



**ΤΕΙ ΜΕΣΟΛΟΓΓΙΟΥ**  
**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΝΑΥΠΑΚΤΟΥ**  
**ΤΜΗΜΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**VERY HIGH FREQUENCY OMNI RANGE BEACON**  
**VOR**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ**  
**ΓΕΩΡΓΟΥΛΗ ΔΕΣΠΟΙΝΑ**

**ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**  
**ΛΟΥΒΡΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝΑΣ**

**ΝΑΥΠΑΚΤΟΣ 2009**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην αεροναυτιλία για τον προσδιορισμό της θέσης του ένα αεροσκάφος χρησιμοποιεί κυρίως το VOR (Very high frequency Omni Range beacon). Η παρούσα εργασία αφού εκθέσει βασικές έννοιες, μελετά πως ένα αεροσκάφος εκμεταλλεύεται το σήμα του VOR καθώς και τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει το σήμα του, ώστε να αποδίδει την απαιτούμενη πληροφορία (καθορισμός θέσης στο χώρο).

Στη συνέχεια προχωρά στην ανάλυση της λειτουργίας του VOR, την εσωτερική του δομή καθώς και τον τρόπο ακτινοβολίας του τελικού του σήματος ώστε αυτό να είναι εκμεταλλεύσιμο.

Ακόμα αναλύονται τα σφάλματα που είναι εγγενή με το σύστημα και αναφέρονται γενικές μέθοδοι για την μείωσή τους στο ελάχιστο.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Αζιμούθιο, Δέκτης, Διαμόρφωση AM, Διαμόρφωση FM, Δίπολος Κεραία, Κεραία Alford Loop, Πομπός, Σύστημα Πολικών Συντεταγμένων, DME, ILS, NDB, Sideband

## **ABSTRACT**

In air navigation, for the determination of the position of an aircraft, VOR, (Very high frequency Omni Range beacon), is mainly used. The present work refers to basic knowledge, studies the way an aircraft takes advantage of the VOR signal, as well as, the technical characteristics, this signal must have, so as to attribute the required information (determination of position in space).

Next, advances to the analysis of the functions of the VOR system, its internal structure, as well as, how the final VOR signal is emitted in space, so as, it can be exploitable.

The errors that are inherent with the system are analyzed and general methods for their minimization are described.

**KEYWORDS:** Amplitude Modulation, Alford Loop Antenna, Azimuth, Bipolar Antenna, Frequency Modulation, Receiver, Transponder, Polar Coordinate System, DME, ILS, NDB, Sideband

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο σκοπός της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι να προσθέσω ένα λιθαράκι στην καταγραφή της γνώσης που είναι κτήμα ορισμένων εταιριών ή ενασχολούμενων με την αεροναυτιλία.

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας αναφέρεται σε θέματα μελέτης του ραδιοναυτιλιακού βοηθήματος που ονομάζεται VOR (Very high frequency Omni Range beacon – Πανκατευθυντικός Αεροναυτιλιακός Ραδιοφάρος πολύ υψηλής συχνότητας). Με τη βοήθεια του συστήματος αυτού τα αεροσκάφη γνωρίζουν την πορεία τους, τη θέση τους και την πορεία που πρέπει να ακολουθήσουν για να ολοκληρώσουν την πτήση τους. Επίσης οι υπηρεσίες εδάφους ενημερώνονται ανά πάσα στιγμή που βρίσκεται το κάθε αεροσκάφος και έτσι μπορούν να ρυθμίσουν την υπόλοιπη εναέρια κυκλοφορία.

Η δομή της διπλωματικής εργασίας έχει ως εξής:

Στην αρχή γίνεται μία εισαγωγή για να παρουσιαστεί η δομή της αεροναυτιλίας, πως διεκπεραιώνεται η αεροναυτική κίνηση, τι εξοπλισμός απαιτείται και με ποιο τρόπο γίνεται η εκμετάλλευσή του από το εμπλεκόμενο προσωπικό. Επίσης αναφέρονται τα διάφορα βοηθήματα που χρησιμοποιούνται στην αεροναυτιλία και εξαιρείται η σπουδαιότητα και η ανάγκη που προκύπτει, για τον εντοπισμό της θέσης και της πορείας του αεροσκάφους στο γεωγραφικό χάρτη. Αυτή η αναγκαιότητα δημιουργεί την απαίτηση της ύπαρξης ενός συστήματος που να παρέχει στο χειριστή του αεροσκάφους τη δυνατότητα να εντοπίζει τη θέση του.

Πιο συγκεκριμένα η εργασία επικεντρώνεται:

1. Στην ανάλυση του τρόπου εκμετάλλευσής του VOR
2. Τι χαρακτηριστικά πρέπει να έχει
3. Πως είναι δομημένο
4. Ποιες αδυναμίες έχει και
5. Σε ποια σφάλματα υπόκειται και πως αυτά μπορούν να σταθμιστούν

Το VOR άρχισε να αναπτύσσεται αμέσως μετά τον πόλεμο στη δεκαετία του 1950. Από τότε έως και σήμερα παραμένει το σπουδαιότερο ραδιοναυτιλιακό σύστημα

εξεύρεσης θέσης. Εάν και εφόσον έχουν επινοηθεί και άλλα συστήματα, δεν είναι γνωστό γιατί δεν έχουν καθιερωθεί.

Το VOR είναι σύστημα αρκετά περίπλοκο και απαιτεί υψηλή ακρίβεια στην κατασκευή του. Το πρώτο VOR το κατασκεύασε η FAA (Federal Aviation Administration – Ομοσπονδιακή Αεροπορική Αρχή) και ακολούθησαν πολλές εταιρείες (μέσα σ' αυτές η WILCOX, SEL, η ALCATEL, η TOSHIBA κ.α.). Το κοινό χαρακτηριστικό τους είναι το αποτέλεσμα να είναι ταυτόσημο και η μόνη διαφορά τους η τεχνολογία που χρησιμοποίησαν. Αυτό σημαίνει ότι τα περιθώρια αναβάθμισης του να είναι ελάχιστα έως και μηδαμινά. Μιλάμε λοιπόν για ένα σύστημα Highly Sophisticated με αδυναμίες που όμως απαιτεί υψηλή ακρίβεια στην κατασκευή. Αξίζει να σημειώσουμε ότι είναι μεν σύστημα όχι καινούργιο δεν είναι όμως τυπικό. Συνεπώς είναι σπάνιο, όχι κοινότυπο και δεν υπάρχει εκτενής βιβλιογραφία γι' αυτό.

Η αδυναμία αυτή της προσφυγής στη βιβλιογραφία (ανύπαρκτη), αντισταθμίστηκε από το γεγονός ότι είχα τη δυνατότητα πρόσβασης και πρακτικής απόκτησης γνώσης, αφού στον Κρατικό Αερολιμένα Χίου λειτουργούν δύο τέτοια ραδιοβοηθήματα (VOR). Είχα την ευκαιρία να το δω στην πράξη, να παρακολουθήσω και να εκτελέσω μετρήσεις, καθώς επίσης να δω το τελικό αποτέλεσμα του σήματος VOR και να αποπειραθώ να ερμηνεύσω τα χαρακτηριστικά και τη μορφή του.

Τέλος η μελέτη καλύπτει μόνον την Τεχνολογική άποψη δηλαδή την Αρχή Λειτουργίας του VOR. Οι λεπτομέρειες αναλυτικής εσωτερικής δομής είναι περιττές διότι ποικίλουν από κατασκευαστή σε κατασκευαστή και δεν έχουν ενδιαφέρον διότι το αποτέλεσμα παραμένει ταυτόσημο. Τα περιθώρια αναβάθμισης και βελτιστοποίησης του είναι ελάχιστα διότι όπως προαναφέρθηκε το σύστημα είναι Highly Sophisticated και είναι προδιαγεγραμμένο από τον ICAO (International Civil Aviation Organization – Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας).

Αυτή η πτυχιακή εργασία υλοποιήθηκε από την σπουδάστρια, του τμήματος Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων και Δικτύων του παραρτήματος Ναυπάκτου του ΤΕΙ Μεσολογγίου, Γεωργούλη Ζ. Δέσποινα, από το Παντουκίος Χίου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Λούβρο Σπυρίδωνα, καθηγητή του τμήματος Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων και Δικτύων, καθώς και τον κ. Μαυρικάκη Νικόλαο, Φυσικό Ραδιοηλεκτρολόγο Α, Προϊστάμενο του Γραφείου Συντήρησης Ηλεκτρονικών Συσκευών στον Κρατικό Αερολιμένα Χίου

“ΟΜΗΡΟΣ” της Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας - ΥΠΑ, που όχι μόνο μου παρείχε πολύτιμη βοήθεια για την διεξαγωγή αυτής της μελέτης, αλλά μου χάρισε απλόχερα τις γνώσεις και την εμπειρία πολλών χρόνων. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τα φιλικά μου πρόσωπα για τη ψυχολογική υποστήριξη που μου παρείχαν καθ’ όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας.

Ναύπακτος, Μάιος 2009

Γεωργούλη Ζ. Δέσποινα

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	6
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	8
ΠΙΝΑΚΑΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ.....	10
ΜΕΡΟΣ 1 «ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΟΙΕΣ» .....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	11
1.1 Εισαγωγή .....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	17
2.1 Σύστημα Αναφοράς.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	20
3.1 Μερικές Έννοιες Από Τη Θεωρία Κεραιών .....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....	22
4.1 Διαμόρφωση Σημάτων .....	22
ΜΕΡΟΣ 2 «ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ VOR» .....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	26
1.1 Αρχή Λειτουργίας Του VOR.....	26
1.1.1 Γνωρίσματα Του VOR .....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	30
2.1 Χαρακτηριστικά Του Reference.....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	32
3.1 Χαρακτηριστικά Του Variable.....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....	37
4.1 Λήψη Δέκτη Αεροσκάφους .....	37

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</b> .....	<b>40</b>
<b>5.1 Δομή Σταθμού VOR</b> .....	<b>40</b>
<b>ΜΕΡΟΣ 3 «ΚΕΡΑΙΑ ALFORD LOOP»</b> .....	<b>42</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> .....	<b>42</b>
<b>1.1 Κεραία Loop Στο Χώρο (Free Space)</b> .....	<b>42</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b> .....	<b>44</b>
<b>2.1 Κεραία Alford Loop</b> .....	<b>44</b>
<b>2.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Κεραίας Alford Loop</b> .....	<b>44</b>
<b>2.2.1 Δομή Κεραίας Alford Loop</b> .....	<b>44</b>
<b>2.2.2 Διασύνδεση Κεραίων Alford Loop Στην Κεραία VOR</b> .....	<b>44</b>
<b>2.2.3 Λειτουργία Κυκλώματος Διασύνδεσης Του Σχ. 3.2.2</b> .....	<b>49</b>
<b>ΜΕΡΟΣ 4 «ΣΦΑΛΜΑΤΑ VOR»</b> .....	<b>51</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> .....	<b>51</b>
<b>1.1 Σφάλματα VOR</b> .....	<b>51</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b> .....	<b>60</b>
<b>2.1 Μελέτη Σφάλματος VOR</b> .....	<b>60</b>
<b>ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	<b>66</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>67</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α</b> .....	<b>68</b>
<b>ΚΩΔΙΚΑΣ MATLAB</b> .....	<b>68</b>



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1.1 – Επίγειος Σταθμός DME.....	14
Σχήμα 1.2.1 – Σύστημα Πολικών Συντεταγμένων .....	19
Σχήμα 1.3.1 – (α) Δίπολος Κεραία και Διαγράμματα Ακτινοβολίας αυτής κατά το επίπεδό της – Ακτινοβολία Κεραίας $\lambda/2$ κατά το κάθετο επίπεδο .....	21
Σχήμα 1.3.1 – (β) Διαγράμματα Ακτινοβολίας Κεραίων πολλαπλάσιων της $\lambda/2$ ( $1\lambda$ και $3\lambda/2$ ) .....	21
Σχήμα 1.4.1 – Διαμόρφωση κατά Πλάτος.....	24
Σχήμα 2.1.1 – Επίγειος Σταθμός VOR.....	27
Σχήμα 2.2.1 – Διανυσματική Παράσταση Σήματος Reference.....	31
Σχήμα 2.2.2 – Κατά Πλάτος Διαμορφούσα 9960Hz.....	31
Σχήμα 2.3.1 – Διανυσματική Παράσταση Σήματος Variable.....	33
Σχήμα 2.3.2 – (α) Τυπικό Κύκλωμα παραγωγής των Sidebands.....	34
Σχήμα 2.3.2 – (β) $SB_1$ και $SB_2$ .....	35
Σχήμα 2.4.1 – Σύνθετο σήμα του VOR .....	38
Σχήμα 2.4.2 – Δέκτης VOR Αεροσκάφους.....	39
Σχήμα 2.5.1 – Δομή Σταθμού VOR .....	41
Σχήμα 3.1.1 – Κεραία Loop.....	43

Σχήμα 3.2.1 – Δομή Κεραίας Alford Loop.....	46
Σχήμα 3.2.2 – Διάγραμμα Ακτινοβολίας Κεραίας Alford Loop .....	46
Σχήμα 3.2.2.1 – Διάταξη Κεραιών Alford Loop.....	47
Σχήμα 3.2.2.2 – Διασύνδεση Κεραιών Alford Loop.....	48
Σχήμα 4.1.1 – Duantal Error μεταξύ των κεραιών του ίδιου ζεύγους .....	53
Σχήμα 4.1.2 – Duantal Error μεταξύ των κεραιών και των δύο ζευγών ταυτοχρόνως .....	54
Σχήμα 4.1.3 – Double Duantal Error .....	55
Σχήμα 4.1.4 – Μέγιστη τιμή Σφάλματος Duantal.....	56
Σχήμα 4.1.5 – Quadrantal Error .....	58
Σχήμα 4.1.6 – Octantal Error .....	59

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 1 – Κατανομή Σφάλματος στον κύκλο .....	63
Γράφημα 2 – Σταθερός όρος $E_0$ .....	63
Γράφημα 3 – Πρώτος όρος (Duantal Error) .....	64
Γράφημα 4 – Δεύτερος όρος (Quadrantal Error) .....	64
Γράφημα 5 – Τρίτος όρος (Σφάλμα 90Hz).....	65
Γράφημα 6 – Τέταρτος όρος (Octantal Error).....	65

## ΜΕΡΟΣ 1 «ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ»

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

#### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάπτυξη των αερομεταφορών δημιούργησε την ανάγκη της ασφάλειας των πτήσεων. Για να είναι οι πτήσεις ασφαλείς θα πρέπει όχι μόνο να εξασφαλίζεται η καλή λειτουργία των χρησιμοποιούμενων μέσων (αεροσκάφη κ.τ.λ.) αλλά θα πρέπει τα αεροσκάφη να πετούν σε σαφώς καθορισμένες διαδρομές, όπως επίσης και οι υπηρεσίες εδάφους να γνωρίζουν σε ποια φάση βρίσκεται η εξέλιξη μιας συγκεκριμένης πτήσης.

Σήμερα που οι αερομεταφορές κατέχουν πρωτεύουσα θέση στον τρόπο μετακίνησης των ανθρώπων και η εναέρια κυκλοφορία είναι αυξημένη, η ασφάλεια των πτήσεων έχει τον πρώτο λόγο.

Έτσι ο εναέριος χώρος κάθε κράτους χαρτογραφείται δηλαδή καθιερώνονται διαδρομές τις οποίες ονομάζουμε αεροδιαδρόμους. Τα αεροσκάφη επομένως είναι φανερό ότι δεν μπορούν να πετούν οπουδήποτε ή όπου επιθυμεί ο κυβερνήτης τους παρά μόνο στις πιο πάνω σαφώς καθορισμένες διαδρομές. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται μια οργάνωση της ροής της κίνησης των αεροσκαφών στον εναέριο χώρο με αποτέλεσμα τα αεροσκάφη να γνωρίζουν που πρέπει να κινούνται και οι υπηρεσίες εδάφους αντίστοιχα να γνωρίζουν που βρίσκεται κάθε αεροσκάφος και πως εξελίσσεται η κίνησή του (πτήση). Αυτή η χαρτογράφηση του εναέριου χώρου δεν είναι μία απλή υπόθεση δεδομένου ότι συνίσταται και από ένα πλήθος κανονισμών που δεν είναι σκόπιμο να εκθέσουμε εδώ.

Όμως εύλογο είναι το ερώτημα πως είναι δυνατόν στον αέρα να έχουμε χάρτες και δρόμους. Και όμως στις σύγχρονες μέρες με τη βοήθεια της ηλεκτρονικής τεχνολογίας είναι δυνατόν να καθοριστούν σαφώς διαδρομές στον αέρα οι οποίες ορίζονται από ηλεκτρονικές συσκευές που έχουν εγκατασταθεί σε συγκεκριμένες θέσεις στο έδαφος. Συμπληρωματικά αναφέρομε πως οι διαδρομές αυτές (στη συνέχεια θα αναφέρονται σαν αεροδιάδρομοι) δεν μπορεί να είναι καμπύλες παρά μόνο ευθύγραμμα τμήματα. Η λογική είναι απλή, αφού ένα ευθύγραμμο τμήμα ορίζεται με δύο σημεία. Στην περίπτωσή μας αυτά τα σημεία ταυτίζονται με την αρχή και το τέλος αντίστοιχα των ευθύγραμμων τμημάτων. Επίσης λογικό είναι πως αυτά τα ευθύγραμμα τμήματα πρέπει να είναι διαδοχικά, δηλαδή το τέλος του ενός να

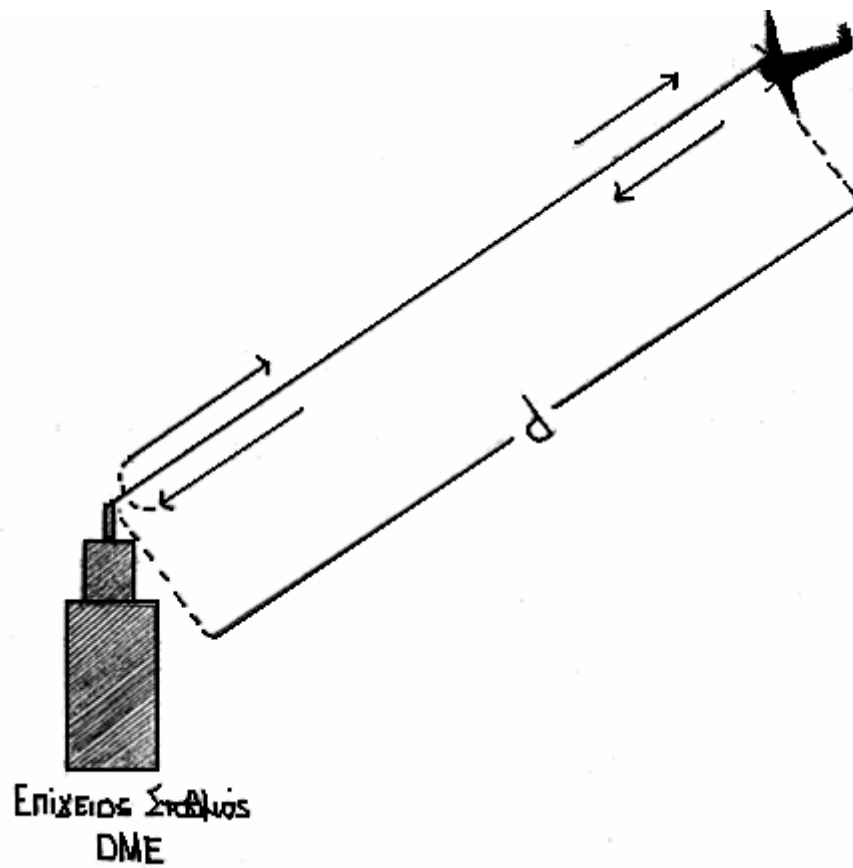
συμπίπτει με την αρχή του επομένου. Συμπερασματικά ένας αεροδιάδρομος θα είναι πάντα μία ευθεία γραμμή και οπωσδήποτε όχι καμπύλη. Νοητές λοιπόν τεθλασμένες γραμμές είναι όλες οι διαδρομές πλην όμως είναι απόλυτα και σαφώς καθορισμένες.

Για τον ακριβή προσδιορισμό της αρχής και του τέλους ενός αεροδιαδρόμου όπως είπαμε προηγουμένως σε κάθε σημείο είναι εγκατεστημένη μία ηλεκτρονική συσκευή, σχεδόν πάντα ηλεκτρομαγνητικού τύπου η οποία ονομάζεται γενικά αεροναυτιλιακό ραδιοβοήθημα.

Τα ραδιοβοήθημα που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς είναι τα εξής:

- 1) Ο τετρακτινικός ραδιοφάρος (δεν χρησιμοποιείται πλέον)
- 2) Ο μη κατευθυντικός ραδιοφάρος (Non Directional Beacon - NDB) είναι ένας απλός πομπός χαμηλών συχνοτήτων (Long Waves) της τάξης μερικών εκατοντάδων KHz, ο οποίος εκπέμπει ένα σήμα RF (Radio Frequency) που φέρει μόνο μία διαμόρφωση AM με το χαρακτηριστικό του όνομα σε μορσικό αλφάβητο. Το σήμα αυτού του πομπού (ραδιοφάρου) αξιοποιούν τα αεροσκάφη με αντίστοιχο δέκτη που βρίσκεται εγκατεστημένος στα αεροσκάφη. Ο δέκτης του αεροσκάφους είναι εξοπλισμένος με δύο κεραίες, ίδιας απολαβής, μία κατευθυντική (συνήθως κυκλικό βρόγχο- circular loop) η οποία έχει τη δυνατότητα να στρέφεται, και μία δίπολη κατακόρυφη πανκατευθυντική. Τα σήματα που προέρχονται από τις δύο κεραίες συγκρίνονται ως προς τη στάθμη τους και η κατευθυντική κεραία στρέφεται έως ότου αυτά εξισωθούν. Η διεύθυνση που είναι κάθετη στο επίπεδο της κεραίας βρόγχου δείχνει την κατεύθυνση της ακτινικής απόστασης NDB αεροσκάφους. Εξυπακούεται πως η μέτρηση που έγινε εμπεριέχει αβεβαιότητα (σφάλμα)  $180^\circ$ , γεγονός που δείχνει ότι το σύστημα είναι εντελώς αναξιόπιστο και δεν θα ήταν δυνατόν να αξιοποιηθεί στην αεροναυτιλία, όπου οι ταχύτητες είναι μεγάλες και η απαιτούμενη ασφάλεια υψηλή. Ευτυχώς η αβεβαιότητα αυτή μπορεί να αρθεί πλήρως με την πραγματοποίηση και άλλης μέτρησης από διαφορετική θέση όπου επειδή η διόπτρευση είναι διαφορετική έχουμε δύο τεμνόμενες ευθείες η τομή των οποίων ταυτίζεται με τη θέση εγκατάστασης του NDB. Απομένει μόνο ένα σφάλμα το οποίο οφείλεται στην ποιότητα του δέκτη, στην οξύτητα των διαγραμμάτων ακτινοβολίας των κεραιών και στην ακρίβεια του μηχανισμού στρέψεως της κεραίας το οποίο δεν εξαλείφεται, είναι σχετικά μεγάλο και γι' αυτό λέμε ότι το NDB είναι ένα ραδιοβοήθημα όχι μεγάλης ακρίβειας. Πρέπει να σημειώσουμε ότι ο ραδιοφάρος είναι παλαιάς αρχής πλην όμως δεν έχει καταργηθεί.

- 3) Ο πανκατευθυντικός ραδιοφάρος VHF (Very high frequency Omni Range beacon - VOR). Το αεροσκάφος με τη βοήθεια κατάλληλου δέκτη VOR αποκωδικοποιεί την αζιμουθιακή θέση του (γωνία  $\theta$ ) σε μοίρες από το μαγνητικό Βορρά. Τη λειτουργία του VOR θα την εκθέσουμε αναλυτικά.
- 4) Το σύστημα μέτρησης απόστασης (Distance Measuring Equipment - DME) το οποίο δίδει στο αεροσκάφος απόσταση σε ναυτικά μίλια από αυτό. Η αρχή λειτουργίας του DME στηρίζεται στο χρόνο διαδρομής που απαιτείται για να διανυθεί η απόσταση DME – αεροσκάφος από το ηλεκτρομαγνητικό κύμα που εκπέμπεται. Το σύστημα μέτρησης της απόστασης (Distance Measuring) αποτελείται από τον επίγειο σταθμό ο οποίος ονομάζεται transponder και από αντίστοιχο σταθμό εγκατεστημένο στο αεροσκάφος ο οποίος ονομάζεται interrogator. Ο interrogator ξεκινάει ερώτηση (εκπομπή) προς τον επίγειο σταθμό και ο επίγειος σταθμός απαντά προς το αεροσκάφος. Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα επομένως που εκπέμπεται από το αεροσκάφος ταξιδεύει την απόσταση  $d$  έως τον επίγειο σταθμό, Σχήμα 1.1.1, και επανεκπέμπεται από το σταθμό εδάφους προς το αεροσκάφος διανύοντας και πάλι την απόσταση  $d$ . Ο σταθμός του αεροσκάφους επομένως αφού κάνει λήψη της εκπομπής του σταθμού εδάφους γνωρίζει πόσος χρόνος απαιτήθηκε για να διανυθεί η απόσταση δύο φορές. Από το τύπο της ευθύγραμμης ομαλής κίνησης έχουμε  $2d=c*t$  ή αλλιώς  $d=c*t/2$ . Είναι σε θέση επομένως ο κυβερνήτης του αεροσκάφους να γνωρίζει την απόστασή του από τη θέση του ραδιοβοηθήματος. Βεβαίως το σύστημα είναι αρκετά πολύπλοκο δεν θα μπούμε όμως σε λεπτομέρειες, θα επισημάνουμε μόνο ότι η ερώτηση και η απάντηση γίνονται σε ταυτόσημο ψευδοτυχαίο κώδικα, στον interrogator και στον transponder, ο πομπός και ο δέκτης λειτουργούν ταυτόχρονα με κοινή κεραία και το DME έχει την ικανότητα να εξυπηρετεί ταυτόχρονα έως και 200 αεροσκάφη με μοναδική αντιστοιχία για το καθένα. Το DME λειτουργεί στα μικροκύματα στην περιοχή συχνοτήτων του 1GHz. Όπως θα δούμε παρακάτω και επειδή είναι συνεργαζόμενο σύστημα με το VOR οι συχνότητες λειτουργίας DME και VOR είναι ζευγαρωμένες (καναλοποίηση).



Σχήμα 1.1.1 - Επίγειος σταθμός DME

- 5) Το αυτόματο σύστημα προσγείωσης (Instrument Landing System - ILS) το οποίο καθοδηγεί το αεροσκάφος έως το σημείο προσγείωσης (κατώφλι). Το εν λόγω σύστημα αποτελείται από δύο υποσυστήματα (δύο σταθμούς) όπου το ένα σύστημα παρέχει πλευρική καθοδήγηση στο αεροσκάφος και ονομάζεται Localizer και το άλλο σύστημα παρέχει κατακόρυφη καθοδήγηση και ονομάζεται Glide Path. Το Localizer λειτουργεί στην περιοχή συχνοτήτων 108.10MHz έως 111.95MHz και το Glide Path από 329.15MHz έως 334.70MHz. Το ILS εγκαθίσταται μέσα στα αεροδρόμια γιατί εμπλέκεται στην τελική φάση της εξέλιξης μιας πτήσης (προσγείωση). Επειδή το ILS είναι ένα σύστημα που τα σήματα εκπέμπονται με έντονο κατευθυντικό τρόπο και οι ταχύτητες των αεροσκαφών μεγάλες, ο χειριστής του αεροσκάφους πρέπει έγκαιρα να ανιχνεύσει το ILS ώστε να μπορέσει να αξιοποιήσει τη βοήθειά του. Για το σκοπό αυτό το ILS υποστηρίζεται και από τέσσερις ακόμα συσκευές οι τρεις από τις οποίες ονομάζονται markers η δε τέταρτη είναι ένα DME που δίδει στο αεροσκάφος απόσταση από το κατώφλι (σημείο επαφής αεροσκάφους με το έδαφος – touch down). Το DME εγκαθίσταται μέσα στον αερολιμένα μαζί με το ILS και τα markers εγκαθίστανται εκτός του αεροδρομίου και σε διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ τους στην προέκταση του ίχνους του ILS σε απόσταση από το αεροδρόμιο. Αυτά τα markers αξιοποιούνται από το αεροσκάφος για τον εντοπισμό του ίχνους του ILS πολύ νωρίτερα και πριν αρχίσει η εκμετάλλευση του κυρίως συστήματος. Επειδή το Localizer και το Glide Path είναι υποσυστήματα του ίδιου συστήματος, οι συχνότητες είναι ζευγαρωμένες (καναλοποίηση).
- 6) Το Radar της πολιτικής αεροπορίας είναι ένα σύστημα ραδιοεντοπισμού των αεροσκαφών στο χώρο και αποτελείται από δύο υποσυστήματα, τα εξής:
- (α) Το Πρωτεύον Radar (Primary Radar) το οποίο ανιχνεύει την ύπαρξη αεροσκάφους σε συγκεκριμένο χώρο, την ταχύτητα και την κατεύθυνση κίνησής του.
- (β) Το Δευτερεύον Radar (SSR-Secondary Surveillance Radar) το οποίο μπορεί να αποδίδει πολύ περισσότερα στοιχεία, πάντα όμως σε συνεργασία με το υπό-εξέταση αεροσκάφος. Οι συχνότητες λειτουργίας του Radar είναι στην περιοχή των μικροκυμάτων.
- Η λειτουργία του πρωτεύοντος Radar είναι παλμική και στηρίζεται στην ιδιότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος να ανακλάται από τα αντικείμενα στα οποία προσπίπτει ιδιαίτερα όταν αυτά είναι αγωγίμα. Αποτελείται επομένως από ένα πομπό υψηλής πυκνότητας ισχύος και μία κατευθυντική κεραία η οποία σαρώνει τον ορίζοντα και φορτίζει με ηλεκτρονική ακτινοβολία τα αντικείμενα που βρίσκονται στην εμβέλεια



του, και από ένα δέκτη υψηλής ευαισθησίας ο οποίος ενεργοποιείται αμέσως μετά από κάθε εκπομπή για κάποιο χρονικό διάστημα και ανιχνεύει τις ανακλάσεις που προκύπτουν από τα διάφορα αντικείμενα. Αφού τις επεξεργαστεί τις απεικονίζει σε μία οθόνη.

Η λειτουργία του δευτερεύοντος Radar είναι ανάλογη με εκείνη του DME με τη διαφορά ότι ο interrogator βρίσκεται στο έδαφος και ο transponder στο αεροσκάφος. Στις απαντήσεις των αεροσκαφών εμπεριέχονται πληροφορίες όπως τύπος αεροσκάφους, αριθμός πτήσης, επίπεδο πτήσης, κ.τ.λ. οι οποίες και απεικονίζονται στην οθόνη του πρωτεύοντος Radar σε πλαίσιο δίπλα από τον αντίστοιχο στόχο.

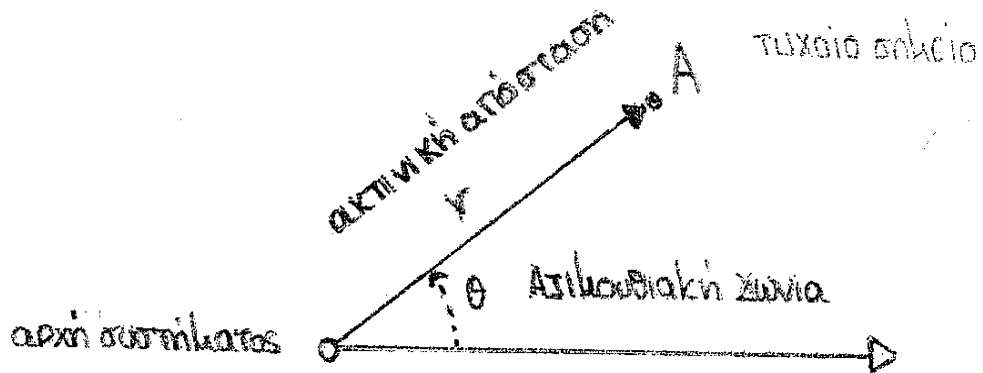
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (THE REFERENCE SYSTEM)

Ο πραγματικός χώρος που είναι αντιληπτός και από τις ανθρώπινες αισθήσεις περιγράφηκε από τον Ευκλείδη και τυποποιήθηκε οριστικά από τον Rene Descartes. Είναι γνωστό λοιπόν πως ο πραγματικός χώρος περιγράφεται πλήρως από ένα σύστημα συντεταγμένων που ονομάζεται καρτεσιανό που όμως δεν είναι ο μοναδικός τρόπος περιγραφής του. Στον πραγματικό αυτό χώρο ορίζεται ένα ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων, το οποίο ονομάζουμε καρτεσιανό σύστημα. Επομένως κάθε σημείο του χώρου μπορεί να περιγραφεί με τρεις αριθμούς που ονομάζονται συντεταγμένες του σημείου. Αυτό το σύστημα συντεταγμένων είναι πλήρες αλλά όχι μοναδικό. Υπάρχουν πολλά συστήματα συντεταγμένων. Εμείς θα επιλέξουμε το σύστημα πολικών συντεταγμένων γιατί ταιριάζει στην περίπτωση μας. Στο σύστημα πολικών συντεταγμένων κάθε σημείο  $A$  του επιπέδου μπορεί να προσδιοριστεί πλήρως από την ακτινική απόσταση (επιβατική ακτίνα), από την αρχή του συστήματος και από την Αζιμουθιακή γωνία (γωνία που σχηματίζεται από την επιβατική ακτίνα και από την αρχή μέτρησης του Αζιμούθιου), Σχήμα 1.2.1. Επομένως στο σύστημα πολικών συντεταγμένων οι συντεταγμένες είναι δύο, η ακτινική απόσταση και η Αζιμουθιακή γωνία, το οποία ονομάζονται αλλιώς  $Rho$ - $Theta$  ( $r$ - $\theta$ ). Σε αυτό το σύστημα πολικών συντεταγμένων που αναφέρεται στο επίπεδο αν προσθέσουμε και τη συντεταγμένη του ύψους σε ένα νοητό άξονα  $z$  κάθετο στο επίπεδο  $r$ - $\theta$  δημιουργούμε ένα νέο τρισδιάστατο αζιμουθιακό σύστημα συντεταγμένων το οποίο ονομάζουμε σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων, και επομένως ένα οποιοδήποτε σημείο του Ευκλείδειου πραγματικού χώρου μπορεί να προσδιοριστεί σαφώς από τις συντεταγμένες  $r$ ,  $\theta$ ,  $z$ . Αυτό το σύστημα συντεταγμένων έχει επιλεγεί να χρησιμοποιείται στην αεροναυτιλία γιατί με τη βοήθεια των ραδιοβοηθημάτων που αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ένα αεροσκάφος μπορεί να ανακτήσει μία απόσταση από ένα ραδιοβοήθημα (DME) ενώ ταυτόχρονα μπορεί να ανακτήσει μία Αζιμουθιακή θέση (γωνία) από την ίδια όπως προηγούμενα θέση ραδιοβοηθήματος (συνεγκατεστημένο VOR) αρκεί βεβαίως να ορίσουμε την αρχή μέτρησης του Αζιμούθιου  $\theta$ . Επίσης το ύψος  $z$  μπορεί να ανακτηθεί από ένα όργανο που ονομάζεται Altimeter (μέτρηση ύψους μέσω της βαρομετρικής πίεσης

του τύπου). Αυτή η αρχή επιλέγεται να είναι ο Μαγνητικός Βορράς. Οποιαδήποτε αναφορά στα επόμενα θα είναι σε σχέση με το Μαγνητικό Βορρά.

Τέλος, είναι προφανές ότι το VOR και το DME επειδή είναι συνεργαζόμενα πρέπει να είναι και συνεγκατεστημένα (co-located) γιατί η θέση τους είναι και η αρχή του συστήματος αναφοράς.

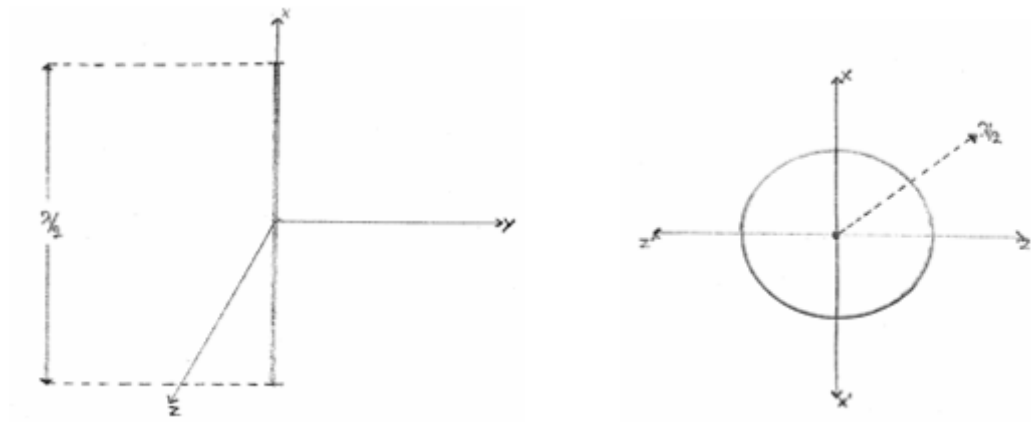


Εικόνα 1.2.1 - Σύστημα Πολικών Συντεταγμένων

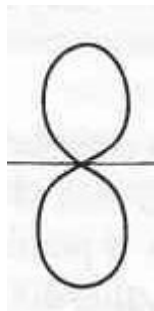
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3.1 ΜΕΡΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΚΕΡΑΙΩΝ

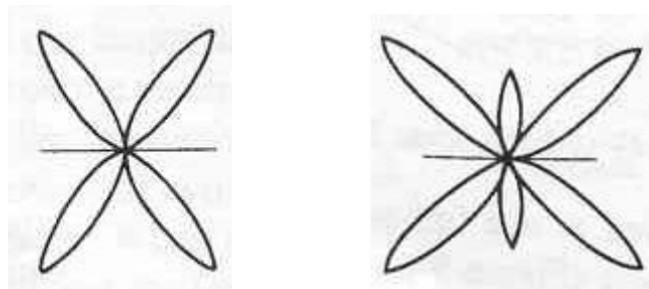
Όταν θέλουμε να ακτινοβολήσουμε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα στο χώρο είναι απαραίτητο να συνδέσουμε στον πομπό μας ένα σύστημα ακτινοβολίας ή απλά μία κεραία. Είναι γνωστό από τη θεωρία των κεραιών ότι η πιο απλή κεραία είναι η δίπολος κεραία  $\lambda/2$  η οποία έχει μελετηθεί πλήρως από πολύ νωρίς και έχει ένα διάγραμμα ακτινοβολίας που φαίνεται στο Σχήμα 1.3.1 (α). Στο Σχήμα φαίνονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας στο επίπεδο της κεραίας και στο κάθετο προς αυτό. Παρατηρούμε ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο που είναι κάθετο στο επίπεδο της κεραίας εμφανίζει κατευθυντικότητα εκ' περιστροφής, ενώ κατά το επίπεδο της κεραίας είναι ομοιόμορφα κυκλικό. Εμφανίζει μία ελαφρά κατευθυντικότητα η οποία θα μας εξυπηρετούσε εάν ήταν μεγαλύτερη. Υπάρχει πλήθος κεραιών που άλλες έχουν μελετηθεί και άλλες όχι πλην όμως το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας κεραίας έχει άμεση σχέση με το μήκος της μετρημένο σε  $\lambda/2$  καθώς επίσης εξαρτάται από την γειννίαση άλλων αγωγίμων αντικειμένων του άμεσου περιβάλλοντός της. Εν κατακλείδι πρέπει να επισημάνουμε πως, όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος μιας κεραίας σε σχέση με το  $\lambda/2$  τόσο περισσότερους παρασιτικούς λοβούς έχει το διάγραμμα ακτινοβολίας αυτής. Παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 1.3.1 (β) όπου παρουσιάζονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας τριών κεραιών με μήκη πολλαπλάσια του  $\lambda/2$ . Όμως οι κεραίες αυτές δεν είναι χρήσιμες για την περίπτωση του VOR, δεδομένου ότι το VOR απαιτεί κάποια μικρή κατευθυντικότητα, όμως κυρίως απαιτεί ομοιόμορφη ακτινοβολία στον ορίζοντα. Αυτή η ομοιομορφία μας οδηγεί στη χρήση μιας κεραίας  $\lambda/2$  τροποποιημένης, όπως την ανέδειξε ο Alford που πήρε και το όνομά της, Alford Loop, και θα τη δούμε αναλυτικότερα στο κεφάλαιο της περιγραφής του VOR.



(α) Δίπολος Κεραία και διάγραμμα ακτινοβολίας αυτής κατά το επίπεδό της



Ακτινοβολία κεραίας  $\lambda/2$  κατά το κάθετο επίπεδο



(β) Διαγράμματα Ακτινοβολίας κεραιών πολλαπλάσιων της  $\lambda/2$  ( $1\lambda$  και  $3\lambda/2$ )

Σχήμα 1.3.1

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### 4.1 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ

Προκειμένου να μεταφερθεί μία πληροφορία από ένα σημείο σε ένα άλλο απομακρυσμένο, είναι απαραίτητο να εξευρεθεί ένας δίαυλος κατάλληλου μέσου ώστε η πληροφορία μας να μεταφερθεί από τη θέση Α στη θέση Β. Οι δίαυλοι επικοινωνίας μπορεί να είναι ποικίλοι π.χ. ένα ενσύρματο δίκτυο, ένα ασύρματο μέσο (αέρας, κενό, κενό αέρος, ένα οπτικό μέσο, κ.τ.λ.). Όταν πρόκειται να μεταφέρουμε μία πληροφορία από ένα σημείο σε ένα άλλο πρέπει να βρούμε ένα αποτελεσματικό τρόπο μετάδοσης για να μεταφέρουμε την πληροφορία αναλλοίωτη. Μεταξύ δύο απομακρυσμένων σημείων ένας καλός τρόπος επικοινωνίας είναι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Η πληροφορία που συνήθως είναι χαμηλού ρυθμού δεν είναι δυνατόν να διαδοθεί σε μακρινές αποστάσεις διά ακτινοβολίας από μόνη της. Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα υψηλής συχνότητας όμως, μπορεί να διαδοθεί σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις. Έτσι επινοήθηκε να φορτώνεται η πληροφορία πάνω σ' ένα υψίσυχο κύμα και αυτό που μπορεί να διαδίδεται να την κουβαλάει. Το υψίσυχο κύμα ονομάζεται Carrier ή φέρον η δε φορτωμένη πληροφορία ονομάζεται διαμορφούσα ή modulation. Ανάλογα με τον τρόπο – μέσο που διαμορφώνουμε το Carrier με τη διαμορφούσα πληροφορία διακρίνουμε διαφόρους τύπους διαμόρφωσης που είναι οι εξής:

- 1) Διαμόρφωση συνεχούς κύματος (Continuous Wave - CW), στην οποία διακόπτεται και αποκαθίσταται το πλάτος του φέροντος  $f_c$  στο ρυθμό της πληροφορίας.
- 2) Διαμόρφωση κατά πλάτος (Amplitude Modulation - AM), όπου το φέρον  $f_c$  διαμορφώνεται κατά το πλάτος του από την διαμορφούσα  $f_m$  (που εμπεριέχει την πληροφορία).
- 3) Διαμόρφωση κατά συχνότητα (Frequency Modulation - FM), όπου η συχνότητα του φέροντος  $f_c$  διαμορφώνεται γύρω από μία κεντρική τιμή ( $f_c \pm \Delta f$ ) με απόκλιση  $\Delta f$ , οποία είναι ανάλογη με τη διαμορφούσα συχνότητα  $f_m$  η οποία και περιέχει την πληροφορία.
- 4) Διαμόρφωση κατά φάση (Phase modulation), στην οποία διαμορφώνεται η φάση με τη διαμορφούσα  $f_m$ .
- 5) Διαμόρφωση πλευρικής ζώνης (Sideband Modulation), όπου η φέρουσα  $f_c$  διαμορφώνεται κατά πλάτος από την διαμορφούσα  $f_m$  πλην όμως σε κανέναν από

τους παρακάτω τύπους διαμόρφωσης δεν εκπέμπεται η φέρουσα αλλά μόνο η μία ή και οι δύο πλευρικές.

α) DSB (Double SideBand)

β) SSB (Single SideBand)

i) LSB (Lower SideBand)

ii) USB (Upper SideBand)

- 6) Παλμοκωδική Διαμόρφωση (Pulse Code Modulation - PCM).
- 7) Διαμόρφωση θέσης παλμού (Pulse Position Modulation - PPM).
- 8) Διαμόρφωση FSK (Frequency Shift Keying).
- 9) Διαμόρφωση Raw Data Over Carrier Transmit (εκπομπή πακέτου δεδομένων χωρίς άλλη επεξεργασία) κ.τ.λ.

Από τις πιο πάνω περιπτώσεις ενδιαφέρον για μας παρουσιάζουν μόνο η διαμόρφωση κατά πλάτος και η διαμόρφωση κατά συχνότητα.

- 1) Στη διαμόρφωση κατά πλάτος έχουμε ένα ημιτονικό σήμα

$$f_c(t) = C \cdot \sin \omega_c \cdot t \quad (1)$$

και ένα συνημιτονικό σήμα

$$f_m(t) = M \cdot \cos \omega_m \cdot t \quad (2)$$

Με τον περιορισμό

$$\omega_m \ll \omega_c$$

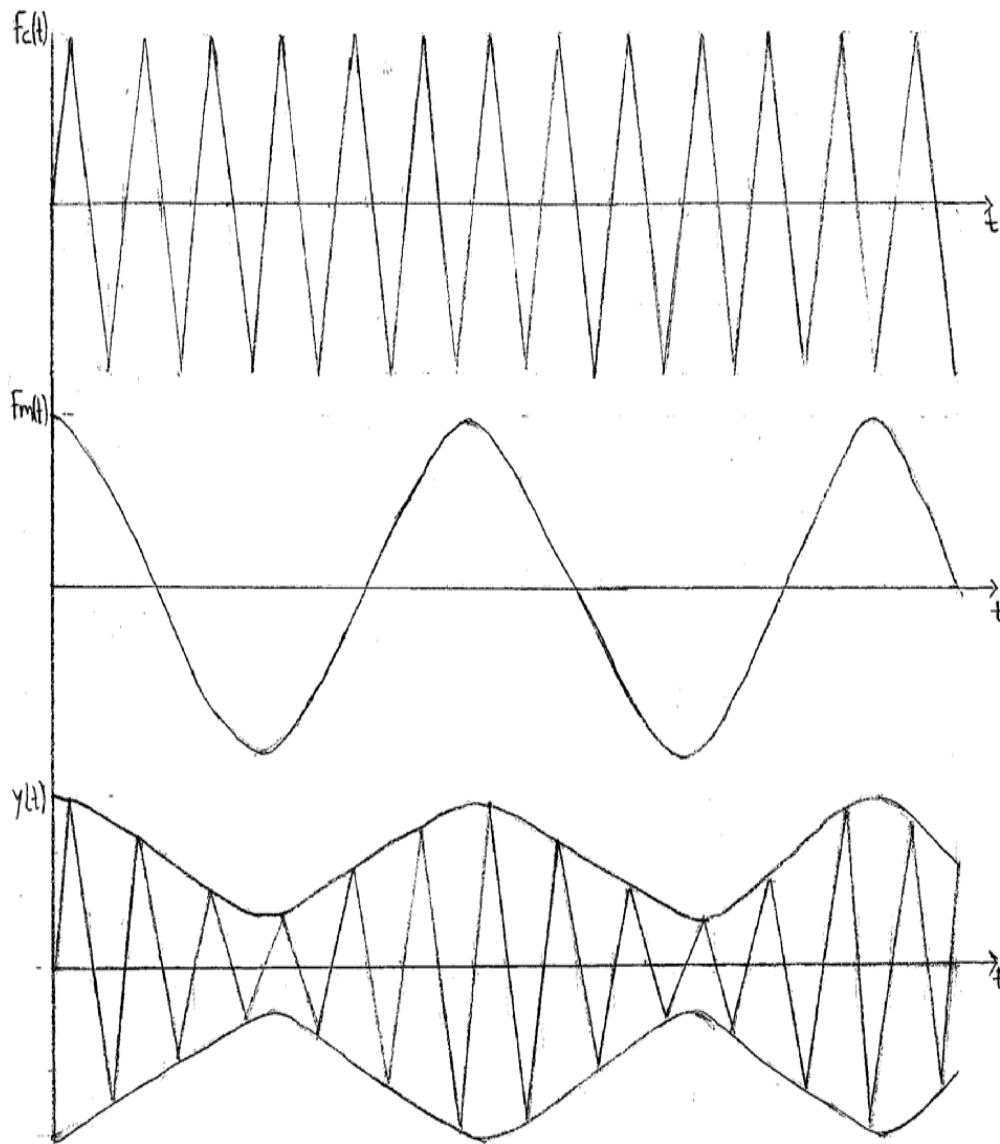
Η διαμόρφωση κατά πλάτος προκύπτει από το γινόμενο αυτών των δύο δηλαδή,

$$y(t) = [C + f_m(t)] \cdot f_c(t) = C \cdot \sin \omega_c \cdot t + M/2 \cdot \sin[(\omega_c + \omega_m) \cdot t] + M/2 \cdot \sin(\omega_c - \omega_m) \quad (3)$$

Η σταθερά της εξίσωσης (1) αυθαίρετα επιλέχθηκε να είναι 1 για λόγους απλότητας (βλέπε Σχήμα 1.4.1).

Ο βαθμός διαμόρφωσης του φέροντος κύματος ονομάζεται δείκτης διαμόρφωσης ή και βάθος διαμόρφωσης, μετρείται επί τοις εκατό (%) και είναι το πηλίκο  $M/C$ , όπου τα  $M$  και  $C$  τα έχουμε ορίσει στις παραπάνω εξισώσεις και πρέπει να ισχύει  $C \geq M$ .





Σχήμα 1.4.1 - Διαμόρφωση κατά πλάτος

2) Στη διαμόρφωση κατά συχνότητα έχουμε ένα ημιτονικό σήμα

$$V_c(t) = V_{co} * \sin(\omega_c * t + \varphi) \quad (3)$$

για πληροφορία

$$V_m(t)$$

και ένα διαμορφωμένο κατά συχνότητα σήμα

$$V_{FM}(t) = V_{co} * \sin(2\pi [f_c + \Delta f / V_{mo}] * V_m(t) * t + \varphi) \quad (4)$$

Εδώ παρατηρούμε ότι η συχνότητα του παραπάνω κατά συχνότητα διαμορφωμένου σήματος μεταβάλλεται σύμφωνα με τον τύπο

$$f_c + (\Delta f / V_{mo}) * V_m(t)$$

δηλαδή είναι ανάλογη από τη διαμορφούσα  $V_m(t)$ . Έτσι η συχνότητα κατά FM διαμορφωμένου κύματος κυμαίνεται μεταξύ των ορίων  $f_c - \Delta f$  και  $f_c + \Delta f$ . Μπορούμε να ορίσουμε το δείκτη διαμόρφωσης κατά αντιστοιχία με τη διαμόρφωση AM ως

$$\beta = \Delta f / f_m$$

Η ερμηνεία του δείκτη διαμόρφωσης είναι ότι δείχνει το λόγο της μεταβολής της συχνότητας του Carrier, γι' αυτό και λέγεται deviation (απόκλιση).

## ΜΕΡΟΣ 2 «ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ VOR»

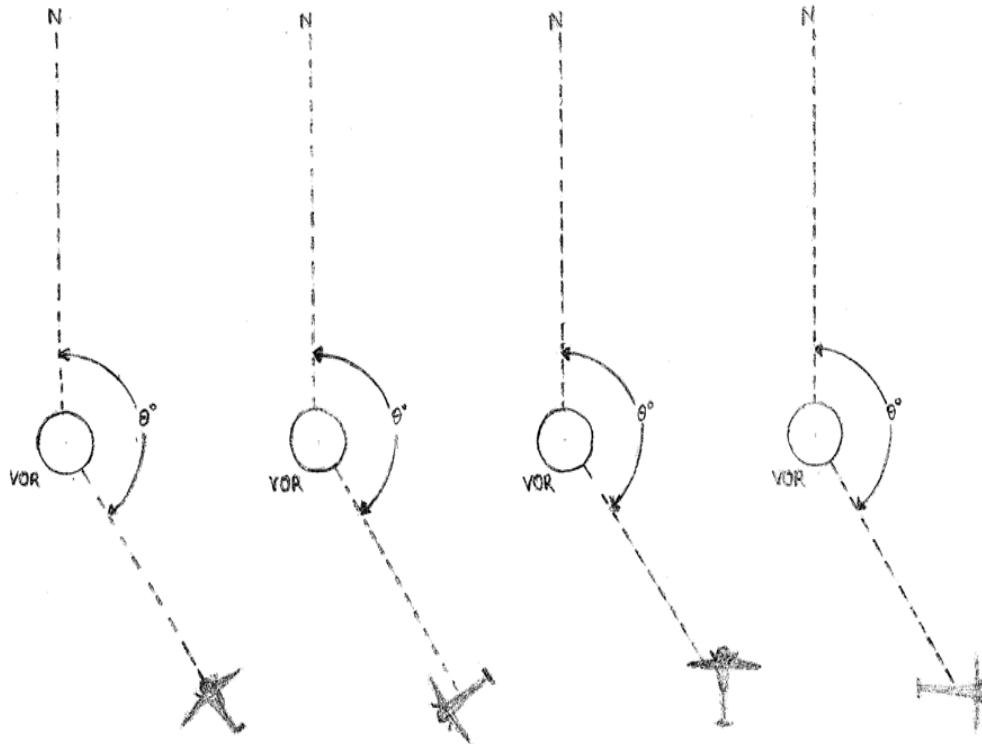
### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

#### 1.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ VOR

Τα VOR's διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους. Έτσι έχουμε δύο ειδών VOR, το Doppler (D/VOR) και το Conventional (C/VOR). Και τα δύο είναι επίγεια αεροναυτιλιακά ραδιοβοηθήματα που δίνουν τη δυνατότητα στον πιλότο ενός αεροσκάφους ανεξάρτητα με τη διεύθυνση της πορείας του να γνωρίζει την Αζιμουθιακή θέση θ° από το Μαγνητικό Βορρά N με κορυφή το VOR. Η διαμόρφωση στο C/VOR γίνεται μέσα στο μηχάνημα ενώ στο D/VOR η διαμόρφωση γίνεται στο χώρο.

Για να προσδιοριστεί η θέση του αεροσκάφους πρέπει να διαμορφώσουμε το χώρο και να αποδώσουμε σε κάθε σημείο του μια ιδιότητα μονοσήμαντη και μετρήσιμη που θα χαρακτηρίζει τη θέση. Αυτό το πετυχαίνουμε με την εκπομπή δύο σημάτων όπου, το πρώτο σήμα έχει μια ιδιότητα την ίδια σε κάθε σημείο του χώρου, και το οποίο χρησιμοποιείται σαν αναφορά (Reference), και ένα δεύτερο σήμα με το οποίο αποδίδουμε μια ιδιότητα διαφορετική σε κάθε θέση και είναι το προς σύγκριση μέγεθος (Variable). Η ιδιότητα που αποδίδουμε στο χώρο είναι η μεταβολή της φάσης του δευτέρου σήματος η οποία μεταβολή εξαρτάται από το Αζιμούθιο της θέσης και ταυτίζεται με αυτό.

Αυτά τα δύο σήματα πρέπει να εκπεμφθούν με ομοιόμορφο τρόπο στο χώρο. Κατά συνέπεια οι κεραίες πρέπει να είναι πανομοιότυπες δηλαδή να έχουν το ίδιο διάγραμμα ακτινοβολίας και απολαβής και επίσης να είναι εγκατεστημένες ακριβώς στην ίδια θέση (στην αρχή των αξόνων). Αυτό πρακτικά φαίνεται να εμφανίζει δυσκολίες στην υλοποίηση του συστήματος λόγω των σημαντικών διαστάσεων των κεραιών δεδομένου ότι η περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας των VOR's είναι από 108 έως 118 MHz. Για την άρση της αδυναμίας αυτής επιλέχθηκε η εκπομπή των σημάτων Variable και Reference να γίνεται από την ίδια κεραία, γεγονός όμως που περιπλέκει τη δομή του.



Σχήμα 2.1.1 - Επίγειος Σταθμός VOR

### **1.1.1 Γνωρίσματα του VOR**

Το ραδιοβοήθημα VOR είναι ένας πομπός VHF, που λειτουργεί στην περιοχή 108MHz-118MHz. Διακρίνεται σε τερματικό (Terminal) VOR, με ισχύ της τάξης 25W και σε διελεύσεως (En-Route) VOR, εγκατεστημένο συνήθως σε βουνοκορφές με ισχύ της τάξης 100W. Το Terminal VOR εκπέμπει στην περιοχή συχνοτήτων 108MHz-112MHz (Low-band) με διαχωρισμό 200KHz. Το En-Route VOR εκπέμπει στην περιοχή συχνοτήτων 112MHz-118MHz (High-band) με διαχωρισμό 100KHz.

Η κεραία του VOR έχει οριζόντια πόλωση. Δηλαδή, είναι οριζόντια και εκπέμπει RF ενέργεια οριζόντια πολωμένη.

Συγκεκριμένα, η κεραία του VOR εκπέμπει ομοιόμορφα, δηλαδή το διάγραμμα ακτινοβολίας της είναι κυκλικό (στο οριζόντιο επίπεδο) με την ίδια φάση συν(+) σε όλες τις κατευθύνσεις, δηλ. πανκατευθυντικά (omnidirectional). Όμως το Carrier που τροφοδοτεί την κεραία είναι προηγουμένως διαμορφωμένο κατά πλάτος (AM) μέσα στον πομπό από το Reference. Επομένως, το κυκλικό αυτό διάγραμμα ακτινοβολίας μεταφέρει σε όλες τις κατευθύνσεις με την ίδια φάση 0° το σήμα Reference.

Επίσης η κεραία του VOR εκπέμπει οριζόντια ένα περιστρεφόμενο πεδίο με ταχύτητα 30Hz, το οποίο είναι το σήμα Variable.

Έτσι η εκπομπή του VOR εμπεριέχει δύο κύματα, τα οποία λαμβάνει ο δέκτης του αεροσκάφους, τα επεξεργάζεται και αναδεικνύει δύο καθαρώς ημιτονικά σήματα 30Hz το καθένα. Κατόπιν συγκρίνει τη διαφορά φάσης μεταξύ τους, η οποία μεταφράζεται σε μοίρες στο κατάλληλα βαθμολογημένο όργανο του δέκτη (Radio Magnetic Indicator – RMI) και δίνει ανάλογη και σε πλήρη αντιστοιχία την επακριβή μοίρα του κάθε Αζιμούθιου στο χώρο. Με αυτό τον τρόπο ο πιλότος του αεροσκάφους γνωρίζει κάθε στιγμή την Αζιμουθιακή του θέση θ° από το Μαγνητικό Βορρά N με κορυφή το VOR και μάλιστα με ακρίβεια ( $\pm 0.1^\circ$ ).

Αναλυτικότερα το σήμα του VOR το οποίο τελικά εκπέμπεται στον αέρα είναι η συχνότητα Carrier (RF) του σταθμού διαμορφωμένη κατά πλάτος από δύο διαφορετικά σήματα όπου το ένα είναι το Reference και το άλλο είναι το ID. Ένας δέκτης VOR βρισκόμενος σε μία θέση στο χώρο λαμβάνει ένα σήμα που περιέχει και μία ακόμα διαμόρφωση που προέρχεται από την εκπομπή του Variable. Το σήμα αυτό στην είσοδο του δέκτη ονομάζεται σύνθετο σήμα VOR ή Composite. Ευνόητο είναι λοιπόν ότι ο σταθμός VOR εκτός από το Reference εκπέμπει και κάτι άλλο το

οποίο είναι το Variable και το οποίο εκφυλίζεται σε δύο επιμέρους σήματα τα οποία ονομάζονται  $SB_1$  και  $SB_2$ .

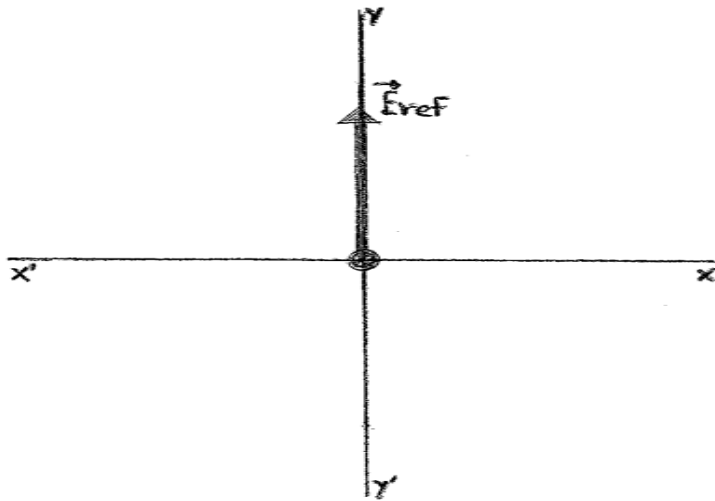
Συμπερασματικά αναφέρουμε ότι ο επίγειος σταθμός VOR εκπέμπει τρία σήματα RF τα οποία στο χώρο δίδουν σαν αποτέλεσμα το σύνθετο σήμα του VOR που εκμεταλλεύονται οι δέκτες VOR.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

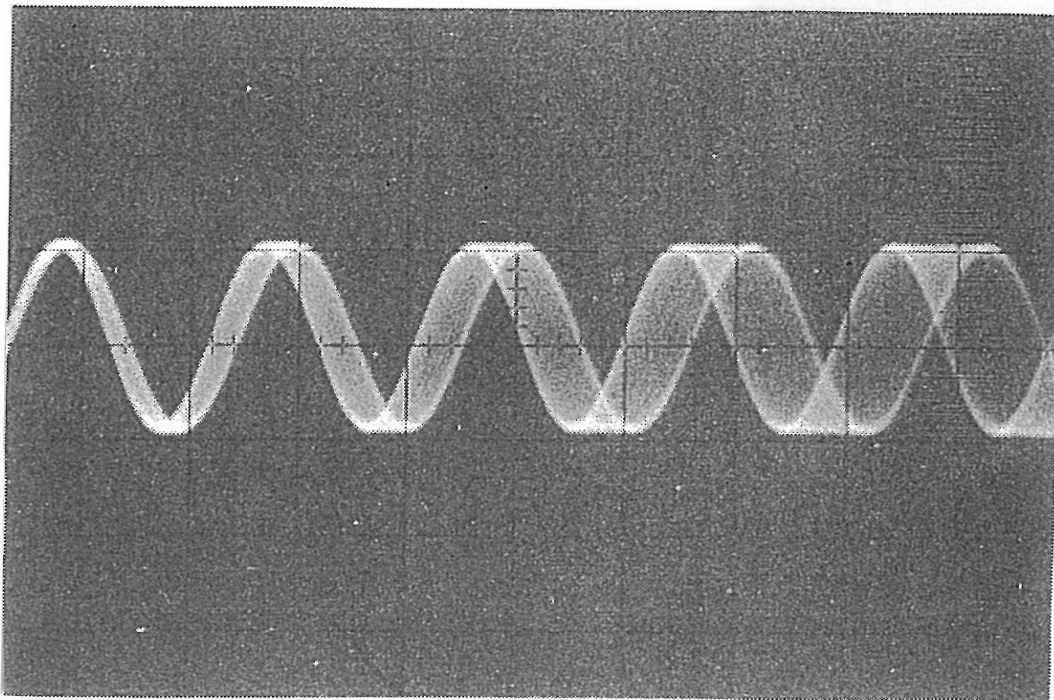
### 2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ REFERENCE

Είναι ένα ηλεκτρικό σήμα RF που παράγεται από ένα πομπό και είναι διαμορφωμένο κατά πλάτος με βάθος διαμόρφωσης 30%. Ακτινοβολείται από την κεραία του συστήματος ομοιόμορφα κυκλικά στο οριζόντιο επίπεδο (πανκατευθυντικά - non directional), και με επίπεδο πόλωσης το οριζόντιο. Η φάση του είναι σταθερή και μπορούμε να το παραστήσουμε μαθηματικά με ένα δiάνυσμα σταθερού προσανατολισμού και σταθερού πλάτους (βλέπε Σχήμα 2.2.1).

Η κατά πλάτος διαμορφούσα είναι 9960Hz (υποφέρον - subcarrier), (βλέπε Σχήμα 2.2.2), είναι εκ των προτέρων διαμορφωμένη κατά συχνότητα με σήμα 30Hz και με δείκτη διαμόρφωσης 16, κυμαίνεται δηλαδή μεταξύ ορίων 9480Hz και 10440Hz ( $9960\text{Hz} \pm 480\text{Hz}$ ). Υπάρχει ακόμα μία διαμόρφωση κατά πλάτος βάθους 5% η οποία επιβάλλεται για την προσθήκη του χαρακτηριστικού του ραδιοβοηθήματος (code-sign, morse code).



Σχήμα 2.2.1 - Διανυσματική Παράσταση σήματος Reference



Σχήμα 2.2.2 - Κατά Πλάτος Διαμορφούσα 9960Hz



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ VARIABLE

Το Variable είναι το κύμα το οποίο είναι υπεύθυνο για τη διαμόρφωση της ιδιότητας του χώρου που θα σχετίζεται με τη θέση. Το Variable είναι ένα σήμα RF το οποίο γεννάται μέσα στο VOR σε μία μονάδα που ονομάζεται γωνιόμετρο και το αποτέλεσμα που δίδει στο χώρο είναι ένα στρεφόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο με ταχύτητα περιστροφής 30Hz. Το πεδίο Variable προκύπτει σαν άθροισμα δύο επιμέρους πεδίων τα οποία είναι ορθογώνια μεταξύ τους όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 2.3.1 και τα οποία τα ονομάζουμε Sidebands (SB). Τα SB<sub>1</sub> και SB<sub>2</sub> μεταβάλλονται με τρόπο ορθογώνιο οπότε το άθροισμά τους περιστρέφεται με σταθερό ρυθμό 30Hz.

Αξίζει να σημειώσουμε εδώ ότι τα SB<sub>1</sub> και SB<sub>2</sub> είναι η πάνω και η κάτω πλευρική που προκύπτει από τη διαμόρφωση ενός Carrier σήματος πανομοιότυπου με το Carrier του σήματος Reference (από το σήμα Carrier που πρόκειται να διαμορφωθεί με το Reference κλέβουμε ένα μέρος για να οδηγήσουμε το διαμορφωτή του γωνιομέτρου).

Επίσης στο Σχήμα 2.3.2 βλέπουμε ένα τυπικό κύκλωμα που πετυχαίνει την παραγωγή των δύο Sidebands.

Ακολουθεί η μαθηματική διατύπωση αυτών.

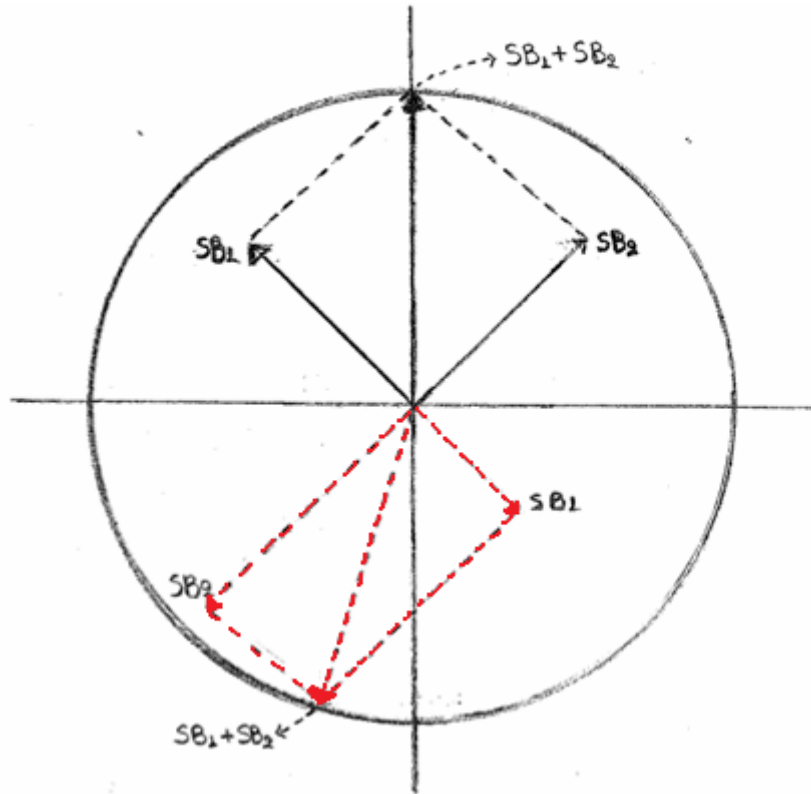
Από τις δύο εξόδους (C και D) της γέφυρας έχουμε τις εξής συνθέσεις:

$$\begin{aligned} \alpha) C = A + B &= E_c / \sqrt{2} * \cos(\omega_c * t + \varphi) + E_c / \sqrt{2} * \cos(\omega_c * t - \varphi) = \\ &= E_c / \sqrt{2} * \cos(\omega_c * t) * \cos\varphi - E_c / \sqrt{2} * \sin(\omega_c * t) * \sin\varphi + \\ &+ E_c / \sqrt{2} * \cos(\omega_c * t) * \cos\varphi + E_c / \sqrt{2} * \sin(\omega_c * t) * \sin\varphi \rightarrow \end{aligned}$$

$$C = \sqrt{2} * E_c * \cos(\omega_c * t) * \cos\varphi$$

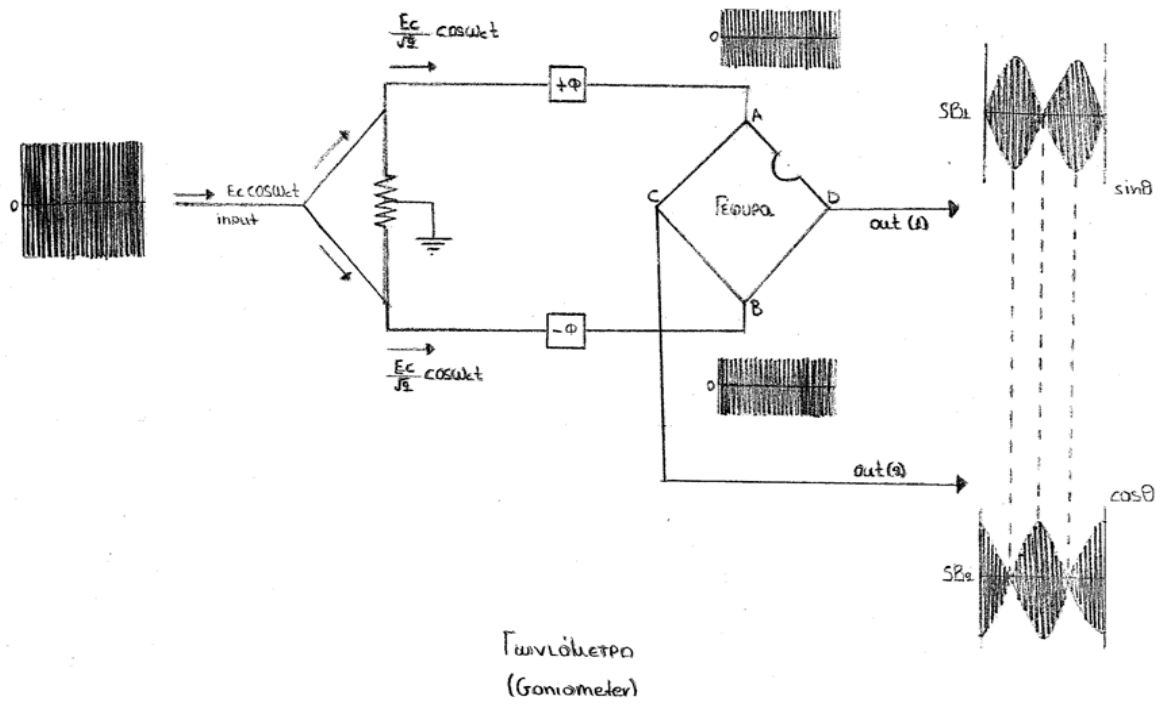
$$\begin{aligned} \beta) D = -A + B &= -E_c / \sqrt{2} * \cos(\omega_c * t + \varphi) + E_c / \sqrt{2} * \cos(\omega_c * t - \varphi) = \\ &= -E_c / \sqrt{2} * \cos(\omega_c * t) * \cos\varphi + E_c / \sqrt{2} * \sin(\omega_c * t) * \sin\varphi + \\ &+ E_c / \sqrt{2} * \cos(\omega_c * t) * \cos\varphi + E_c / \sqrt{2} * \sin(\omega_c * t) * \sin\varphi \rightarrow \end{aligned}$$

$$D = \sqrt{2} * E_c * \sin(\omega_c * t) * \sin\varphi$$

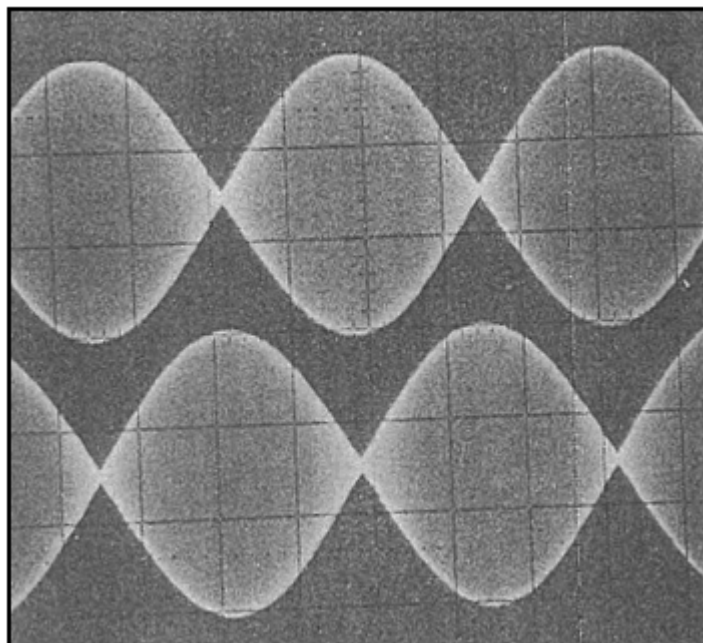


Σχήμα 2.3.1 - Διανυσματική Παράσταση του σήματος Variable

Στο δεύτερο και τρίτο τεταρτημόριο παριστάνεται ένα άλλο στιγμιότυπο του σήματος



Σχήμα 2.3.2 – (α) Τυπικό κύκλωμα παραγωγής των Sidebands



**Σχήμα 2.3.2 – (β) SB<sub>1</sub> και SB<sub>2</sub>**

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε με ποιο τρόπο ακτινοβολούνται οι συνιστώσες του Variable.

Επειδή οι συνιστώσες του Variable δηλαδή τα  $SB_1$  και  $SB_2$  είναι ορθογώνια μεταξύ τους πρέπει και οι κεραιές που θα τα ακτινοβολήσουν να είναι ορθογώνιες μεταξύ τους. Η διάταξη των κεραιών έχει ως εξής:

Το ένα σύστημα κεραιάς πακτώνεται στο έδαφος σταθερά ώστε το μέγιστο του λοβού ακτινοβολίας να είναι κατά τη διεύθυνση  $315^\circ - 135^\circ$  ( $SB_1$  κατά τη διεύθυνση NE-SW), το δε άλλο πακτώνεται έτσι ώστε το μέγιστο του λοβού ακτινοβολίας να είναι κατά τη διεύθυνση  $45^\circ - 225^\circ$  ( $SB_2$  κατά τη διεύθυνση NE-SW). Οι κεραιές που επιλέγονται είναι δίπολα  $\lambda/2$  συντονισμένες στη συχνότητα του Carrier, και τα διαγράμματα ακτινοβολίας τους, είναι τα γνωστά τυπικά του δίπολου  $\lambda/2$ , τα οποία ακτινοβολούν ομοιόμορφα (κυκλικά) κατά το οριζόντιο επίπεδο και κατευθυντικά κατά το κατακόρυφο. Το επίπεδο πόλωσης του ακτινοβολούμενου κύματος και άρα ο αντίστοιχος προσανατολισμός της δίπολου κεραιάς πρέπει να είναι το οριζόντιο επίπεδο. Η πόλωση του κύματος επιτυγχάνεται είτε με δίπολα οριζόντια διατεταγμένα (κεραίες Alford Loop) είτε με δίπολα κατακόρυφα διατεταγμένα, που όμως στην περίπτωση αυτή δεν είναι κλασικά δίπολα αλλά είναι δίπολα σχισμής, όπου εκμεταλλευόμαστε το μαγνητικό κυρίως πεδίο<sup>1</sup>. Κάθε Sideband ακτινοβολείται από δύο δίπολα αντιδιαμετρικά που τροφοδοτούνται από σήματα τα οποία προκύπτουν από διαίρεση του κάθε Sideband σε δύο κομμάτια.

---

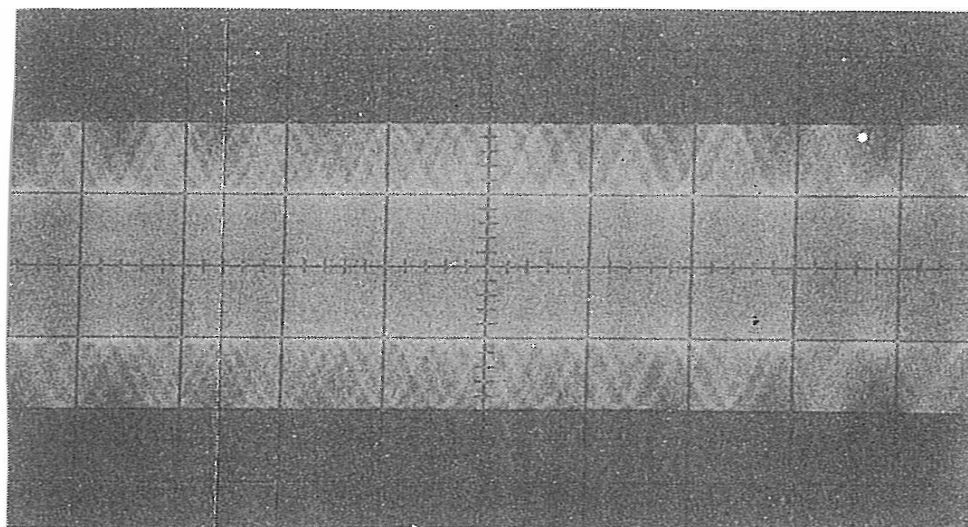
<sup>1</sup> Παρατήρηση: Το σήμα Reference ακτινοβολείται επίσης με οριζόντια πόλωση και από κεραιά με πανομοιότυπα χαρακτηριστικά με εκείνες του Variable. Για να επιτευχθεί αυτό, οι κεραιές επιλέγεται να είναι κοινές. Όμως σήμερα έχουν επινοηθεί κεραιές με πανομοιότυπα χαρακτηριστικά και μπορεί να είναι χωριστές.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

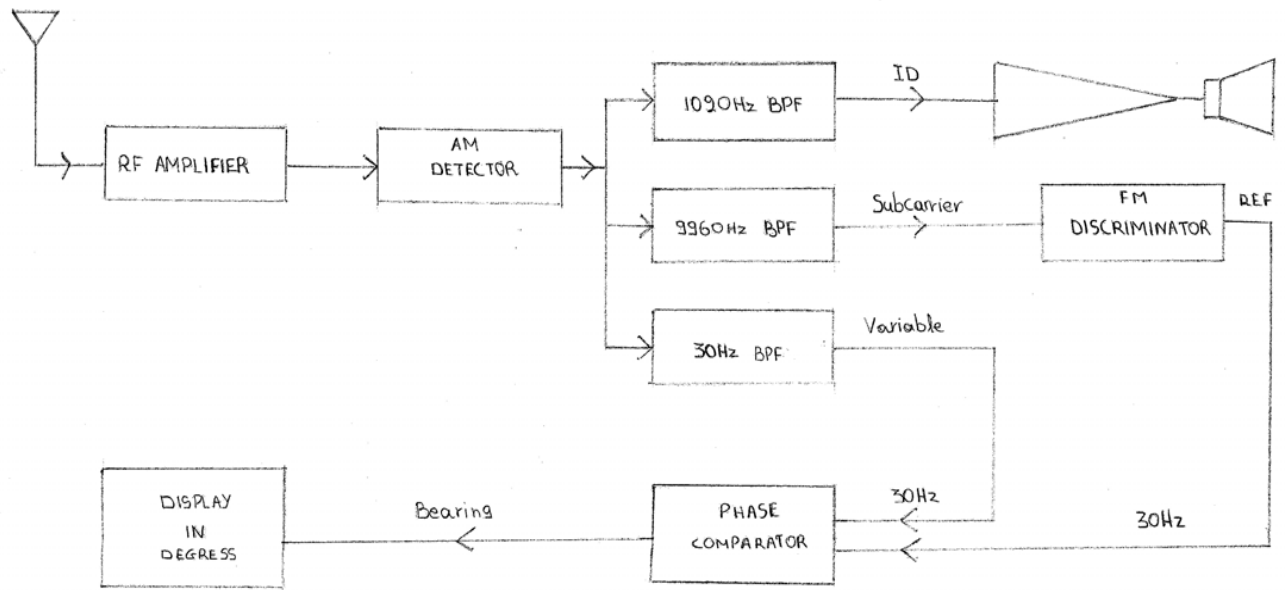
### 4.1 ΛΗΨΗ ΔΕΚΤΗ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ

Ο δέκτης του Α/Φ λαμβάνει το σύνθετο σήμα (βλέπε Σχήμα 2.4.1) του VOR το οποίο περιέχει τις πληροφορίες Reference, Variable και ID. Στη συνέχεια ο δέκτης αποδιαμορφώνει το σήμα και αναδεικνύει την περιβάλλουσα του. Σε αυτή την περιβάλλουσα υπάρχουν οι τρεις προηγούμενα αναφερθείσες πληροφορίες. Με κατάλληλα συντονισμένα φίλτρα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4.2 αναδεικνύεται

- α) η πληροφορία ID και οδηγείται στο μεγάφωνο για αναπαραγωγή,
- β) το Subcarrier των 9960Hz, το οποίο αφού διευκρινιστεί (αποδιαμόρφωση FM) δίνει το σήμα Reference των 30Hz και,
- γ) το Variable (30Hz) που μαζί με το πιο πάνω 30Hz Reference οδηγούνται σε ένα συγκριτή φάσης του οποίου η έξοδος είναι ανάλογη με τη διαφορά φάσης αυτών των δύο σημάτων, και η οποία απεικονίζεται κατάλληλα σε ενδείκτη.



**Σχήμα 2.4.1 – Σύνθετο σήμα του VOR**



Σχήμα 2.4.2 - Δέκτης VOR Αεροσκάφους



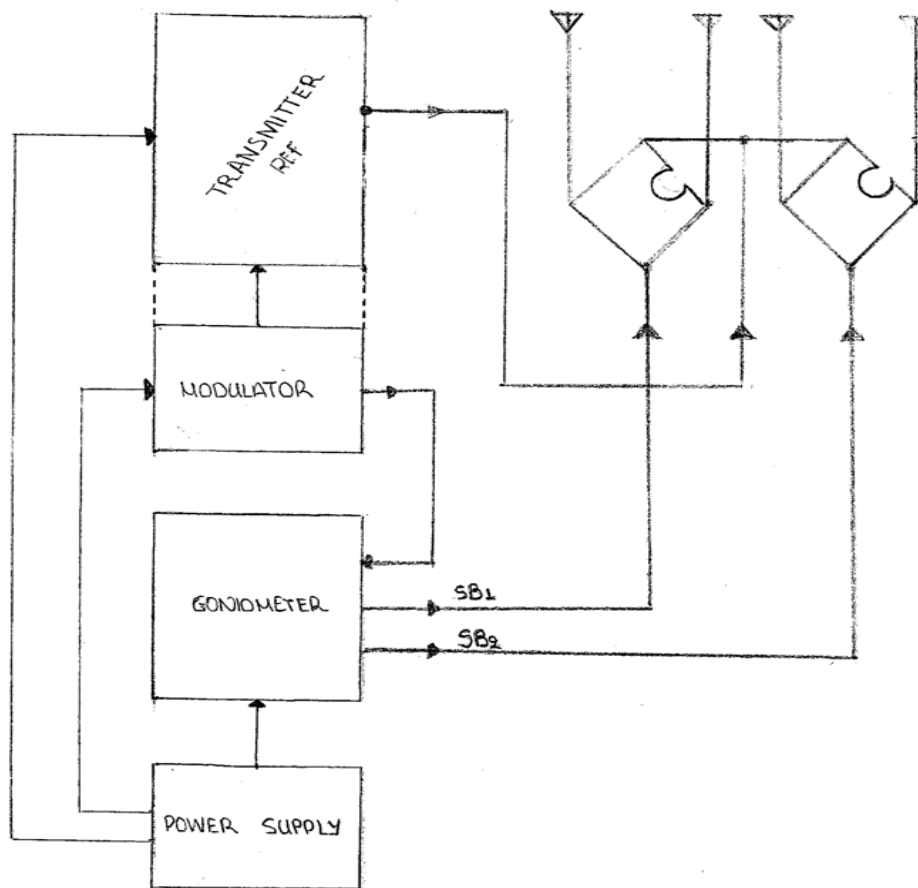
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### 5.1 ΔΟΜΗ ΣΤΑΘΜΟΥ VOR

Ένας σταθμός VOR αποτελείται από τα εξής τμήματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5.1:

- 1) Τον πομπό (transmitter)
- 2) Τον ενισχυτή (modulator)
- 3) Το γωνιόμετρο (goniometer)
- 4) Το τροφοδοτικό (power supply)
- 5) Και το σύστημα των τεσσάρων κεραιών

Το γωνιόμετρο είναι η μονάδα παραγωγής των Sidebands με ρυθμισμένα τα χαρακτηριστικά τους δηλαδή να είναι ορθογώνια. Επειδή οι συχνότητες των σημάτων Reference και Variable (Sidebands) πρέπει να είναι ίδιες άρα πρέπει να προέρχονται από τον ίδιο ταλαντωτή, το οποίο πράγματι συμβαίνει διότι ένα κομμάτι του σήματος του τοπικού ταλαντωτή που βρίσκεται στον διαμορφωτή οδηγείται στην είσοδο του γωνιόμετρου για να χρησιμοποιηθεί σαν βάση για την παραγωγή των Sidebands. Ο πομπός είναι η μονάδα στην οποία παράγεται και ολοκληρώνεται η κατασκευή του Reference. Η συχνότητα του Carrier παράγεται από ένα τοπικό ταλαντωτή (ο ίδιος που τροφοδοτεί και το γωνιόμετρο) το σήμα του οποίου αφού ενισχυθεί διαμορφώνεται κατά πλάτος από το σήμα Reference των 9960Hz (9960Hz διαμορφωμένο κατά συχνότητα με απόκλιση  $\pm 480\text{Hz}$  και ρυθμό μεταβολής 30Hz το οποίο είναι το ουσιαστικό σήμα Reference). Αυτό το διαμορφωμένο πλέον σήμα αφού ενισχυθεί κι' άλλο και έρθει στη επιθυμητή ισχύ οδηγείται στο σύστημα των κεραιών για να εκπεμφθεί ομοιόμορφα στο χώρο. Στο σήμα Carrier επιβάλλεται ακόμα μία διαμόρφωση 5% με το χαρακτηριστικό του όνομα σε μορσικό αλφάβητο όπως έχει προαναφερθεί.



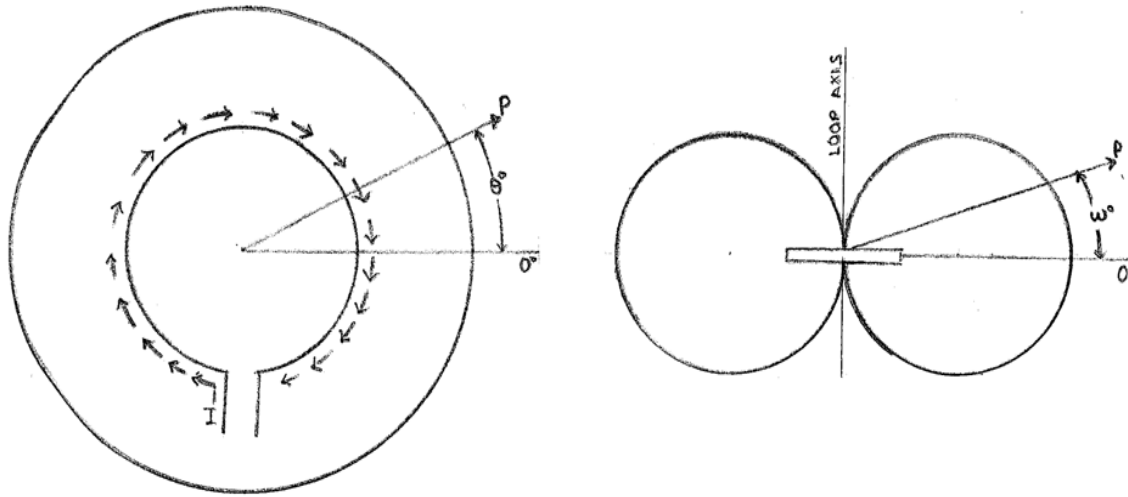
Σχήμα 2.5.1 - Δομή Σταθμού VOR

### **ΜΕΡΟΣ 3: «ΚΕΡΑΙΑ ALFORD LOOP»**

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

##### **1.1 ΚΕΡΑΙΑ LOOP ΣΤΟ ΧΩΡΟ (FREE SPACE)**

Είναι γνωστό από τη θεωρία των κεραιών, ότι μία απλή οριζόντια κεραία σχήματος δακτυλίου (loop) απομακρυσμένη από το έδαφος (free space) και με πολύ μικρές διαστάσεις ως προς το μήκος κύματος  $\lambda$ , εκπέμπει οριζόντια ένα κυκλικό πολοδιάγραμμα (στο οριζόντιο επίπεδο) πανκατευθυντικά. Εφόσον δεν υπάρχουν ανακλάσεις το ρεύμα που θα διαρρέει το loop έχει πρακτικά το ίδιο μέγεθος και φάση σε όλο το μήκος του. Η ένταση του πεδίου σε ένα σταθερό σημείο που ισαπέχει από το loop για κάθε γωνία  $\theta^\circ$  στο οριζόντιο επίπεδο θα είναι ίδια σε μέγεθος και φάση (πολικότητα). Επομένως το διάγραμμα ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο θα έχει σχήμα κυκλικό και η κεραία θα εκπέμπει πανκατευθυντικά (omnidirectional).



Σχήμα 3.1.1 - Κεραία Loop

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2.1 ΚΕΡΑΙΑ ALFORD LOOP

Η κεραία Alford Loop είναι μία κεραία η οποία είναι δίπολο και έχει το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό να ακτινοβολεί ομοιόμορφα στο επίπεδό της. Η δομή μιας κεραίας Alford Loop φαίνεται στο Σχήμα 3.2.1

### 2.2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΕΡΑΙΑΣ ALFORD LOOP

#### 2.2.1 Δομή Κεραίας Alford Loop

Κάθε κεραία Alford Loop αποτελείται από δύο δίπολα ( $\lambda/2$ ) αναδιπλωμένα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.1. Το κάθε δίπολο έχει και τα δύο ακραία τμήματά του αναδιπλωμένα προς το κέντρο της κεραίας κατά  $\lambda/8$  το καθένα. Η κεραία αυτή όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.1, έχει ένα διάγραμμα ακτινοβολίας κατά το επίπεδό της (οριζόντιο) που φαίνεται στο Σχήμα 3.2.2. Στο Σχήμα 3.2.2 φαίνεται επίσης το συνολικό διάγραμμα ακτινοβολίας του συστήματος της κεραίας Alford Loop, και τα επιμέρους (διακεκομμένη γραμμή) από τα οποία προκύπτει.

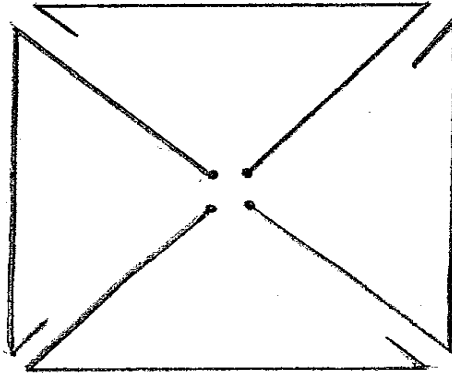
#### 2.2.2 Διασύνδεση κεραιών Alford Loop στην κεραία VOR

Η κεραία του VOR αποτελείται από τέσσερα τέτοια στοιχεία Alford Loop διατεταγμένα<sup>2</sup> όπως στο Σχήμα 3.2.2.1 και διασυνδεδεμένα μεταξύ τους όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.2.2. Στο Σχήμα αυτό οι τέσσερις κεραίες Alford Loop παρατηρούμε πως είναι διασυνδεδεμένες κατά τέτοιο τρόπο μεταξύ τους ώστε να υπάρχουν τρεις εισοδοί για την τροφοδοσία τους. Πρέπει να αναφέρουμε ότι αυτές οι τρεις εισοδοί (τρεις διαφορετικοί πομποί) πρέπει να τροφοδοτήσουν το κοινό τους σύστημα κεραιών χωρίς όμως να επηρεάζει η μία την άλλη.

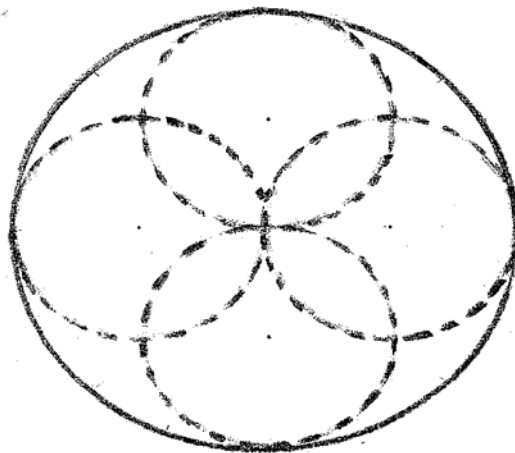
---

<sup>2</sup> Σχόλιο: Παρατηρούμε λοιπόν ότι η διάταξη των τεσσάρων κεραιών Alford Loop λειτουργούν ταυτόχρονα ανά δυο απέναντι σε σύστημα και όλες μαζί.

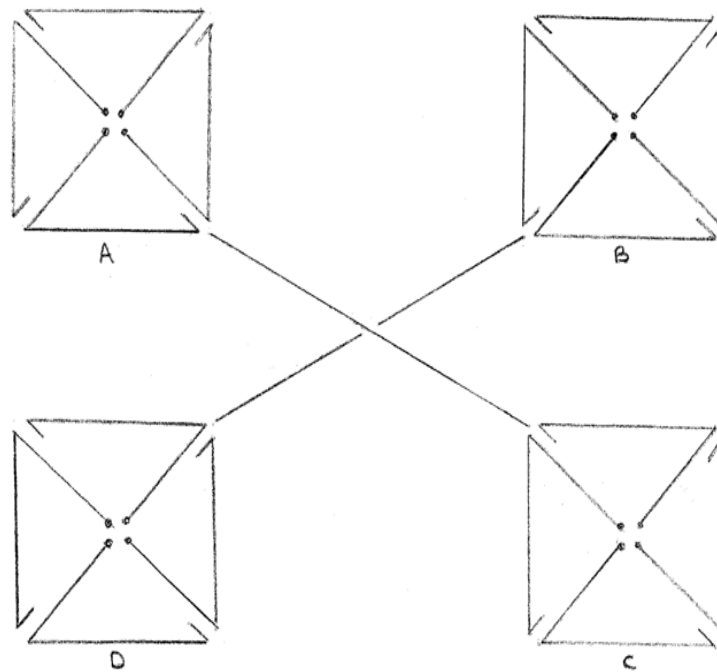
Η ισχύς  $SB_1$  και  $SB_2$  σε σχέση με την ισχύ Carrier είναι έως και 50 φορές μικρότερη. Αυτή η ανισομορφία των ισχύων RF Reference και Variable ( $SB_1 + SB_2$ ) απαιτεί απόλυτα ακριβή ρύθμιση του συστήματος κεραιών και του συστήματος τροφοδοσίας αυτού ώστε να μην υπάρχουν καθόλου στάσιμα ( $SWR \sim 1$ ) διαφορετικά καταστρέφεται η λειτουργία του VOR και επομένως και όσα ακολουθούν δεν είναι απολύτως αληθινά.



**Σχήμα 3.2.1 - Δομή Κεραίας Alford Loop**

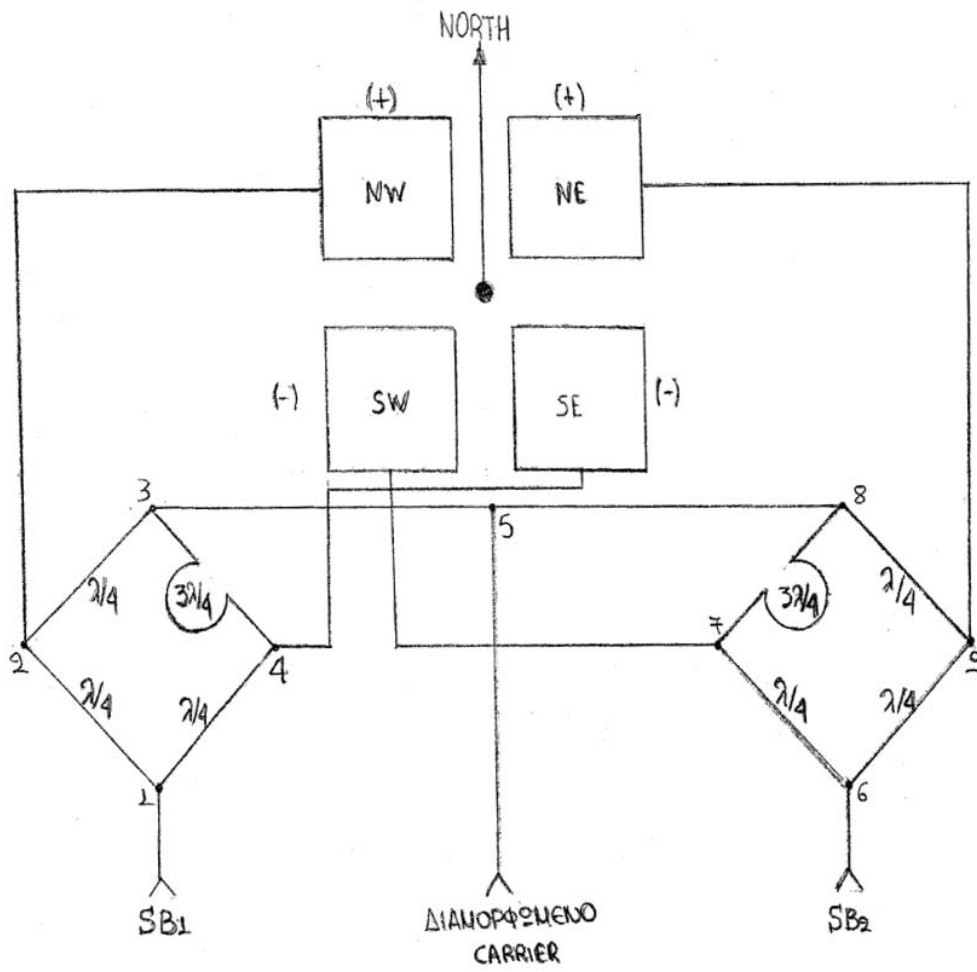


**Σχήμα 3.2.2 - Διάγραμμα ακτινοβολίας Κεραίας Alford Loop**



**Σχήμα 3.2.2.1 - Διάταξη Κεραιών Alford Loop**





Σχήμα 3.2.2.2 - Διασύνδεση Κεραιών Alford Loop

### 2.2.3 Λειτουργία του κυκλώματος διασύνδεσης του Σχήματος 3.2.2.2

Η απαίτηση είναι το σύστημα κεραιών NW-SE να ακτινοβολήσει την ισχύ  $SB_1$ , το σύστημα NE-SW την ισχύ  $SB_2$  και την ισχύ Reference και οι τέσσερις κεραιές μαζί. Αυτό επιτυγχάνεται με την κυκλωμάτωση του Σχήματος 3.2.2.2, και η λειτουργία του έχει ως εξής:

Το ηλεκτρικό σήμα του πομπού  $SB_1$  μοιράζεται ισόμορφα. Το ένα μέρος φτάνει στον κόμβο 2 και τροφοδοτεί την κεραία NW ενώ ένα ισόποσο μέρος της ισχύος του φτάνει στον κόμβο 3. Το άλλο μισό από τον κόμβο 1 οδηγείται στον κόμβο 4 και από εκεί ένα μέρος τροφοδοτεί την κεραία SE ενώ ισόποσο μέρος του διαρρέει τον κλάδο της γέφυρας 4-3. Στην διαδρομή από το 4 στο 3 από κατασκευής έχουμε υπεισάγει καθυστέρηση του σήματος κατά  $3\lambda/4$  με αποτέλεσμα αυτό το κύμα να φτάνει στον κόμβο 3 καθυστερημένο κατά  $180^\circ$  σε σχέση με το κύμα που φτάνει στον κόμβο 3 προερχόμενο από το δρόμο 2-3. Συνεπώς αυτά σαν ίσα και αντίθετα αλληλοεξουδετερώνονται. Συμπεραίνουμε άρα μετά βεβαιότητας ότι η ισχύς  $SB_1$  στον κόμβο 3 της γέφυρας δεν υφίσταται. Η ίδια εξήγηση εφαρμόζεται και για την δεξιά γέφυρα η οποία τροφοδοτείται από την έξοδο του πομπού  $SB_2$ . Άρα τα κομβικά σημεία 3 και 8 ως ισοδυναμικά μπορούμε να τα ενώσουμε χωρίς διαταραχή των ηλεκτρικών τους ιδιοτήτων.

Το ηλεκτρικό σήμα του πομπού Reference οδηγείται στον κόμβο 5 απ' όπου μοιράζεται ισόμορφα στους κόμβους 3 και 8 των δύο γεφυρών. Η ισχύς στον κόμβο 3 μοιράζεται ισόμορφα στους δρόμους 3-2 και 3-4 απ' όπου καταλήγει στις κεραιές NW και SE. Το ίδιο συμβαίνει και στον κόμβο 8 απ' όπου τροφοδοτούνται οι κεραιές NE και SW. Πρέπει να παρατηρήσουμε ότι η κεραία SE τροφοδοτείται με αντίθετη φάση από την κεραία NW. Το ίδιο ισχύει και για τις κεραιές NE και SW.

Όμως το ηλεκτρικό σήμα που καταλήγει στους κόμβους 2, 4, 7 και 9 μοιράζεται και στους κόμβους 1 και 6, το οποίο δεν εμφανίζει κάποιο πρόβλημα διότι τα ηλεκτρικά σήματα των διαδρομών  $3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$  και  $8 \rightarrow 9 \rightarrow 6$  εξουδετερώνουν τα ηλεκτρικά σήματα των διαδρομών  $3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$  και  $8 \rightarrow 7 \rightarrow 6$  αντίστοιχα, τα οποία φτάνουν με καθυστέρηση  $180^\circ$  στα σημεία 1 και 6.

Αυτή η διασύνδεση λοιπόν επιτυγχάνει αφενός μεν την ίδια φορά των ρευμάτων σε όλα τα τμήματα  $\lambda/4$  της κεραίας και επομένως την ίδια φάση (πολικότητα) της ακτινοβολίας στο χώρο, αφετέρου δε την εξουδετέρωση της ακτινοβολίας στο εσωτερικό της κεραίας με τη βοήθεια των αντίθετων ρευμάτων που διαρρέουν τα

αναδιπλωμένα γειτονικά τμήματα  $\lambda/8$  των διπόλων καθώς επίσης των απέναντι τμημάτων  $\lambda/4$  της κεραίας.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η πραγματικά ακτινοβολούσα επιφάνεια της κεραίας Alford loop είναι τα τέσσερα τμήματα  $\lambda/4$  αυτής.

Ο τρόπος τροφοδοσίας των κεραιών και ακτινοβολίας των σημάτων που συνθέτουν ένα σήμα VOR που περιγράψαμε ως τώρα είναι ένας έξυπνος τρόπος που χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν και ίσως χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα όμως δεν είναι και ο μοναδικός. Θα μπορούμε να επινοήσουμε ένα άλλο σύστημα κεραιών που θα λειτουργεί αποτελεσματικά γι' αυτή την εφαρμογή (VOR) αρκεί να τηρήσουμε τον περιορισμό ώστε οι κεραίες των Sidebands και του Reference να βρίσκονται στο ίδιο σημείο του χώρου και να είναι πανομοιότυπες και οπωσδήποτε να ακτινοβολούν οριζόντια πολωμένο σήμα.

## ΜΕΡΟΣ 4: «ΣΦΑΛΜΑΤΑ VOR»

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

#### 1.1 ΣΦΑΛΜΑΤΑ VOR

Σαν φυσικό σύστημα που είναι το VOR δεν είναι δυνατόν να είναι απαλλαγμένο από σφάλματα. Από τη μέχρι τώρα θεώρηση που έχουμε κάνει είναι φανερό ότι οι πρωτογενείς παράγοντες που γεννούν τη λειτουργία VOR είναι υπόλογοι και για τα πιθανά σφάλματα καθώς και την έκτασή τους. Έτσι πρέπει να θεωρήσουμε ότι τα Sidebands μεμονωμένα και μαζί, το Reference, το κύκλωμα τροφοδοσίας της κεραίας, η κεραία μία μία αλλά και συνολικά, το έδαφος (αγωγιμότητά του), αλλά και η εγγύς περιοχή (γειτονιά), συνεισφέρουν στην ύπαρξη σφάλματος. Ανάλογα με την γενεσιουργό αιτία των σφαλμάτων όπως θα δούμε πιο κάτω μπορούν να καταταχθούν σε ομάδες.

Το μαγνητικό Αζιμούθιο (Magnetic Azimuth - MA) μιας θέσης στο χώρο είναι η γωνία που σχηματίζεται από την επιβατική ακτίνα που ενώνει το Μαγνητικό Βορρά με το VOR και από την επιβατική ακτίνα που ενώνει την εν λόγω θέση με το VOR (πραγματική διόπτρευση). Ο δέκτης VOR του αεροσκάφους εκμεταλλευόμενος το σήμα που εκπέμπεται από το VOR, αποκωδικοποιεί Αζιμουθιακή θέση η οποία ονομάζεται Omni Course – OC, και η οποία γενικά είναι διαφορετική από το MA. Η διαφορά MA – OC αποτελεί ουσιαστικά και το σφάλμα κάθε θέσης του χώρου και το οποίο ονομάζουμε σφάλμα Πορείας (Course Error – CE). Ισχύει επομένως η σχέση:

$$CE = MA - OC$$

Επομένως τα σφάλματα του VOR που προέρχονται από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω μπορούν να καταταχθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

#### 1) Duantal error

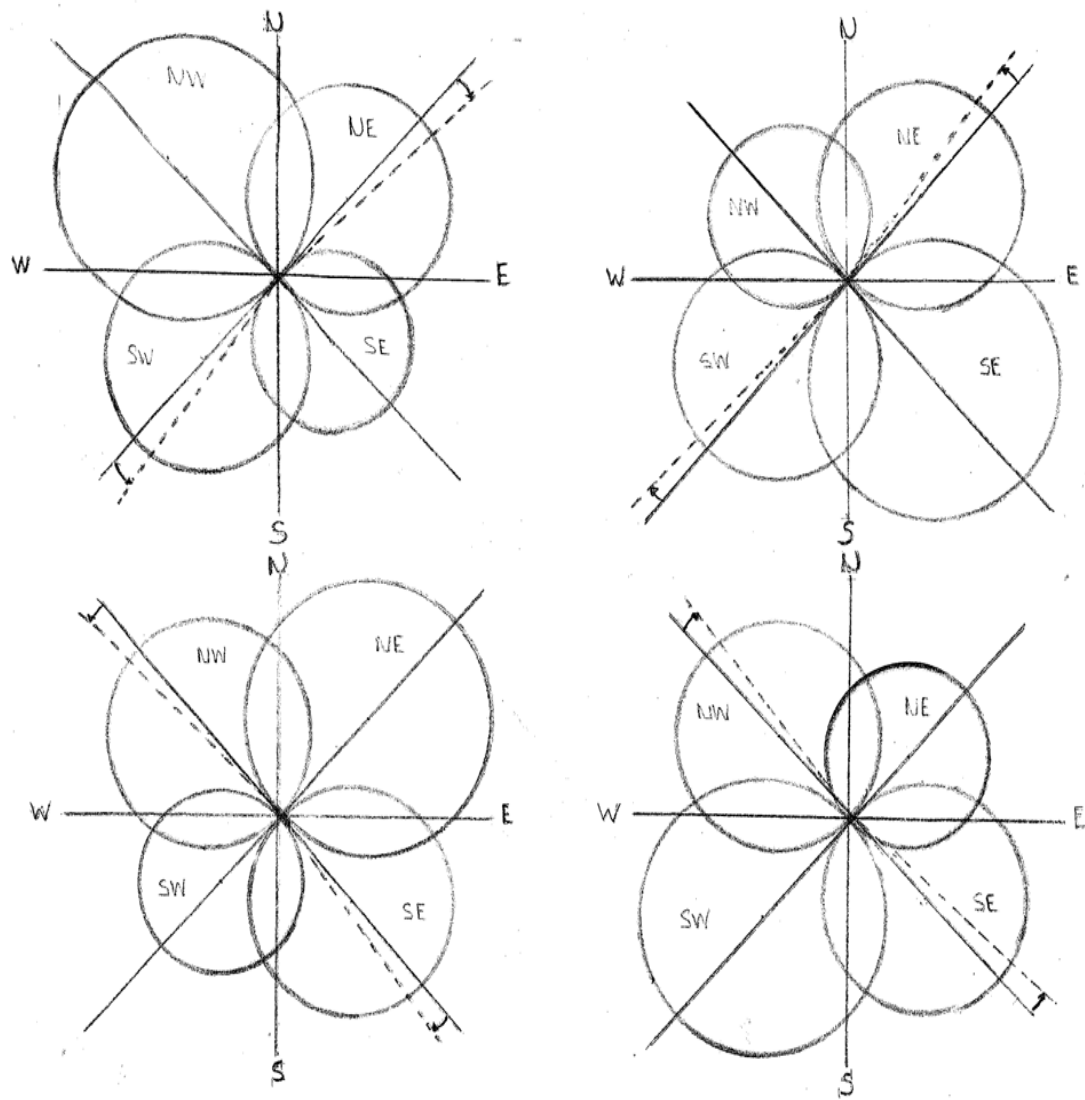
Είναι το σφάλμα που προκαλείται από ανισοροπίες που εμφανίζονται μέσα σε κάθε ένα Sideband χωριστά και οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε misphasing κατάσταση μεταξύ των κεραίων του αυτού ζεύγους π.χ. των NW και SE ή των NE και SW του άλλου ζεύγους (βλέπε Σχήμα 4.1.1) ή και των δύο ζευγαριών ταυτοχρόνως (βλέπε Σχήμα 4.1.2), ή σε κακή ρύθμιση του γωνιομέτρου. Στην περίπτωση που και στα δύο Sidebands υπάρχει ανισοτροπία λοβών τότε έχουμε και σφάλμα Duantal 1 και

σφάλμα Duantal 2 και λέμε τότε ότι έχουμε σφάλμα Double Duantal το οποίο αποτελεί και τη γενικότερη περίπτωση και όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1.3 το σφάλμα εμφανίζεται και στα Null points και στα Cardinal Points, είναι κατά κάποιο τρόπο κατανεμημένο σε ολόκληρη την περιφέρεια του κύκλου. Στο Σχήμα 4.1.4 παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή του σφάλματος Duantal εμφανίζεται στη διεύθυνση που είναι κάθετη στο Sideband που έχει την ανισοτροπία, δηλαδή  $45^\circ$ ,  $225^\circ$  ή  $135^\circ$ ,  $315^\circ$  ή και στις δύο και εμφανίζεται ως η διεύθυνση αυτή να είναι στρεβλωμένη είτε προς τα θετικά είτε προς τα αρνητικά είτε κατά το ήμισυ στα θετικά και κατά το άλλο μισό στα αρνητικά.

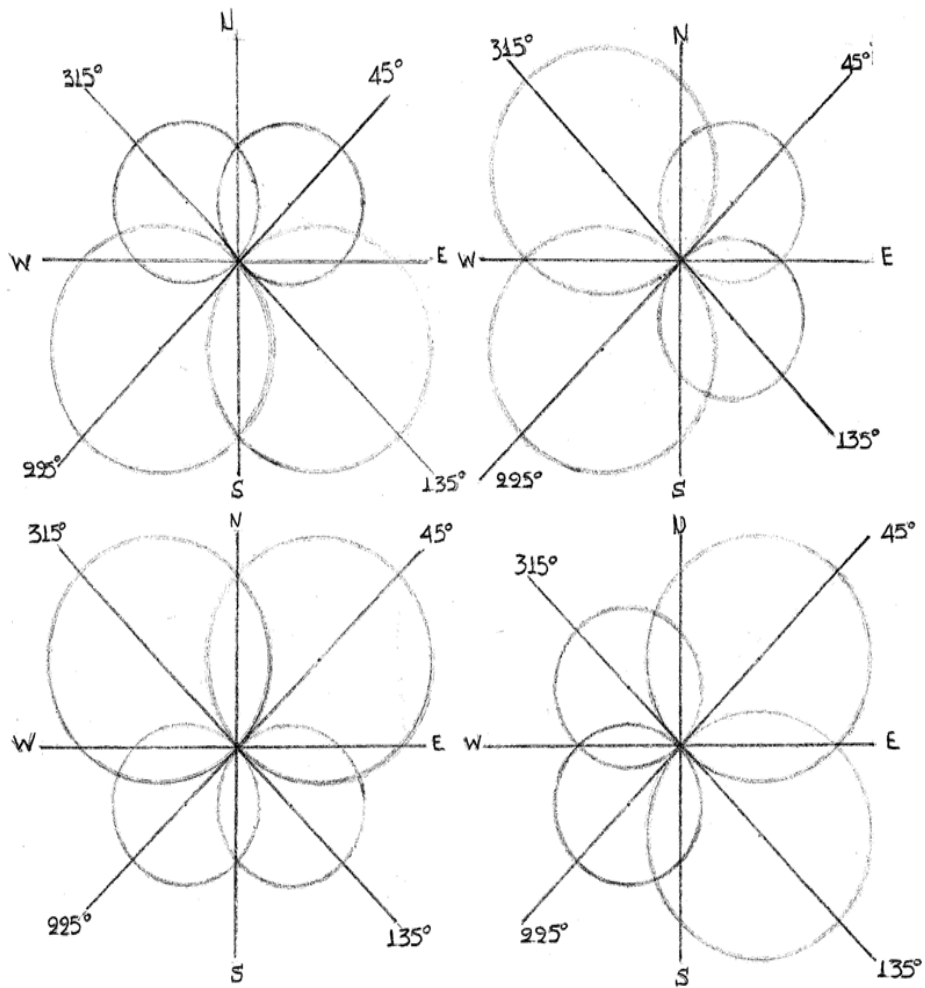
Το σφάλμα που εμφανίζεται στη διεύθυνση  $45^\circ - 225^\circ$  του Αζιμούθιου από το ζεύγος των κεραιών NW-SE που το προκαλεί, και το οποίο ονομάζεται Duantal 1, και στη διεύθυνση  $135^\circ - 315^\circ$  του Αζιμούθιου από το ζεύγος των κεραιών NW-SE που το προκαλεί, και το οποίο ονομάζεται Duantal 2.

Το Duantal μπορεί να διορθωθεί ρυθμίζοντας τον παράγοντα που το προκαλεί, δηλαδή ή την κεραία ή τη γραμμή μεταφοράς ή το γωνιόμετρο (στάθμη σήματος ή και φάση).

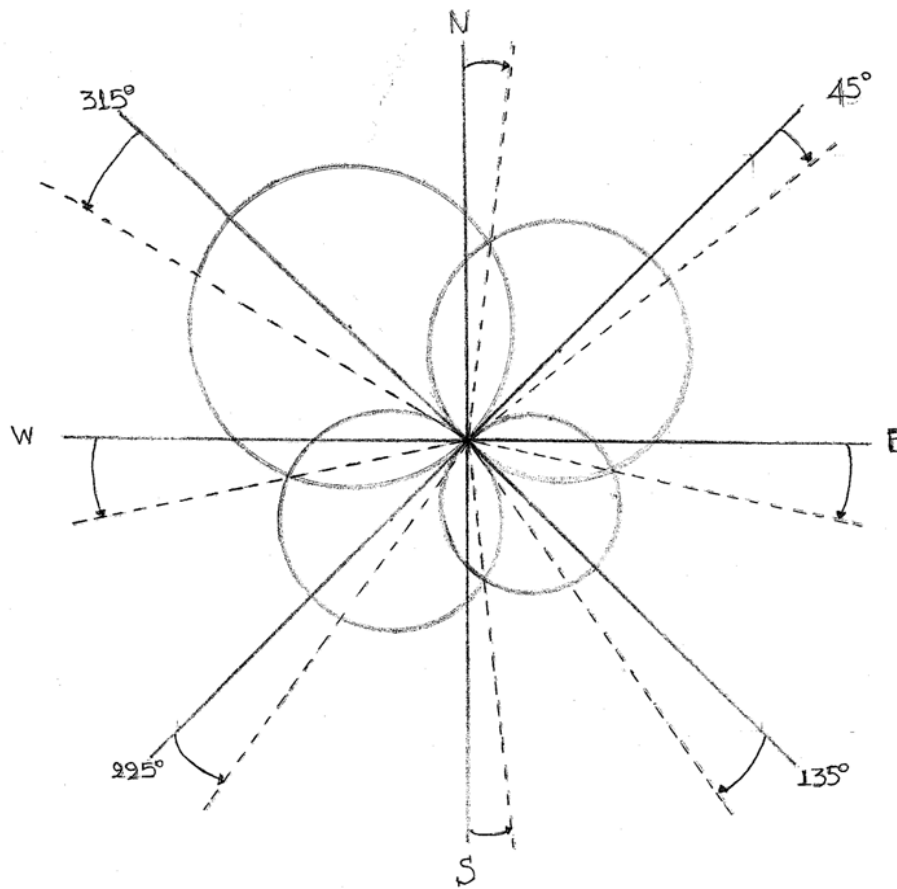
Τα σημεία αυτά  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  και  $315^\circ$  ονομάζονται null points.



Σχήμα 4.1.1 - Duantal Error μεταξύ των κεραιών του ίδιου ζεύγους

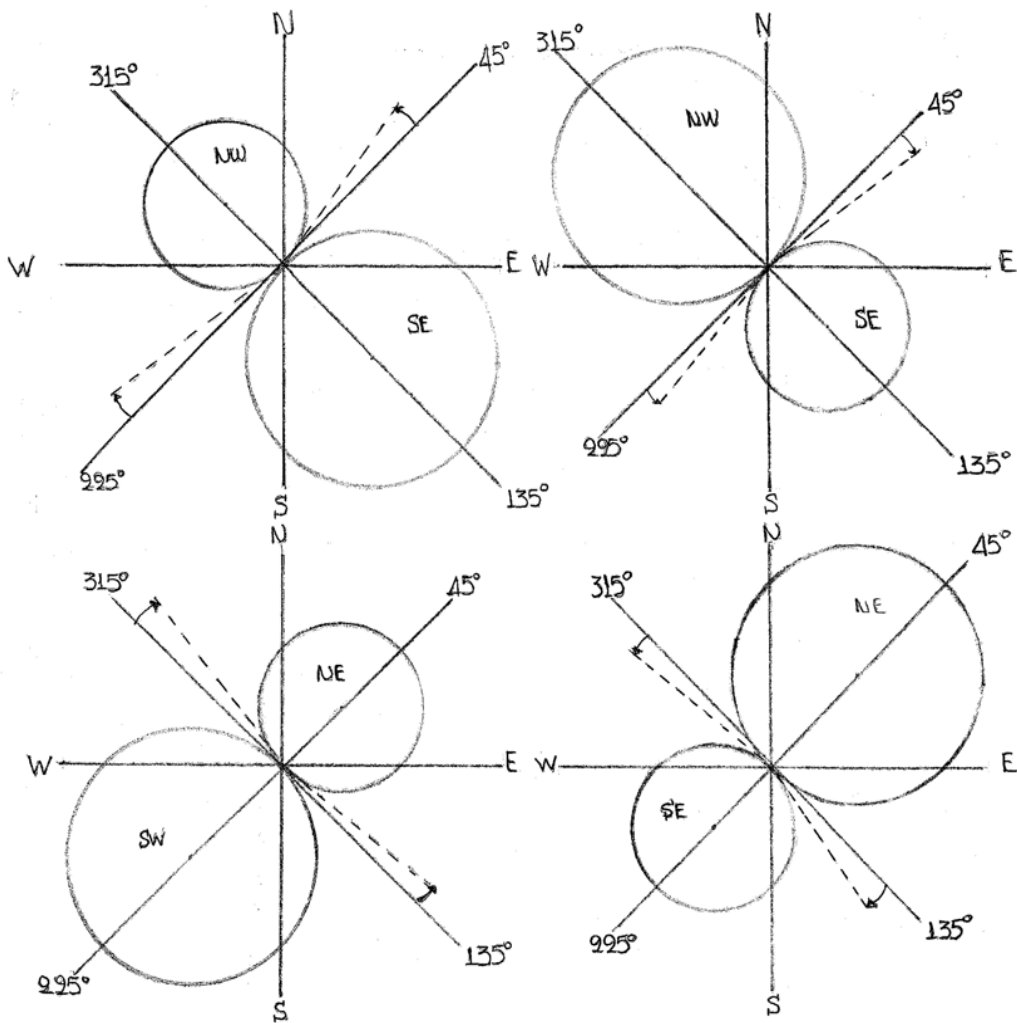


Σχήμα 4.1.2 - Ductal Error μεταξύ των κεραιών και των δύο ζευγών ταυτοχρόνως



Σχήμα 4.1.3 - Double Ductal Error





Σχήμα 4.1.4 - Μέγιστη Τιμή Σφάλματος Duanal

## 2) Quadrantal error

Είναι το σφάλμα που προκαλείται από ανισοροπίες που εμφανίζονται μεταξύ των δύο Sidebands, αλλά και του Variable συνολικά, οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε misphasing κατάσταση μεταξύ των ζευγαριών των κεραιών του συστήματος δηλαδή μεταξύ του ζεύγους NW-SE και του ζεύγους NE-SW, ή και σε κακή ρύθμιση του γωνιομέτρου (βλέπε Σχήμα 4.1.5). Στο Σχήμα φαίνεται πως το σφάλμα Quadrantal εμφανίζει τη μέγιστη τιμή του στους άξονες Cardinal και βλέπουμε και πώς τους παραμορφώνει. Το Quadrantal μπορεί να διορθωθεί ρυθμίζοντας τον παράγοντα που το προκαλεί που μπορεί να είναι η σχέση των δύο Sidebands μεταξύ τους (πλάτος, φάση), δηλαδή ρύθμιση ισχύος του κάθε Sideband χωριστά, γραμμής μεταφοράς (λόγω στασίμων κυμάτων), ρυθμίζοντας το phasing ή και το γωνιόμετρο.

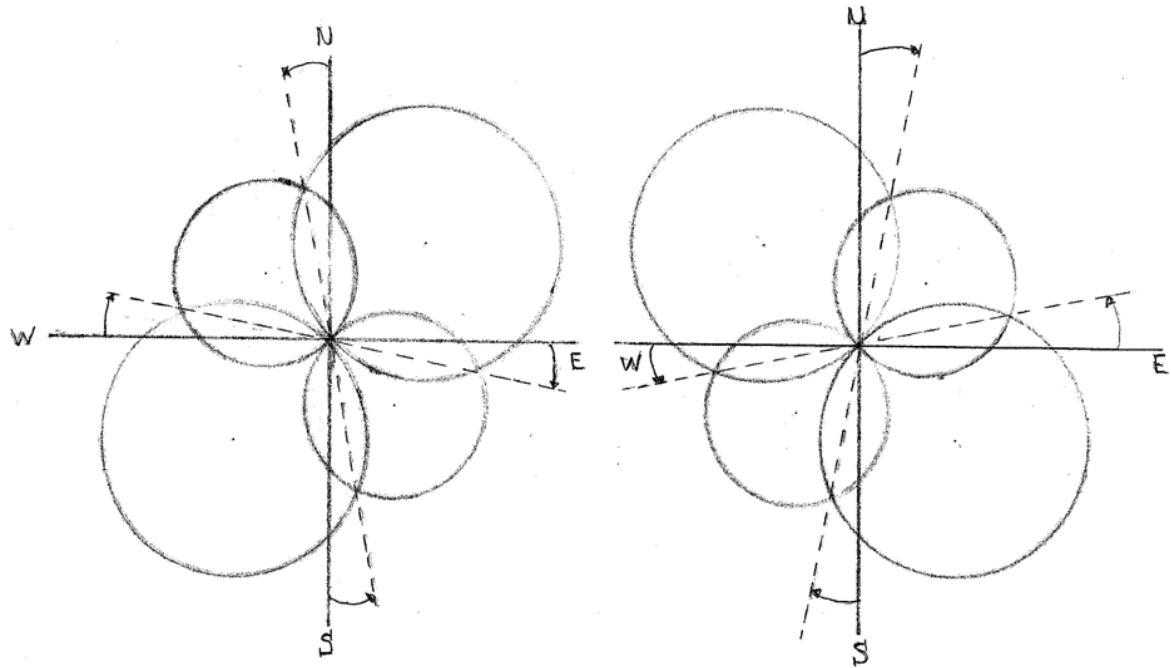
Είναι το σφάλμα που εμφανίζει τη μέγιστη τιμή του στα τέσσερα σημεία  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  γύρω από το VOR, τα οποία και ονομάζονται Cardinal Points.

## 3) Octantal error

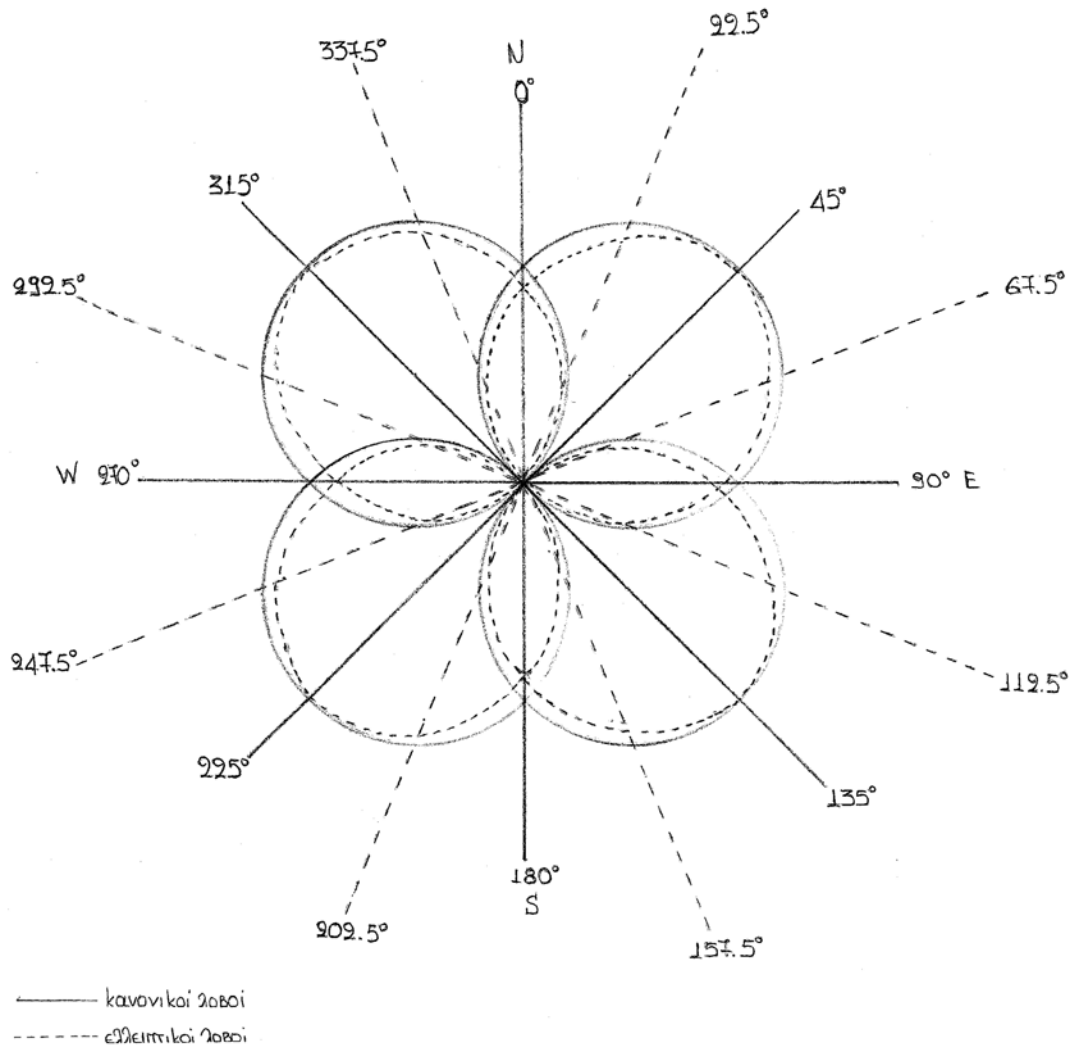
Είναι ένα σφάλμα που εμφανίζεται σε οκτώ σημεία του Αζιμούθιου μεταξύ των Cardinal και null points και το οποίο οφείλεται είτε στο έδαφος είτε σε κακή ρύθμιση μεταξύ των δίπολων των κεραιών που αποτελούν το σύστημα.

Τα σημεία αυτά είναι ακέραια θετικά περιττά πολλαπλάσια των  $22.5^\circ$  (βλέπε Σχήμα 4.1.6), δηλαδή είναι  $22.5^\circ$ ,  $67.5^\circ$ ,  $112.5^\circ$  κ.λ.π. Παρατηρούμε ότι αυτό το σφάλμα είναι υπέρ-πολύπλοκο μεν σχεδόν πάντα όμως είναι μικρού εύρους. Στην περίπτωση που αυτό προκύπτει από τις κεραιές μπορεί να διορθωθεί, εάν αυτό είναι εφικτό, ανάλογα με την τεχνολογία κατασκευής της κεραίας. Στην περίπτωση δε που αυτό οφείλεται στο έδαφος δεν μπορούν να γίνουν πολλά πράγματα παρά μόνο ίσως επιλέγοντας άλλη καλύτερη θέση εγκατάστασης, η οποία όμως μπορεί να είναι δαπανηρή και απαγορευτική.

Όλα αυτά τα σφάλματα συνεισφέρουν στον συνολικό σφάλμα του VOR το οποίο έχει και ουσιαστικό χαρακτήρα και το οποίο θα μπορούσε να μελετήσει κανείς με τη γενικότερη θεωρία των σφαλμάτων. Το σφάλμα που είναι η διαφορά από το μέγιστο θετικό μέχρι το μέγιστο αρνητικό σφάλμα το ονομάζουμε διασπορά ή Error Spread.



Σχήμα 4.1.5 - Quadrantal Error



Σχήμα 4.1.6 - Octantal Error

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2.1 ΜΕΛΕΤΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ VOR

Για την μελέτη του σφάλματος VOR στην πράξη απαιτείται η εκτέλεση μετρήσεων σε δυναμική λειτουργία από το έδαφος (Ground Check) οι οποίες εκτελούνται με τον εξής τρόπο. Αφού κατασκευαστεί υπόβαθρο κύκλου σε κάποια απόσταση από την κεραία του VOR μερικών δεκάδων μέτρων χαρτογραφούνται μόνιμες Αζιμουθιακές θέσεις με τη βοήθεια τοπογραφικών μεθόδων και ορίζονται οι θέσεις επί της περιφέρειας με σαφώς καθορισμένο Αζιμούθιο, η καθεμία από αυτές σε σχέση με το Μαγνητικό Βορρά. Σε αυτές τις θέσεις τοποθετείται διαδοχικά δίπολος κεραία συντονισμένη στη συχνότητα του VOR η οποία ονομάζεται Field Detector. Το σήμα στην έξοδο του Field Detector οδηγείται στη μονάδα Monitor του VOR η οποία έχει όλα τα κυκλώματα για την αποκωδικοποίηση του σήματος VOR και την απεικόνιση του Αζιμούθιου σε ενδεικτική. Εφαρμόζοντας τον τύπο  $CE = MA - OM$  μπορούμε να υπολογίσουμε το αλγεβρικό σφάλμα που μετρείται στη συγκεκριμένη θέση. Εκτελώντας όλες τις μετρήσεις στα καθορισμένα σημεία του κύκλου μπορούμε να χαράξουμε την καμπύλη σφάλματος στην οποία φαίνεται πώς αυτό είναι κατανοημένο στον Αζιμουθιακό κύκλο. Από τη μελέτη της καμπύλης αυτής μπορούν να υπολογιστούν τα σφάλματα που έχουν αναφερθεί παραπάνω. Η μελέτη των σφαλμάτων μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, με γραφικό τρόπο (εμπειρικός) και με μαθηματικό τρόπο εφαρμόζοντας την ανάλυση Fourier στην πρακτική καμπύλη του σφάλματος.

Η εφαρμογή της ανάλυσης Fourier για τη μελέτη της καμπύλης του σφάλματος είναι εφικτή δεδομένου ότι η καμπύλη αυτή είναι περιοδική αφού εξελίσσεται από 0 έως  $2\pi$  και επαναλαμβάνεται. Πρόκειται για περίπτωση διάκριτης περιοδικής συνάρτησης (αφού έχουμε μόνο μερικές τιμές της). Και η εφαρμογή FFT (Fast Fourier Transform) μπορεί να εφαρμοστεί, όμως εμείς επιλέξαμε να εφαρμόσουμε τον απλό μετασχηματισμό.

Εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό Fourier η καμπύλη του σφάλματος αναλύεται και δίδει την παρακάτω σειρά:

$$E(\omega\Delta\theta) = E_d + E_1 \sin(\omega\Delta\theta) + E_2 \sin(2\omega\Delta\theta) + E_3 \sin(3\omega\Delta\theta) + E_4 \sin(4\omega\Delta\theta) + R_n$$

(1)

Όπου,

$E_d$ , είναι ο πρώτος σταθερός όρος που ονομάζεται μετατόπιση (displacement), προκύπτει ως η μέση τιμή των σφαλμάτων και οφείλεται σε λανθασμένη εγκατάσταση της κεραίας (μετατοπισμένη σε σχέση με το Μαγνητικό Βορρά)

$E_1 \sin(\omega\Delta\theta)$ , είναι το Duantal Error το οποίο εμφανίζει δύο κορυφές στον κύκλο

$E_2 \sin(2\omega\Delta\theta)$ , είναι το Quadrantal Error το οποίο εμφανίζει τέσσερις κορυφές στον κύκλο

$E_3 \sin(3\omega\Delta\theta)$ , είναι το σφάλμα των 90Hz το οποίο εμφανίζει έξι κορυφές, ονομάζεται βόμβος των 90Hz ή 90Hz Hum και συνήθως είναι αμελητέο και δεν μας απασχολεί

$E_4 \sin(4\omega\Delta\theta)$ , είναι το Octantal Error το οποίο εμφανίζει οκτώ κορυφές στον κύκλο

$R_n$ , είναι οι όροι ανώτερης τάξης άλλα είναι αμελητέας τιμής και δεν λαμβάνονται υπόψη

Παρακάτω παραθέτουμε ένα παράδειγμα με πραγματικές μετρήσεις και προβαίνουμε στην ανάλυσή του για λόγους πληρότητας.

Ένα σύνολο μετρήσεων σφάλματος έχει ως εξής:

<u>Αζιμουθιακή θέση (<math>\Delta\theta</math>)</u>	<u>Μετρηθέν Σφάλμα (<math>E(\Delta\theta)</math>)</u>
<u>Μοίρες</u>	<u>Μοίρες</u>
22.5	2.5
45	3.0
67.5	0.3
90	-1.1
112.5	-1.5
135	-1.0
157.5	-0.5
180	0.1
202.5	2.0
225	1.9
247.5	0.0
270	1.1
292.5	0.8
315	-0.8
337.5	0.5
360	-0.5

Συνολικά έχουμε 16 τιμές σφάλματος μετρημένο σε ισαπέχουσες θέσεις. Αυτό θα το απεικονίσουμε γραφικά συναρτήσει της Αζιμουθιακής θέσης με τη βοήθεια του Matlab<sup>3</sup>.

Για όσα ακολουθούν υπάρχει ο αντίστοιχος κώδικας σε Matlab στο Παράρτημα Α.

1. Γραφική απεικόνιση (Γράφημα 1) της κατανομής του Σφάλματος στον κύκλο
2. Υπολογισμός σταθερού όρου της σειράς Fourier, ο οποίος δίδεται από τη σχέση:

$$E_d = 1 / (16\Delta\theta) * \sum_{j=1}^{16} E(\Delta\theta * j) * \Delta\theta \quad (2)$$

και το αποτέλεσμα αυτού είναι  $E_0 = 0.4250$

3. Γραφική απεικόνιση σταθερού όρου (Γράφημα 2)
4. Υπολογισμός συντελεστών των επόμενων όρων της σειράς Fourier, οι οποίοι δίδονται από τη σχέση:

$$E_n = 1/\pi * \sum_{j=1}^{16} E(\Delta\theta * j) * \sin(2\pi n\Delta\theta * j) \quad (3)$$

Και το αποτέλεσμα αυτών είναι:

*syntelestis1* = -0.1557

*syntelestis2* = 0.0645

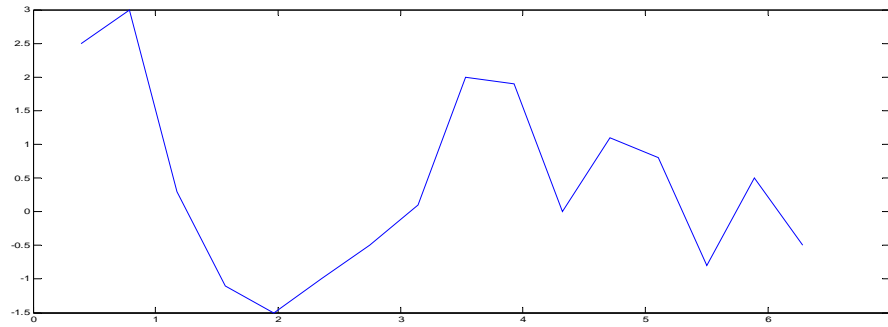
*syntelestis3* = 0.1290

*syntelestis4* = -0.1179

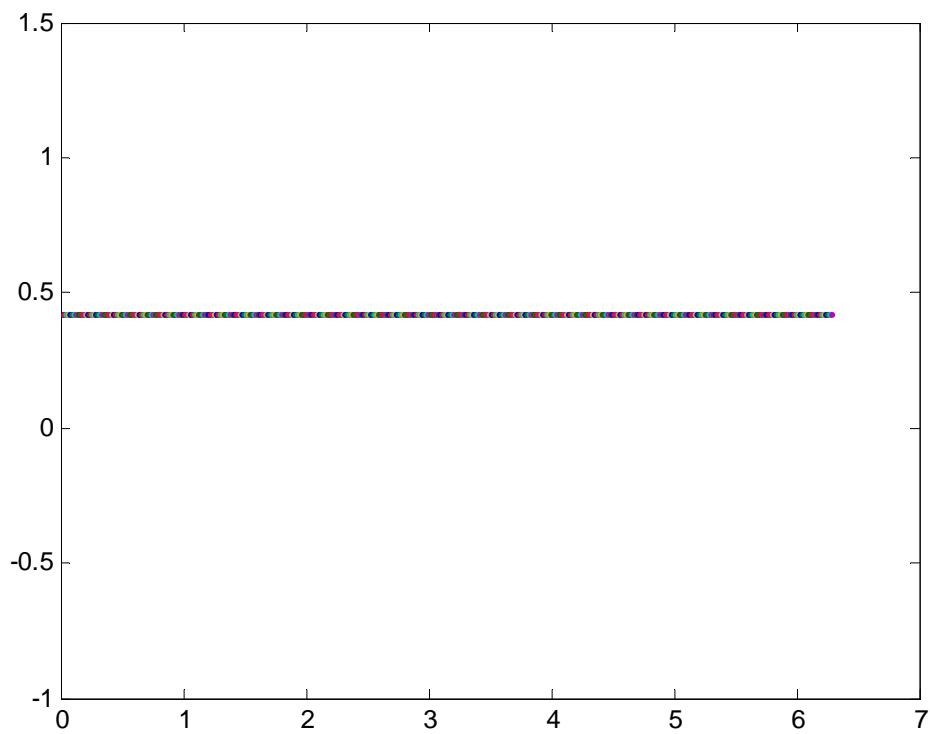
5. Γραφική απεικόνιση πρώτου όρου (Γράφημα 3)
6. Γραφική απεικόνιση δεύτερου όρου (Γράφημα 4)
7. Γραφική απεικόνιση τρίτου όρου (Γράφημα 5)
8. Γραφική απεικόνιση τέταρτου όρου (Γράφημα 6)

Τέλος, πρέπει να προσθέσουμε ότι για τη συνεχή παρακολούθηση της λειτουργίας του VOR γίνονται δύο ειδών έλεγχοι. Ο έλεγχος από το έδαφος (Ground Check) που γίνεται κάθε μήνα και ο έλεγχος από τον αέρα (Flight Check) ο οποίος γίνεται κάθε 6 μήνες με τη βοήθεια αεροσκάφους και με κατάλληλο εξοπλισμό. Έτσι, όποτε διαπιστωθεί ότι το σφάλμα είναι αυξημένο, το εμπλεκόμενο προσωπικό επεμβαίνει για τη διόρθωσή του.

<sup>3</sup> Παρατήρηση: Όλες οι γωνίες δίδονται σε ακτίνια

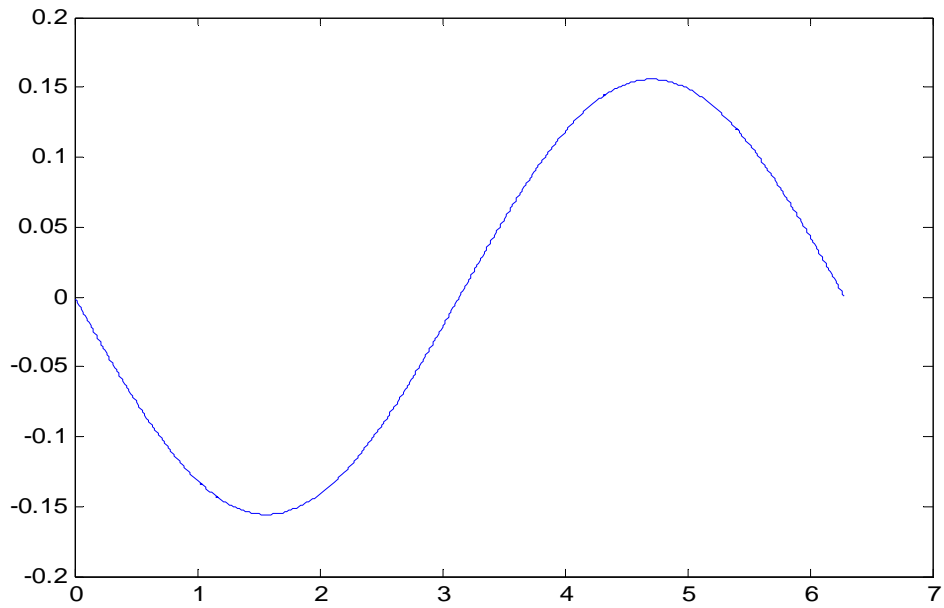


Γράφημα 1 - Κατανομή Σφάλματος στον κύκλο

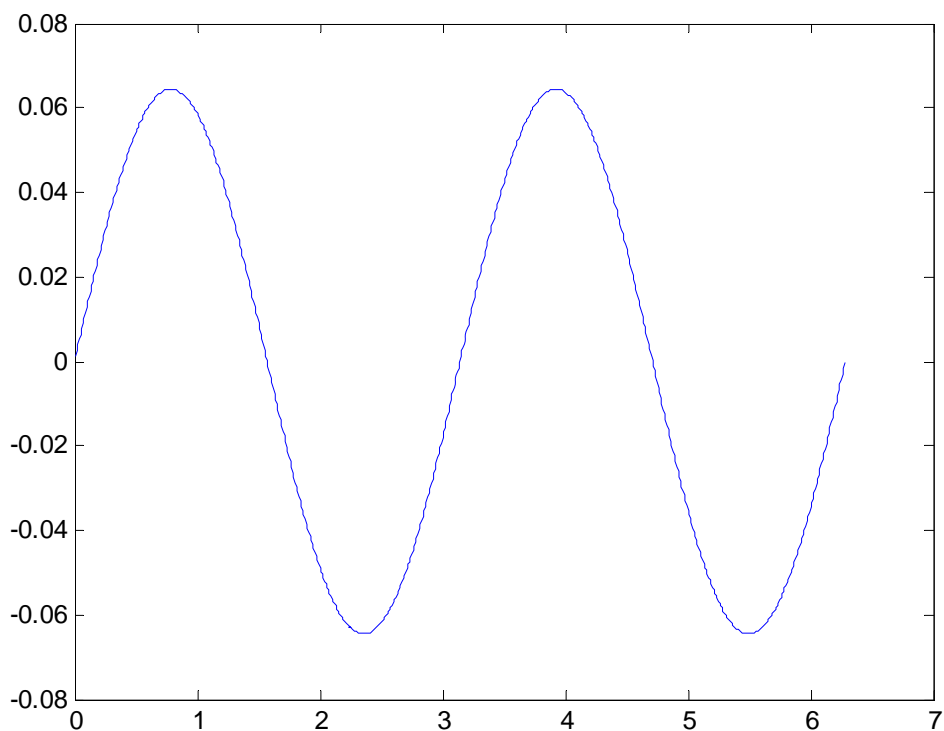


Γράφημα 2 - Σταθερός όρος E0

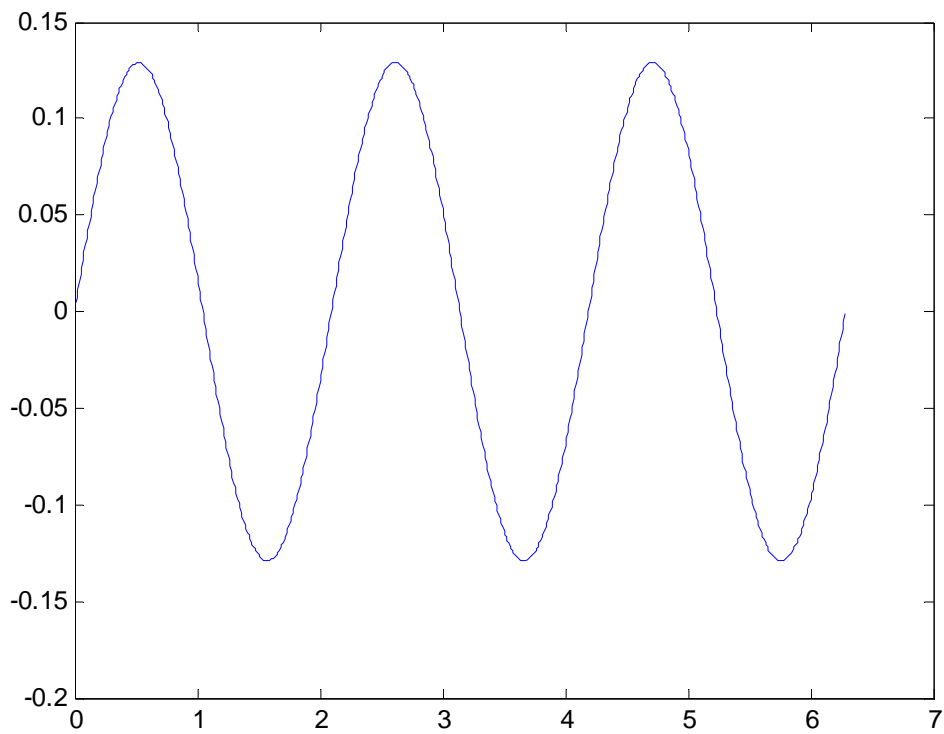




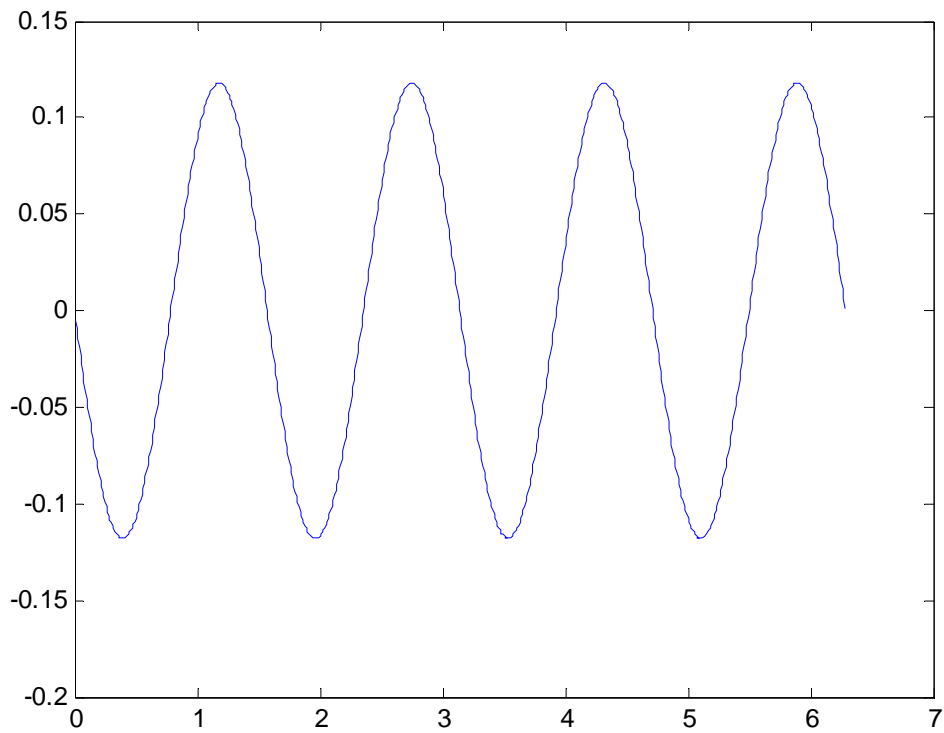
**Γράφημα 3 - Πρώτος όρος (Quadrantal Error)**



**Γράφημα 4 - Δεύτερος όρος (Quadrantal Error)**



**Γράφημα 5 - Τρίτος όρος (Σφάλμα 90Hz)**



**Γράφημα 6 - Τέταρτος όρος (Octantal Error)**

## ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αν και η παρούσα εργασία δεν είναι επιστημονικό κείμενο, εμπεριέχει και επιστημονικές έννοιες και όχι μόνο τις τεχνικές όπως εμφανίζονται στην εφαρμογή VOR, επομένως είναι ένα πλήρες κείμενο και θεμελιώνει μία αρχή που μπορεί να προκαλέσει στον αναγνώστη να αναζητήσει περισσότερες πληροφορίες παρότι αυτό δεν είναι εύκολη εργασία δεδομένης της έλλειψης βιβλιογραφίας. Σε κάθε περίπτωση, ο αναγνώστης μπορεί να αποκομίσει τεχνική γνώση για μία εξειδικευμένη εφαρμογή.

## **Βιβλιογραφία**

- 1. *Principles of Communication Systems*, Taub Schilling, Mc Graw Hill Co**
- 2. *Κεραίες*, Μ. Αναστασιάδης**
- 3. *ICAO Annex 10 Volume I [ICAOAN10-1] - Radio Navigation Aids Ed 6***
- 4. *Τεχνικό Εγχειρίδιο, Instruction Book for Mobile T/VOR Volume I*, Toshiba**
- 5. *Τεχνικό Εγχειρίδιο, Instruction Book for Mobile T/VOR Volume II*, Toshiba**
- 6. *Instruction Manual Set, VHF Omni Range Station*, Wilcox Electric**
- 7. *Technical Manual VHF Omnidirectional Radio Range Part I*, Airsys Navigation Systems, Devision of Thales**
- 8. *Technical Manual VHF Omnidirectional Radio Range Part II*, Airsys Navigation Systems, Devision of Thales**

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### Κώδικας Matlab

1. *apeikonisi\_katanomis\_sfalmatos.m*  
`u1=0;`  
`b=2*pi./16;`  
`thita=[b, 2*b, 3*b, 4*b, 5*b, 6*b, 7*b, 8*b, 9*b, 10*b, 11*b, 12*b, 13*b, 14*b, 15*b,`  
`16*b];`  
`f=[2.5, 3.0, 0.3, -1.1, -1.5, -1, -0.5, 0.1, 2.0, 1.9, 0, 1.1, 0.8, -0.8, 0.5, -0.5];`  
`plot (thita, f)`
  
2. *upologismos\_statherou\_orou.m*  
`E=[2.5, 3.0, 0.3, -1.1, -1.5, -1, -0.5, 0.1, 2.0, 1.9, 0, 1.1, 0.8, -0.8, 0.5, -0.5];`  
`E0=(1/16)*sum(E)`
  
3. *apeikonisi\_statherou\_orou.m*  
`E0=0.4250;`  
`thita=0.01:0.01:2*pi;`  
`plot(thita,E0)`
  
4. *upologismos\_suntelestwn\_orwn*  
`u1=0;`  
`b=2*pi./16;`  
`thita=[b, 2*b, 3*b, 4*b, 5*b, 6*b, 7*b, 8*b, 9*b, 10*b, 11*b, 12*b, 13*b, 14*b, 15*b,`  
`16*b];`  
`f=[2.5, 3.0, 0.3, -1.1, -1.5, -1, -0.5, 0.1, 2.0, 1.9, 0, 1.1, 0.8, -0.8, 0.5, -0.5];`  
`for N=1:4`  
`for M=1:16`  
`thita(M);`  
`u1=(1/pi)*sin(2*pi*N*thita(M))*f(M);`  
`end`  
`syntelestis=sum(u1)`  
`end`

5. *apeikonisi\_prwtou\_orou.m*

```
syntelestis1=-0.1557;  
thita=0.01:0.01:2*pi  
prwtos=syntelestis1*sin(thita);  
plot(thita, prwtos)
```

6. *apeikonisi\_deuterou\_orou.m*

```
syntelestis2=0.0645;  
thita=0.01:0.01:2*pi  
deuteros=syntelestis2*sin(2*thita);  
plot(thita, deuteros)
```

7. *apeikonisi\_tritou\_orou.m*

```
syntelestis3=0.1290;  
thita=0.01:0.01:2*pi  
tritos=syntelestis3*sin(3*thita);  
plot(thita, tritos)
```

8. *apeikonisi\_tetartou\_orou.m*

```
syntelestis4=-0.1179;  
thita=0.01:0.01:2*pi  
tetartos=syntelestis4*sin(4*thita);  
plot(thita, tetartos)
```