν 2 μίλια σε μήκος τοποθετημένη κατά μήκος μιας βόρρα – νότου κατεύθυνσης. Το πλεονέκτημα μιας κάθετης κάλυψης είναι ότι οι κατευθύνσεις σε δορυφόρους μεγάλου ύψους είναι μικρότερες απ' ότι μ' ένα ραντάρ του οποίου η ακτίνα είναι σε χαμηλή ανυψωμένη γωνία.

Ένα παράδειγμα του άλλου είδους ραντάρ παρακολούθησης δορυφόρου είναι το AN/FPS-85, ένα ραντάρ σε θέση φάσεως που φτιάχτηκε απ' το Bendix και είναι τοποθετημένο στην Eglin βάση της πολεμικής Αεροπορίας, στη Φλόριδα. Περιγράφεται στο ανατυπωμένο χαρτί 3.11 : " Το AN/FPS-85 σύστημα ραντάρ", απ' τον J. E. Reed. Αυτό το χαρτί είναι σχετικά παλιό, όπως είναι το ραντάρ, αλλά το βασικό σχέδιο είναι καλό και τα προβλήματα ανάπτυξης του συστήματος ραντάρ σε θέση φάσεως περιγράφονται καλά σ' αυτό το κατατοπιστικό χαρτί. Το ραντάρ λειτουργεί σε UHF με ένα πλάτος ακτίνας  $1.4^\circ$  και μια δεσμίδα εννέα επικλινόμενων ακτινών λήψης. Το ραντάρ χρησιμοποιεί κάμποσα διαφορετικά είδη κύματος για να πετύχει ψάξιμο(έρευνα) και ανίχνευση. Ήταν το πρώτο μεγάλο σύστημα ραντάρ που συνάντησε και έλυσε τα φοβερά προβλήματα που έχουν σχέση με τον έλεγχο του κομπιούτερ εύκαμπτων ραντάρ σε θέση φάσεως που δεν

εκτιμήθηκαν πλήρως πριν φτιαχτεί αυτό το ραντάρ. Ήταν πραγματικά μια πρωτοποριακή ανάπτυξη του ραντάρ.

Υπάρχουν και άλλες μέθοδοι ραντάρ για τον εντοπισμό και ανίχνευση δορυφόρων, μερικές απ' τις οποίες έχουν περιγραφεί από τον Lerch. Τα ραντάρ για τον εντοπισμό διηπειρωτικών βαλλιστικών πυραύλων έχουν επίσης την ικανότητα για εντοπισμό δορυφόρου.

#### **4.20 Παρακολούθηση διηπειρωτικού βαλλιστικού πύραυλου και διεύθυνση (διαχείριση) μάχης**

Η προειδοποίηση προσέγγισης διηπειρωτικών βαλλιστικών πυραύλων απαιτεί ραντάρ εξαιρετικά μεγάλης κατεύθυνσης, συνήθως περίπου δύο ή τρεις χιλιάδες μίλια. Το BMEWS (Σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης διηπειρωτικού βαλλιστικού πυραύλου) ήταν το πρώτο σύστημα ραντάρ μεγάλης κατεύθυνσης που χρησιμοποιήθηκε για τον έγκαιρο εντοπισμό διηπειρωτικών βαλλιστικών πυραύλων που προσέγγιζαν τις ηπειρωτικές Ηνωμένες Πολιτείες απ' τον βορρά. Οι θέσεις ήταν στην Αλάσκα, Greenland (Thule) και Αγγλία. Στις θέσεις των Αλάσκα και Thule, οι κεραιές εξερευνούνταν πάνω από ένα ευρύ τμήμα αζιμούθιου για να εντοπίζουν πυραύλους που διαπερνούσαν την κάλυψη. Αυτά τα ραντάρ ήταν σε UHF και το prf τους των 27Hz αντιστοιχούσε (ανταποκρινόταν) με μια σαφή κατεύθυνση σχεδόν 3000nmi. Είχαν στερεωμένες κατοπτρικές κεραιές παραβολικού – ρόμβου με εξερευνητές με σωλήνες. Οι ακτίνες σε περισσότερες από μια στερεωμένη γωνία χρησιμοποιούνταν για να αποκτήσουν δύο ή περισσότερες παρατηρήσεις ώστε να προβλέψουν την τροχιά του πυραύλου, όπως γίνεται και με τα ραντάρ εντοπισμού ολμοβόλων. Το σύστημα σ' αυτές τις δυο θέσεις είχε επίσης φροντίδα για ένα μεγάλο μηχανικό ραντάρ ανίχνευσης με ημισφαιρική κάλυψη για να πετύχει ένα μεγαλύτερης διάρκειας κοίταγμα στον πύραυλο και γι' αυτό να αποκτήσει έναν πιο ακριβή καθορισμό της τροχιάς απ' ότι θα μπορούσε να έχει με τις στερεωμένες κατοπτρικές κεραιές.

Η BMEWS θέση στην Αγγλία δεν είχε στερεωμένες κατοπτρικές κεραιές. Αντί γι' αυτό χρησιμοποιούσε κάμποσα μεγάλα μηχανικά ραντάρ ανίχνευσης για να παράγει μια κάλυψη

σε χαμηλή ανυψωμένη γωνία και μετά ανίχνευε στόχους που εντοπίζονταν διαπερνώντας το φράγμα. Αυτός ο τρόπος της “εξερεύνησης – ανίχνευσης” ήταν ένας έξυπνος τρόπος για να χρησιμοποιήσεις την ευκαμψία του μηχανικού ανιχνευτή και πρόσφερε το σημαντικό πλεονέκτημα, σε σχέση με τις στερεωμένες κατοπτρικές κεραίες των άλλων BMEWS θέσεων, να είναι ικανό να τοποθετεί την κεραία του οπουδήποτε μέσα στην ημισφαιρική κάλυψη.

Ο σκοπός του BMEWS ήταν να προειδοποιεί την προσέγγιση διηπειρωτικών βαλλιστικών πυραύλων. Ο χρόνος προειδοποίησής του, ακριβώς 15 λεπτών επέτρεψε B-52 βομβαρδιστικά αεροσκάφη σε επιφυλακή στο τέλος του διαδρόμου προσγείωσης να απογειωθούν απ’ το αεροδρόμιο πριν την άφιξη των πυραύλων. Πέρα από τον εντοπισμό διηπειρωτικών βαλλιστικών πυραύλων, το BMEWS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανίχνευση εκείνων των δορυφόρων που έρχονται μέσα στην κάλυψή του, ένα γεγονός πιο πιθανό – ελπίζεται – απ’ την προσέγγιση επίθεσης ενός διηπειρωτικού βαλλιστικού πυραύλου.

Η ιδέα για το αρχικό BMEWS, χρονολογείται στα μέσα του 1950. Ραντάρ σε θέση φάσεως χρησιμοποιήθηκαν γι’ αυτή την εφαρμογή εκείνο τον καιρό αλλά δεν μπορούσαν να ανταγωνιστούν τις μηχανικές τεχνικές εξερεύνησης της κεραίας. Μετά από σχεδόν 30 χρόνια, η τεχνολογία του ηλεκτρονικά εξερευνούμενου ραντάρ σε θέση φάσεως έκανε πρόοδο στο σημείο όπου μια παραλλαγή του Pave Paws ραντάρ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για BMEWS.

Το Pave Paws είναι ένα UHF ραντάρ σε θέση φάσεως με δύο όψεις που καλύπτουν έναν ολικό τομέα 120°. Είναι σχεδιασμένο για να παρέχει προειδοποίηση της προσέγγισης διηπειρωτικών βαλλιστικών πυραύλων. Τέσσερις θέσεις μπορούν να καλύψουν από τις βορειοανατολικές Ηνωμένες Πολιτείες ως τη νότια περιφέρεια και πάνω στα βορειοδυτικά το Pave Paws είναι επίσης για να αντικαθιστά τη λειτουργία παρακολούθησης δορυφόρου που εκτελείται απ’ το AN/FPS-85 που συζητήθηκε προηγουμένως.

Τα συστήματα άμυνας διηπειρωτικών αντί-βαλλιστικών πυραύλων (ABM), χρειάζονται ραντάρ μεγάλης κατεύθυνσης παρόμοια με το Pave Paws για απόκτηση στόχων του πυραύλου. Μια κύρια διαφορά ανάμεσα σ' ένα ραντάρ παρακολούθησης δορυφόρου και ένα ABM ραντάρ είναι ότι το πρώτο κάνει σχεδόν τη δουλειά του εν καιρώ ειρήνης καθώς το άλλο λειτουργεί κατ' αρχήν κατά τη διάρκεια καιρών εχθροπραξιών. Το ABM ραντάρ πρέπει να σκληραίνει για να αποκρούει επιθέσεις και πρέπει να είναι μέσα σε μια προστατευόμενη περιοχή. (Αν το ραντάρ δεν προστατεύεται και αν είναι σημαντικό για την επιτυχία της αποστολής, τότε το ABM σύστημα μπορεί εύκολα να νικηθεί αν επιτεθεί στο μη προστατευμένο ραντάρ. Εκ τούτου, είναι χαρακτηριστικό του ABM ραντάρ να προστατεύονται). Τα ABM ραντάρ παρακολούθησης μεγάλης κατεύθυνσης είναι συνήθως σε UHF ή L-ζώνη συχνότητας όπου μεγάλα ραντάρ παραγωγής δύναμης – ανοίγματος μπορούν να αποκτηθούν εύκολα απ' ότι σε υψηλότερες συχνότητες. Επίσης χρειάζεται να υπάρχει ABM ραντάρ ελέγχου όπλων – που συνήθως ονομάζεται ραντάρ "διεύθυνσης της μάχης". Αυτά είναι στις υψηλότερες συχνότητες, L ή S-ζώνη συχνότητας. Πρέπει να γίνουν πιο σκληρά για να επιβιώσουν απ' τις επιδράσεις πυρηνικών και θερμικών αερίων, πρέπει να λειτουργούν σ' ένα πυρηνικό περιβάλλον χωρίς πτώση εξαιτίας "διακοπής ρεύματος", πρέπει να είναι ικανά να ελέγχουν τη σύγκρουση πολλών στόχων ταυτόχρονα και πρέπει να εντοπίζουν πυραύλους που περιέχουν warheads υπό την παρουσία παγίδων και άλλων καταμετρήσεων. Γι' αυτούς τους λόγους, τα ABM ραντάρ είναι ανάμεσα στα πιο ακριβά ραντάρ και παρουσιάζουν μια ενδιαφέρον πρόκληση στον μηχανικό του ραντάρ.

#### **4.21 Ραντάρ σε θέση φάσεως σε Στρατιωτικές εφαρμογές**

Η θέση φάσεως έχει χαρακτηριστικά που διαφέρουν από εκείνα άλλων κεραιών. Οι κύριες έλξεις της θέσης φάσεως για στρατιωτικό ραντάρ είναι η ικανότητα να οδηγεί γρήγορα μια ακτίνα από μια κατεύθυνση σε μια άλλη και η ικανότητα να ανιχνεύει έναν μεγάλο αριθμό στόχων σχεδόν ταυτόχρονα. Το επίπεδο άνοιγμα μιας θέσης φάσεως μπορεί επίσης να γίνει



σκληρό για να αποκρούει επιδράσεις των ρευμάτων αέρα από εκτόνωση αερίων. Τα ραντάρ σε θέση φάσεως όμως, είναι πολύπλοκα και ακριβά. Δεν είναι κατάλληλα για όλες τις εφαρμογές και σπάνια βρίσκονται για εφαρμογές πολιτικού ραντάρ. Κάμποσες απ' τις στρατιωτικές εφαρμογές των θέσεων φάσεως έχουν ήδη αναφερθεί. Συνοπτικά παρακάτω είναι όπου ήταν μεγάλου ενδιαφέροντος :

Συστήματα πυραύλων εδάφους-αέρος : Η ιδιότητα μιας θέσης φάσεως, που είναι η έλξη γι' αυτή την εφαρμογή, είναι η ικανότητά του να παρέχει υψηλή δύναμη πυρός ανιχνεύοντας πολλούς στόχους ταυτόχρονα σ' ένα υψηλό ρυθμό δεδομένων στοιχείων. Τα συστήματα Patriot και Aegis είναι δύο παραδείγματα.

Άμυνα διηπειρωτικού βαλλιστικού πυραύλου : Είναι δυνατό να φτιάξεις ένα σύστημα άμυνας διηπειρωτικού βαλλιστικού πυραύλου χωρίς ραντάρ σε θέση φάσεως. Στις πρώτες μέρες των διηπειρωτικών βαλλιστικών πυραύλων, όταν η τεχνολογία της θέσης φάσεως ήταν πιο στάσιμη απ' ότι είναι σήμερα, υπήρχε σοβαρή εξέταση των ABM συστημάτων χρησιμοποιώντας μόνο μηχανικά ραντάρ ανίχνευσης. Όμως, το ραντάρ σε θέση φάσεως είναι η βάση των μοντέρνων ABM συστημάτων. Χρησιμοποιήθηκε και στο Nike-X και στο Safeguard σύστημα. Η ABM συνθήκη που περιορίζει την ανάπτυξη συστημάτων άμυνας για διηπειρωτικούς βαλλιστικούς πυραύλους κατέληξε σε λίγα καινούρια ABM σχέδια ραντάρ.

Προειδοποίηση διηπειρωτικού βαλλιστικού πυραύλου : Δύο παραδείγματα που έχουν ήδη αναφερθεί είναι το BMEWS σύστημα για εντοπισμό διηπειρωτικών βαλλιστικών πυραύλων που φτάνουν απ' τη βόρεια πολική περιοχή και το Pave Paws σύστημα των ραντάρ που προειδοποιεί για προσέγγιση διηπειρωτικών βαλλιστικών πυραύλων στις ηπειρωτικές Ηνωμένες Πολιτείες. Αυτά είναι μεγάλα, δυναμικά ραντάρ που πρέπει να βλέπουν μικρούς στόχους σε μεγάλη κατεύθυνση.

Τεστ παρατήρησης διηπειρωτικού βαλλιστικού πυραύλου : Η ικανότητα ανίχνευσης πολύ-στόχων του ραντάρ σε θέση φάσεως είναι κατάλληλη για παρατήρηση πολλαπλών warheads και άλλων αντικειμένων που σχετίζονται με επάνοδο. Το Cobra Dane ραντάρ σε θέση

φάσεως και L-ζώνη συχνότητας, τοποθετημένο στην άκρη (κορυφή) της αλυσίδας νησιών Aleutian στην Αλάσκα, τοποθετήθηκε για να παρακολουθεί την ανάπτυξη των πτήσεων διηπειρωτικών βαλλιστικών πυραύλων. Το Cobra Judy είναι ένα ραντάρ σε θέση φάσεως επίσης σχεδιασμένο για παρατήρηση των τεστ των διηπειρωτικών βαλλιστικών πυραύλων.

Παρακολούθηση δορυφόρου : Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το AN/FPS-85 είναι ένα ραντάρ σε θέση φάσεως. Η αντικατάστασή του είναι επίσης μια θέση φάσεως.

Ενορχήστρωση κατεύθυνσης : Αυτή η εφαρμογή συζητιέται στο μέρος 7.4. Οι θέσεις φάσεως χρησιμοποιούνται για να παρακολουθούν τα τεστ των λειτουργιών που εκτελούνται σε κατευθύνσεις πυραύλων και για παρακολούθηση των γεγονότων που συμβαίνουν. Αν και τα ραντάρ ανίχνευσης μονού στόχου έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως, το ραντάρ σε θέση φάσεως μπορεί να ανιχνεύει πολλαπλούς στόχους. Αυτή είναι μια σημαντική απαίτηση για ενορχήστρωση της κατεύθυνσης.

Εναέρια ραντάρ : Το μέρος 4.4 περιγράφει τη χρήση της θέσης φάσεως για επανδρωμένα στρατηγικά βομβαρδιστικά αεροσκάφη όπως το B-1B.

Πολλά λεφτά έχουν ξοδευτεί σε ραντάρ θέσης φάσεως. Πολλά έχουν φτιαχτεί σαν ``ένα του είδος``, αλλά υπάρχουν σημαντικά παραδείγματα μιας διαδοχικής παραγωγής στρατιωτικών ραντάρ σε θέση φάσεως. Ο κύριος λόγος που το ραντάρ σε θέση φάσεως δεν έχει χρησιμοποιηθεί πιο ευρέως είναι η πολυπλοκότητά του. Η πολυπλοκότητα οδηγεί σε υψηλό κόστος και κάνει δύσκολη τη διατήρηση υψηλής αξιοπιστίας. Παρά το κόστος και την πολυπλοκότητά του, υπάρχουν εφαρμογές που θα συνεχίσουν να χρησιμοποιούν τη θέση φάσεως. Αλλά ο συνετός πελάτης, θα έπρεπε πάντα να σιγουρεύεται ότι δεν υπάρχει μια πιο αποτελεσματική λύση στο πρόβλημα.

## ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Στόχος της εργασίας αυτής ήταν αφενός να γίνει μια ιστορική αναδρομή στην τεχνολογία του ραντάρ από την ανακάλυψη του μέχρι σήμερα, και αφετέρου μια παρουσίαση των πολλών εφαρμογών του.

Στη συνέχεια ακολουθεί το πρόγραμμα που παρουσιάζει μια εικόνα οθόνης πραγματικού ραντάρ.

## ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Οι εντολές του προγράμματος επεξηγούνται με τη μορφή σχολίων μέσα στο ίδιο το πρόγραμμα.

Το πρόγραμμα τώρα απευθύνεται σε άτομα τα οποία αγνοούν τη δομή και τη λειτουργία του ραντάρ, δίνοντας τους τη δυνατότητα να αντιληφθούν τι περίπου βλέπει ένας χειριστής σε μια οθόνη PPI ραντάρ (καθώς υπάρχουν πολλών ειδών οθόνες ραντάρ).

Η οθόνη του προγράμματος μας δείχνει σταδιακά κάποιους υποτιθέμενους στόχους μαζί με τα αζιμούθια τους δίπλα στην οθόνη. Η βάση του ραντάρ είναι στην αρχή της νοητής γραμμής και οι στόχοι είναι φανταστικοί.