



**ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΜΕΣΟΛΟΓΓΙΟΥ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ
ΝΑΥΠΑΚΤΟΥ**

ΤΜΗΜΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ

**Θέμα: Μελέτη φαινομένου Doppler στην μικροκυματική
περιοχή του Η/Μ φάσματος.**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΠΟΥΛΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

**Επιβλέπων: Ασαρίδης Ηλίας
Λούβρος Σπύρος**

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Ηλία Ασαρίδη, για την πολύτιμη βοήθεια του στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας τόσο στο θεωρητικό όσο και στο πρακτικό μέρος . Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους μου συμπαραστάθηκαν όχι μόνο υλικά, αλλά κυρίως ψυχολογικά κατά το διάστημα πραγματοποίησης της εργασίας αυτής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ:

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία γίνεται ανάλυση του Φαινομένου Doppler, των Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων, των εξισώσεων Maxwell, του Radar Doppler, των κεραιών χοάνης και επίσης έγιναν και πειραματικές μετρήσεις.

Αρχικά στο 2ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα Ηλεκτρομαγνητικά κύματα, πως δημιουργούνται, τι είναι ένα Ηλεκτρομαγνητικό κύμα, το πως διαδίδονται ακόμα και τι φαινόμενα παρατηρούνται κατά την μετάδοση αυτών των κυμάτων.

Κατόπιν στο 3ο κεφάλαιο αναγράφονται οι εξισώσεις του Maxwell αλλά και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις εξισώσεις αυτές.

Στο 4ο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση του Φαινομένου Doppler, τόσο για το ηχητικό όσο και για το ηλεκτρομαγνητικό Φαινόμενο Doppler αλλά και για το πως δημιουργείται το διακρότημα.

Έπειτα στο 5ο κεφάλαιο εξηγούμε τι είναι το Radar, που μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε, τι είναι το όπλο Radar και τα χαρακτηριστικά του Doppler Radar.

Ακόμα στο 6ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις κεραιές χοάνης. Βλέπουμε κάποιους τύπους αυτών των κεραιών και συγκεκριμένα τις κατηγορίες της πυραμιδοειδής αλλά και της κωνικής κεραιάς χοάνης.

Στο 7ο κεφάλαιο βλέπουμε δύο εξισώσεις (Συχνότητα-Πηγής και Ταχύτητας Κινητού), όπου εδώ έγιναν πειραματικές μετρήσεις με πραγματικά μηχανήματα.

Τέλος στο 8ο κεφάλαιο θα αναφερθούμε στην θεωρία σφαλμάτων οπού θα εξηγήσουμε τα πειραματικά σφάλματα που προκύπτουν από κάποιο πείραμα.

ABSTRACT:

In this dissertation analyzing the phenomenon of Doppler, electromagnetic waves, the equations of Maxwell, the Radar Doppler, antennas hopper and also made and experimental measurements.

Initially, in the second chapter refers the electromagnetic waves that are created, what is an electromagnetic wave, how is it spread even what phenomena are observed in transmission these waves.

Then in third chapter appear the Maxwell equations and the results which arise from these equations.

In fourth chapter analyzing the phenomenon of Doppler, both for radio nag for the electromagnetic Doppler effect but also how to create the beat.

Then in fifty chapter explains what is Radar, where you can use it, what is the Radar gun and characteristics of Doppler Radar.

In sixth chapter refers to antenna hoppers. We can see some types of antennas funnel and specifically the categories of immovable pyramid but also the conical antenna funnel.

In chapter seven we see two equations (frequency and speed-source Mobile) where experimental measurements are made with real machines.

Finally in chapter eight we will refer to the theory bug, where we explain the experimental errors which arising from an experiment.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	2
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ-ΠΙΝΑΚΩΝ.....	6
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
Πρόλογος.....	9
2. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ.....	11
2.1 Τι είναι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα.....	11
2.2 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.....	13
2.3 Παραγωγή Η/Μ Κυμάτων.....	14
2.4 Ιδιότητες των Η/Μ Κυμάτων.....	14
2.5 Χαρακτηριστικά ηλεκτρομαγνητικού κύματος.....	14
2.6 Τρόποι Διάδοσης Η/Μ Κυμάτων.....	15
2.7 Είδη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας	16
2.8 Πώς δημιουργούνται τα Η/Μ Πεδία.....	17
2.9 Πηγές Η/Μ ακτινοβολίας.....	17
2.10 Φαινόμενα κατά τη Μετάδοση ΗΜ Κυμάτων.....	18
2.10.1 Ανάκλαση.....	18
2.10.2 Διάθλαση.....	19
2.10.3 Περίθλαση.....	20
2.10.4 Σκέδαση.....	21
2.10.5 Φαινόμενο Doppler.....	21
2.11 Συνοπτικά για Η/Μ κύματα.....	22
3. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ Maxwell.....	23
3.1 Νόμος Faraday.....	24
3.2 Νόμος του Gauss.....	24
3.3 Νόμος του Amber.....	26
3.4 Αποτελέσματα των εξισώσεων του Maxwell.....	27

4. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ Doppler.....	29
4.1 Τι είναι φαινόμενο Doppler.....	29
4.2 Ηχητικό φαινόμενο Doppler.....	31
4.3 Ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο Doppler.....	36
4.4 Εφαρμογές του φαινομένου Doppler με ηλεκτρομαγνητικά κύματα.....	38
4.5 Διακρότημα.....	39
5. Radar-ΟΠΛΟ Radar.....	41
5.1 Radar.....	41
5.2 Είδη Ραντάρ.....	42
5.3 Οπλο Radar.....	44
5.4 Βασικά χαρακτηριστικά doppler radar.....	47
6. ΚΕΡΑΙΕΣ ΧΟΑΝΗΣ.....	49
6.1 Κεραία Χοάνης.....	49
6.2 Τύποι Χοανών.....	50
6.3 Πυραμιδοειδής χοάνη.....	51
6.4 Κωνική κεραία χοάνης.....	53
7. ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ.....	55
7.1 Πειραματική διάταξη.....	55
7.2 Γραφικές Παραστάσεις.....	58
7.2.1 Γραφική παράσταση διακροτήματος.....	58
7.3 Παρατηρητής πλησιάζει.....	59
7.3.1 Γραφική παράσταση συχνότητα πηγής.....	59
7.3.2 Γραφική παράσταση ταχύτητα κινητού.....	61
7.4 Παρατηρητής απομακρύνεται.....	63
7.4.1 Γραφική παράσταση συχνότητα πηγής.....	63
7.4.2 Γραφική παράσταση ταχύτητα κινητού.....	65

8. ΘΕΩΡΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ.....	67
8.1 Εισαγωγή.....	67
8.2 Πειραματικά Σφάλματα.....	68
8.2.1 Είδη Μετρήσεων.....	68
8.2.2 Σημαντικά Ψηφία.....	68
8.2.3 Σφάλματα Μετρήσεων.....	69
8.2.3.1 Ακρίβεια και Διακριτική Ικανότητα.....	69
8.2.3.2 Μαθηματικός Ορισμός του Σφάλματος.....	69
8.2.3.3 Κατηγορίες Σφαλμάτων.....	70
8.2.3.4 Τυχαία Σφάλματα.....	71
8.2.3.5 Συστηματικά Σφάλματα.....	72
8.2.3.6 Σημαντικά Ψηφία και Στρογγυλοποίηση.....	72
8.2.3.7 Σημαντικά Ψηφία και Σφάλματα.....	73
8.3 Πολλαπλές Μετρήσεις.....	73
8.3.1 Πολλαπλές Μετρήσεις.....	73
8.3.2 Μέσο Σφάλμα ή Τυπική Απόκλιση της μίας Μέτρησης.....	75
8.3.3 Σφάλμα ή Τυπική Απόκλιση του Μέσου Όρου.....	77
8.4 Ολικό Σφάλμα Σύνθετης Μέτρησης.....	79
 Βιβλιογραφία.....	 81

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ-ΠΙΝΑΚΩΝ

Εικόνες

Εικόνα 1 Μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος.....	12
Εικόνα 2 Πίνακας ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.....	13
Εικόνα 3 Ανάκλαση κύματος.....	18
Εικόνα 4 Διάθλαση κύματος.....	19
Εικόνα 5 Περίθλαση κύματος.....	20
Εικόνα 6 Σκέδαση κύματος.....	21
Εικόνα 7 Φαινόμενο Doppler.....	22
Εικόνα 8 Πίνακας εξισώσεων Maxwell.....	23
Εικόνα 9 Η μεταβολή των διανυσμάτων καθώς απομακρύνονται την αρχή των αξόνων.....	25
Εικόνα 10 Μεταφορά δυναμικών γραμμών.....	25
Εικόνα 11 Δυναμικές γραμμές φορτίου διαπερνούν επιφάνια.....	26
Εικόνα 12 Μαγνητικό πεδίο.....	26
Εικόνα 13 Παράδειγμα φαινομένου Doppler.....	30
Εικόνα 14 Το φάσμα του φωτός.....	37
Εικόνα 15 Απεικόνιση δύο κυμάτων με ίδιο πλάτος αλλά διαφορετική συχνότητα.....	40
Εικόνα 16 Διακρότημα.....	40
Εικόνα 17 Radar.....	42
Εικόνα 18 Όπλο Radar που μετράει την ταχύτητα ενός αυτοκινήτου.....	44
Εικόνα 19 Τύποι κεραιών χοάνης.....	50
Εικόνα 20 Πυραμοειδής και κωνική χοάνη.....	51

Εικόνα 21	Πυραμοειδή κεραία χοάνη.....	52
Εικόνα 22	Κωνική κεραία χοάνη.....	53
Εικόνα 23	. Πειραματική διάταξη φαινομένου doppler.....	55
Εικόνα 24	. Τροφοδοτικό της Gunn διόδου.....	56
Εικόνα 25	. Κεραία εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	56
Εικόνα 26	. Προσομοιωτής ταχύτητας.....	57
Εικόνα 27	. Διακρότημα.....	58
Εικόνα 28	Γραφική παράσταση συχνότητα πηγής	60
Εικόνα 29	Γραφική παράσταση ταχύτητας κινητού.....	62
Εικόνα 30	Γραφική παράσταση συχνότητα πηγής	64
Εικόνα 31	Γραφική παράσταση ταχύτητας κινητού.....	66
Πίνακες		
Πίνακας 1.1	Συχνότητα πηγής.....	59
Πίνακας 1.2	Ταχύτητας κινητού.....	61
Πίνακας 1.3	Συχνότητα πηγής.....	63
Πίνακας 1.4	Ταχύτητας κινητού.....	65

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι να κατανοήσουμε το Φαινόμενο Doppler, την χρήση του Doppler Radar αλλά και την μετάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Γίνετε ανάλυση για την μεταφορά σήματος με την βοήθεια των μικροκυμάτων. Το Doppler Radar χρησιμοποιείται για την ανίχνευση κινούμενων αντικειμένων και την διαμόρφωση της ακτινοβολίας έτσι ώστε να μπορούμε να διαβιβάσουμε μέσω αυτής ένα σήμα.

Το Doppler Radar εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα τα οποία συναντάμε καθημερινά στην ζωή μας, άλλα είναι επιβλαβή στον ανθρώπινο οργανισμό και άλλα όχι. Κατά την μετάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων προκύπτουν διάφορα φαινόμενα, εμάς θα μας απασχολήσει συγκεκριμένα το φαινόμενο Doppler. Θα αναφερθούμε στην χρήση αλλά και τι είναι το Radar που χρησιμοποιείται από την αστυνομία για την μέτρηση της ταχύτητας των κινούμενων αυτοκινήτων.

Ακόμα γίνετε αναφορά και στις εξισώσεις του Maxwell, (ο οποίος θεωρείτε ο ιδρυτής της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας), στους νόμους του Gauss, Faraday και Amber.

Κατόπιν γίνετε ανάλυση των κεραιών χοάνης όπου εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα και ειδικότερα στις κατηγορίες της κωνικής και της πυραμιδοειδής χοάνης.

Στο τέλος της πτυχιακής εργασίας θα βρούμε την θεωρία σφαλμάτων, όπου μας βοηθάει για την ανάλυση των πειραματικών σφαλμάτων που προκύπτουν από την υλοποίηση κάποιου πειράματος.

Πρέπει να σημειωθεί ότι έγιναν πειραματικές μετρήσεις σε εργαστηριακό χώρο με πλήρες εξοπλισμό.

Ηλεκτρομαγνητικά Κύματα

2.1 Τι είναι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα:

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι η ταυτόχρονη διάδοση ενός ηλεκτρικού και ενός μαγνητικού πεδίου στο χώρο και στο χρόνο με την ταχύτητα του φωτός. Ποικίλες εφαρμογές τους βρίσκονται στην υπηρεσία του ανθρώπου, καθώς καθημερινά χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία οικιακών ηλεκτρικών συσκευών (όπως για παράδειγμα ραδιόφωνο και τηλεόραση), ασύρματων τηλεφώνων, καθώς και σε ιατρικές εφαρμογές κ.ά. Επιπλέον χρησιμοποιούνται στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα της Πυροσβεστικής, της Αστυνομίας, των ασθενοφόρων αλλά και των ραντάρ.

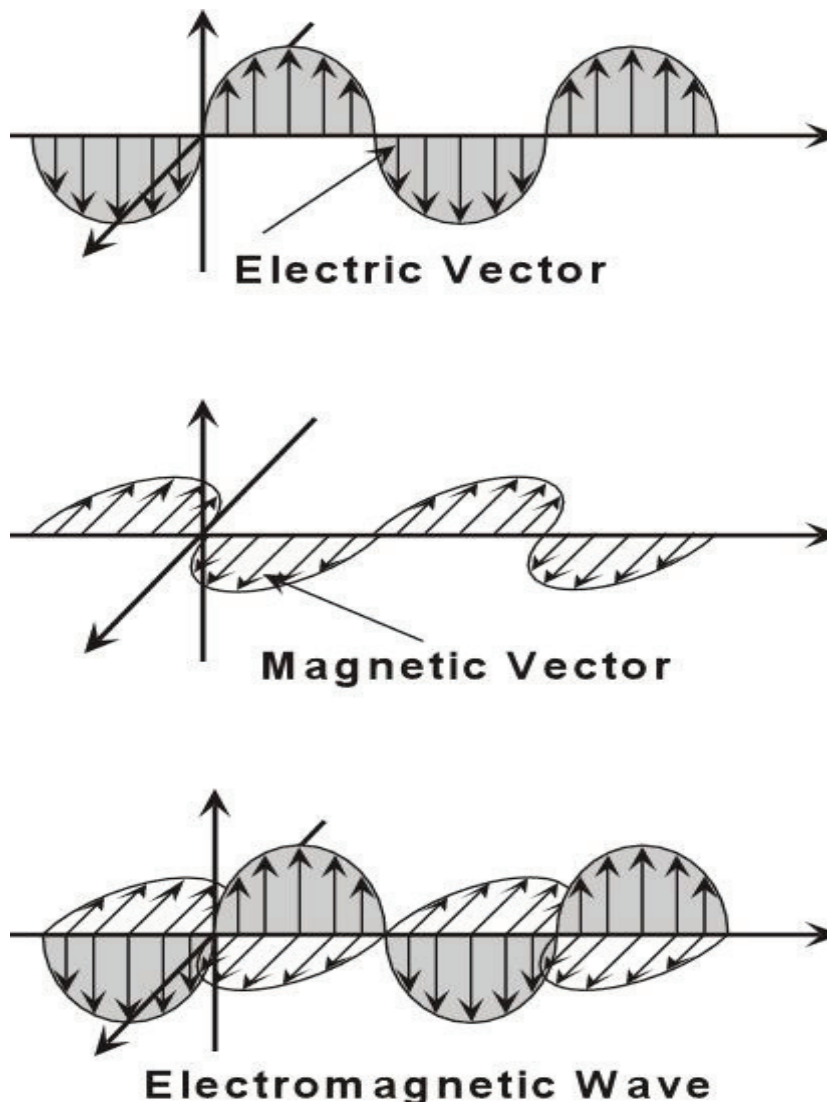
Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αποτελείται από ένα ηλεκτρικό πεδίο (έντασης E) και ένα μαγνητικό πεδίο (έντασης B) τα οποία συνυπάρχουν στο χώρο και είναι τοπικά και χρονικά μεταβαλλόμενα. Τα διανύσματα E και B είναι κάθετα μεταξύ τους και μάλιστα κάθετα προς την διεύθυνση διάδοσης του κύματος, συνεπώς είναι εγκάρσια.

Εγκάρσιο ονομάζεται ένα οδεύον κύμα το οποίο διαδίδεται σε μια διεύθυνση κάθετη της διεύθυνσης των ταλαντώσεων που παράγουν το κύμα, σε αντίθεση με ένα διαμήκες κύμα στο οποίο η διεύθυνση είναι παράλληλη της διεύθυνσης των ταλαντώσεων. Αν για παράδειγμα θεωρήσουμε δύο διαστάσεις και ένα κύμα που κινείται κατά την διεύθυνση του άξονα X , τότε εάν πρόκειται για εγκάρσιο κύμα, οι ταλαντώσεις θα συμβαίνουν κατά τη διεύθυνση του άξονα Y . Στην περίπτωση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έγκειται στο γεγονός ότι σε αυτά εμφανίζονται δύο διαφορετικές ταλαντώσεις. Η ταλάντωση του ηλεκτρικού και η ταλάντωση του μαγνητικού πεδίου.

Τύποι ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου:

- $E = E_{\max} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$ --> Ηλεκτρικό Πεδίο
- $B = B_{\max} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$ --> Μαγνητικό Πεδίο

Όταν σε μια από τις δύο εξισώσεις έχουμε το t σταθερό τότε λέμε ότι υπάρχει στιγμιότυπο, ενώ όταν έχουμε το x σταθερό τότε έχουμε ταλάντωση.



Εικόνα 1: Μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα έχει διάδοση ταχύτητας στο κενό ίση με $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$ και ισχύει ο τύπος $c = \lambda \cdot f$ (θεμελιώδης νόμος της κυματικής), όπου η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος c , η συχνότητα f και το μήκος κύματος λ συνδέονται με τη σχέση αυτή, ενώ στο υλικό η ταχύτητα διάδοσης του είναι $v < c$ και ισχύει ο τύπος $v = \lambda \cdot f$. Η ταχύτητα και το μήκος κύματος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο κενό είναι διαφορετικό απ' ότι είναι στο υλικό $v \neq c$ και $\lambda_0 \neq \lambda$, ενώ η συχνότητα παραμένει η ίδια και στο κενό και στο υλικό.

2.2 Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα:

Ονομασία Ζώνης	Όρια Συχνοτήτων	Εφαρμογες
Extremely Low Frequencies (ELF)	1 Hz - 10 kHz	Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
Very Low Frequencies (VLF)	10 kHz - 30 kHz	Ραδιοπλοήγηση, Ραδιοφωνία AM
Low Frequencies (LF)	30 kHz - 300 kHz	Ραδιοπλοήγηση, Ραδιοφωνία AM
Median Frequencies (MF)	300 kHz - 3 MHz	Ραδιοφωνία AM
High Frequencies (HF)	3 MHz - 30 MHz	Ραδιοφωνία AM
Very High Frequencies (VHF)	30 MHz - 300 MHz	Ραδιοφωνία FM, Τηλεόραση, Κινητή τηλεφωνία (1ης γενιάς)
Ultra High Frequencies (UHF)	300 MHz - 3 GHz	Ραδιοζεύξεις, Τηλεόραση, Ραδιοπλοήγηση, Κινητή τηλεφωνία (2ης γενιάς), RADAR
Super High Frequencies (SHF)	3 GHz - 30 GHz	Επίγειες και Δορυφορικές Ζεύξεις, Ψηφιακή Δορυφορική Τηλεόραση, RADAR
Extremely High Frequencies (EHF)	30 GHz - 300 GHz	Μετεωρολογία, Αστρονομία

Εικόνα 2: Πίνακας ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

2.3 Παραγωγή Η/Μ Κυμάτων:

Σύμφωνα με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell :

- Όταν ένα ηλεκτρικό φορτίο ταλαντώνεται (και γενικότερα επιταχύνεται) τότε παράγει ταλαντούμενο ηλεκτρικό πεδίο.
- Το ταλαντούμενο ηλεκτρικό πεδίο με τη σειρά του παράγει ταλαντούμενο μαγνητικό πεδίο.

Τα Η/Μ κύματα παράγονται κάθε φορά που ένα φορτισμένο σωματίδιο επιταχύνεται ή επιβραδύνεται εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με την μορφή Η/Μ κύματος.

2.4 Ιδιότητες των Η/Μ Κυμάτων:

- ανακλώνται από μεταλλικές επιφάνειες
- διαθλώνται όταν διέρχονται από διηλεκτρικά
- παράγουν φαινόμενα συμβολής και περίθλασης

2.5 Χαρακτηριστικά ηλεκτρομαγνητικού κύματος:

Πλάτος: Το πλάτος ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος σχετίζεται με την ένταση που έχει ή την φωτεινότητα (όπως συμβαίνει στο ορατό φως).

Μήκος κύματος: Η κλίμακα των ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών ξεκινά από άπειρα μήκη κύματος ως μερικά εκατοντάκης χιλιοστά του χιλιοστού. Το μήκος κύματος (λ) προσδιορίζει την απόσταση που χωρίζει δύο διαδοχικά σημεία ίδιας έντασης και μετριέται σε μέτρα.

Συχνότητα: Η συχνότητα ενός κύματος είναι ίση με την ταχύτητά του προς το μήκος κύματος $\left(f = \frac{c}{\lambda}\right)$. Μετριέται σε Hertz (Hz) και εκφράζει πόσα τέτοια σημεία παρουσιάζονται σε χρόνο ενός δευτερολέπτου.

Ταχύτητα: Όπως είπαμε παραπάνω η ταχύτητα ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο κενό είναι περίπου 300.000 χλμ το δευτερόλεπτο. Βέβαια όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα διασχίζει την ύλη, η ταχύτητά του περιορίζεται και εξαρτάται από τον συντελεστή διάδοσης (Velocity factor) που είναι συνήθως 0.66-0.90

2.6 Τρόποι Διάδοσης H/M Κυμάτων:

Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στην ατμόσφαιρα δεν εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες αυτές καθ' αυτές των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων αλλά και από τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας, εξαιτίας του ότι η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εξαρτάται σημαντικά από την συχνότητα.

Τα κύματα διαδίδονται σε ευθείες τροχιές εκτός αν η ατμόσφαιρα με τα χαρακτηριστικά της αλλάξουν την πορεία τους. Εκτός ελαχίστων περιπτώσεων κύματα σε συχνότητες άνω της περιοχής HF διαδίδονται σε ευθείες τροχιές. Για συχνότητες κάτω από την ζώνη HF τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται γύρω από την γη, ορισμένες φορές κάνοντας πλήρη περιστροφή

Εδαφικού κύματος: είναι ο επικρατέστερος τρόπος διάδοσης για τις συχνότητες στην ζώνη των μεσαίων κυμάτων (MF). Αυτή είναι η ζώνη συχνοτήτων που χρησιμοποιείται για AM ραδιοφωνία και ναυτιλιακές ραδιοεκπομπές. Οι κύριες διαταραχές που επικρατούν στη ζώνη αυτή είναι ατμοσφαιρικός θόρυβος, θόρυβος από ανθρώπινες δραστηριότητες και θερμικός θόρυβος.

Κύματος χώρου: προκύπτει από μεταδιδόμενα σήματα εκτρεπόμενα ή διαθλώμενα από την ιονόσφαιρα, η οποία αποτελείται από μερικά στρώματα με φορισμένα σωματίδια (ιόντα) σε ύψη 30-250 μίλια επάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Κατά την διάρκεια της ημέρας η θέρμανση της κατώτερης ατμόσφαιρας από τον ήλιο προκαλεί το σχηματισμό των κατώτερων στρωμάτων σε ύψος κάτω των 75 μιλίων. Αυτά τα κατώτερα στρώματα, ιδιαίτερα το λεγόμενο στρώμα-D, απορροφά τις συχνότητες κάτω των 2 MHz, περιορίζοντας έτσι σοβαρά την εμβέλεια της διάδοσης του κύματος-χώρου των ραδιοσταθμών AM. Όμως, κατά την διάρκεια των βραδινών ωρών η ηλεκτρονική πυκνότητα των κατώτερων στρωμάτων της ιονόσφαιρας μειώνεται απότομα και η απορρόφηση συχνοτήτων που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας περιορίζεται σημαντικά. Στα κύματα HF έχουμε ως προσθετικό θόρυβο ένα συνδιασμό ατμοσφαιρικού και θερμικού θορύβου.

Οπτικής επαφής: ο πομπός και η κεραία λήψης θα πρέπει να είναι σε απευθείας οπτική επαφή με ελάχιστα ή καθόλου εμπόδια. Για το λόγο αυτό, οι σταθμοί εκπομπής τηλεόρασης στα VHF και UHF υπερυψώνουν τις κεραίες τους προκειμένου να επιτύχουν μεγάλη περιοχή κάλυψης. Γενικά, η περιοχή κάλυψης οπτικής επαφής περιορίζεται λόγω της καμπυλότητας της γης. Ο επικρατέστερος θόρυβος που περιορίζει την επίδοση των συστημάτων επικοινωνιών της περιοχής συχνοτήτων VHF και UHF είναι ο θερμικός θόρυβος που παράγεται από τον δέκτη και ο κοσμικός θόρυβος που συλλαμβάνει η κεραία.

2.7 Είδη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας:

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτελείται από κύματα που στην πλειονότητά τους είναι αόρατα. Από την ακτινοβολία αυτή, μόνο ένα μικρό τμήμα της μπορεί να εντοπισθεί από το ανθρώπινο μάτι και αυτό είναι το ορατό φως. Τα υπόλοιπα είδη δεν μπορούμε να τα αντιληφθούμε με τις αισθήσεις μας. Όμως, έχουν επίδραση στην ανθρώπινη ζωή. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία εμφανίζονται σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων (ηλεκτρομαγνητικό φάσμα) που χωρίζεται σε επιμέρους περιοχές (ζώνες συχνοτήτων). Το φάσμα των συχνοτήτων περιλαμβάνει την ιονίζουσα και τη μη ιονίζουσα ακτινοβολία.

Η ιονίζουσα ακτινοβολία είναι αυτή που έχει συχνότητα υψηλότερη από το ορατό φως και μεταφέρει πολύ υψηλή ενέργεια. Ονομάζεται «ιονίζουσα», διότι προκαλεί ιονισμό της ύλης, δηλαδή το φωτόνιο της διαθέτει τέτοια ενέργεια, ώστε μπορεί να εκδιώξει ένα ηλεκτρόνιο από ένα άτομο της ύλης. Η ιονίζουσα ακτινοβολία αυτή μπορεί να προκαλέσει άμεση βλάβη στο DNA των κυττάρων. Στην μη ιονίζουσα ακτινοβολία οι πηγές των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, στα οποία υποβαλλόμαστε καθημερινά, είναι μεγάλου μήκους κύματος και χαμηλής συχνότητας. Δεν μπορούν να προκαλέσουν ιονισμό, διότι η ενέργεια που μεταφέρουν είναι μικρή.

• **Ιονίζουσα Ακτινοβολία:**

- Μικρό μήκος κύματος
- Υψηλή συχνότητα
- Μεγάλη ενέργεια
- Ακτίνες X
- Ακτινοβολίες α, β, γ
- Υπεριώδη ακτινοβολία

• **Μη Ιονίζουσα Ακτινοβολία:**

- Μεγάλο μήκος κύματος
- Χαμηλή συχνότητα
- Ραδιοκύματα
- Μικροκύματα
- Ορατό φώς

2.8 Πώς δημιουργούνται τα Η/Μ Πεδία:

Τα ηλεκτρικά πεδία δημιουργούνται λόγω διαφοράς ηλεκτρικής τάσης. Όσο πιο μεγάλη είναι η διαφορά, τόσο πιο δυνατό θα είναι το ηλεκτρικό πεδίο που προκύπτει. Η μονάδα μέτρησης των ηλεκτρικών πεδίων είναι βολτ ανά μέτρο (V/m).

Τα μαγνητικά πεδία δημιουργούνται όταν υπάρχει ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Η έντασή τους είναι ανάλογη της έντασης του ρεύματος. Φυσικά, το πεδίο παύει να υπάρχει όταν διακοπεί το ηλεκτρικό ρεύμα. Η μονάδα μέτρησης των μαγνητικών πεδίων είναι αμπέρ ανά μέτρο (A/m).

2.9 Πηγές Η/Μ ακτινοβολίας:

1) Φυσικές

- Μαγνητικό πεδίο
- Κεραυνοί
- Κοσμική ακτινοβολία
- Υπεριώδης και υπέρυθρη ακτινοβολία

2) Τεχνητές

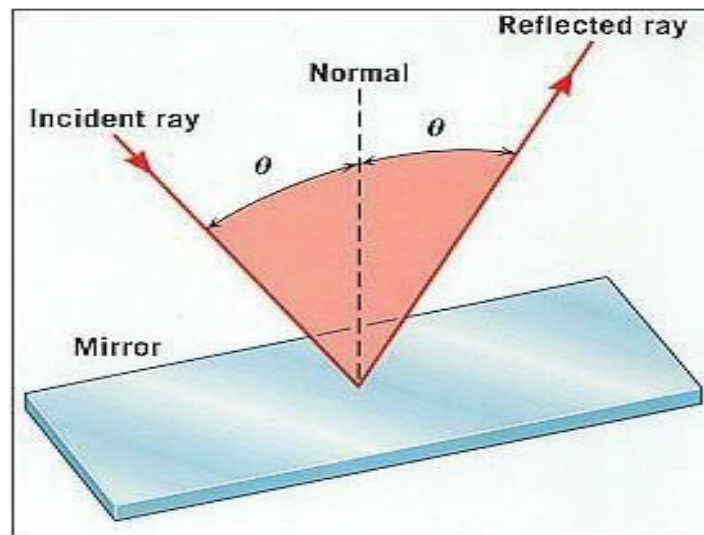
- Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος
- Κεραίες ραδιοτηλεοπτικών σταθμών
- Ασύρματες επικοινωνίες
- Κινητή τηλεφωνία
- Radar
- Laser
- Ιατρικά μηχανήματα παραγωγής ακτινών Χ

2.10 Φαινόμενα κατά τη Μετάδοση ΗΜ Κυμάτων:

2.10.1 Ανάκλαση:

Ανάκλαση ονομάζεται το φαινόμενο της αλλαγής διεύθυνσης διάδοσης ενός μετώπου κύματος, μέσα στο ίδιο μέσο, από μια διαχωριστική επιφάνεια. Τα πιο συνηθισμένα παραδείγματα ανάκλασης είναι αυτά των, ήχου και νερού.

Ο μηχανισμός της ανάκλασης (reflection) ακολουθεί τις αρχές της οπτικής που διέπουν την ανάκλαση του φωτός από ένα καθρέπτη. Και στις δύο περιπτώσεις η γωνία ανάκλασης είναι ίδια με την γωνία πρόσπτωσης όπως φαίνεται στο σχήμα.



Εικόνα 3: Ανάκλαση κύματος

Η απόδειξη της ισότητας των γωνιών ανάκλασης και πρόσπτωσης, βασίζεται στο γεγονός ότι το προσπίπτον και το ανακλώμενο κύμα έχουν την ίδια ταχύτητα. Γενικότερα, το υλικό και η υφή της επιφάνειας πρόσπτωσης επηρεάζουν την ανάκλαση. Λείες και μεταλλικές επιφάνειες αποτελούν καλούς ανακλαστές των ραδιοκυμάτων. Η επιφάνεια της γης παρουσιάζει επίσης πολύ καλές ανακλαστικές ιδιότητες στις οποίες βασίζεται και η διάδοση των ραδιοκυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις. Η ανάκλαση των ραδιοκυμάτων μπορεί να γίνει από διάφορα αντικείμενα.

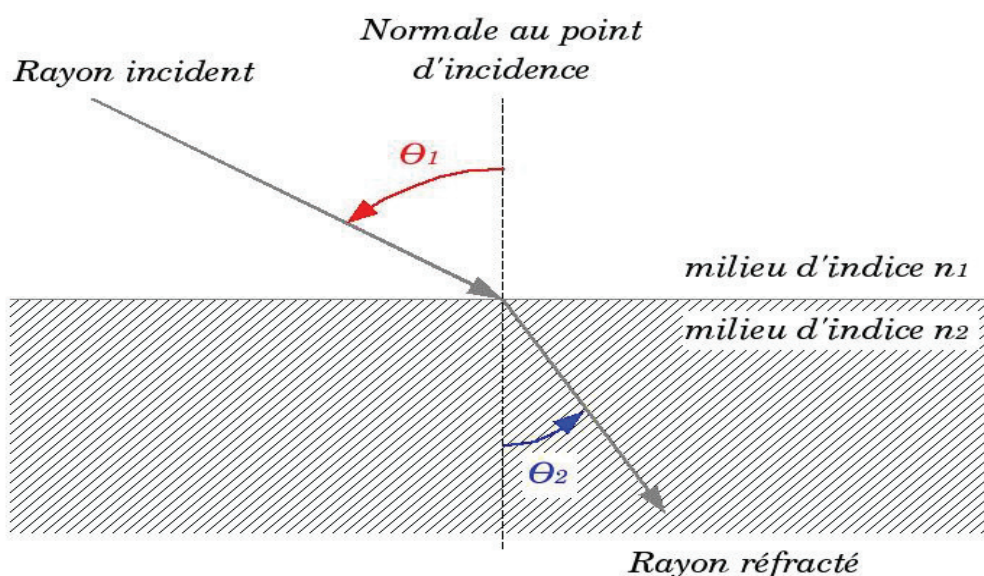
2.10.2 Διάθλαση:

Η διάθλαση (refraction) συμβαίνει όταν ένα κύμα περνά από ένα μέσο διάδοσης σε ένα άλλο διαφορετικής πυκνότητας $n_1 \neq n_2$ και συνεπώς διαφορετικής ταχύτητας μετάδοσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το κύμα να ακολουθεί μια άλλη κατεύθυνση στο δεύτερο μέσο και ταυτόχρονα η ταχύτητα του να μεταβάλλεται. Στην περίπτωση που φωτεινές ακτίνες διερχόμενες από ένα μέσον πέσουν κάθετα στην επιφάνεια του άλλου, τότε η γωνία πρόσπτωσης είναι μηδενική με αποτέλεσμα και η γωνία διάθλασης να είναι και αυτή μηδενική. Όταν το φως περνάει από ένα λιγότερο πυκνό υλικό, όπως ο αέρας σε ένα περισσότερο πυκνό, όπως το νερό, η ταχύτητα του φωτός μειώνεται. Αντίθετα, η διέλευσή του από ένα πυκνότερο σε ένα αραιότερο μέσο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητάς του. Είπαμε όμως ότι σε αυτήν του την πορεία το φως αλλάζει διεύθυνση κίνησης. Το πόσο αποκλίνει από την πορεία του εξαρτάται από το υλικό που βρισκόταν και το υλικό στο οποίο θα βρεθεί. Αυτή η απόκλιση δε θα μπορούσε να μετρηθεί παρά σε γωνία. Υπάρχει ένας κανόνας, ο νόμος του Snell, που καθορίζει την απόκλιση αυτή.

Ο τύπος είναι:

$$N_1 \cdot \sin(\theta_1) = N_2 \cdot \sin(\theta_2)$$

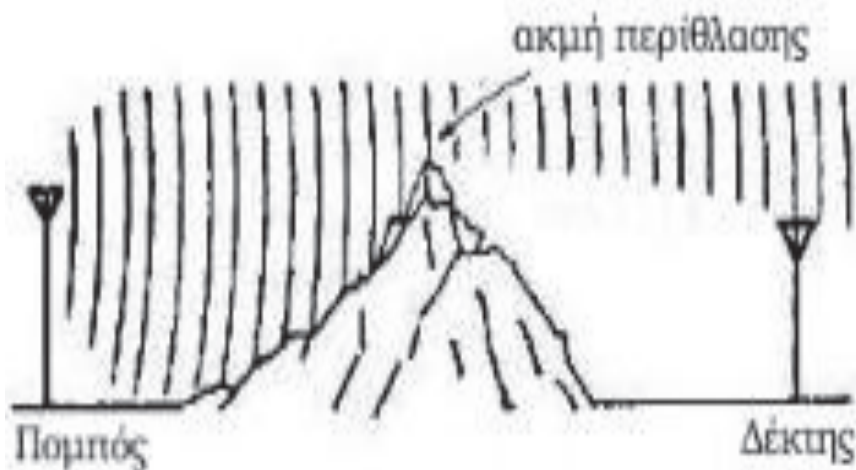
Όπου N_1, N_2 είναι οι δείκτες διάθλασης των δύο υλικών και θ_1, θ_2 οι γωνίες που σχηματίζει η ακτίνα του φωτός με την κάθετη στην επιφάνεια πρόσπτωσης.



Εικόνα 4: Διάθλαση κύματος

2.10.3 Περίθλαση:

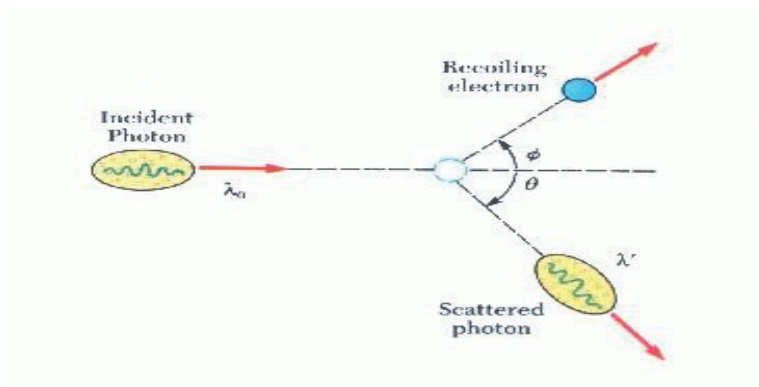
Περίθλαση (diffraction) είναι οποιαδήποτε εκτροπή των κυμάτων από την ευθύγραμμη διάδοση όταν η εκτροπή αυτή δε μπορεί να ερμηνευτεί ως ανάκλαση, διάδοση ή διάθλαση. Περίθλαση συναντάμε σε αντικείμενα με ακμές για αυτό συχνά χρησιμοποιείται και ο όρος περίθλαση ακμής. Τα φαινόμενα της ανάκλασης και διάθλασης μπορούν να περιγραφούν από τη Γεωμετρική Οπτική. Η περίθλαση όμως, προβλέπεται και εξετάζεται από τη γενικότερη θεωρία της Κυματικής Οπτικής. Βασικός νόμος της Κυματικής οπτικής είναι η αρχή του Huygens. Σύμφωνα με την αρχή του Huygens, κάθε σημείο του μετώπου ενός σφαιρικού κύματος μπορεί να θεωρηθεί σαν μια δευτερογενής πηγή κυμάτων, η οποία ακτινοβολεί προς την εξωτερική πλευρά. Η Κυματική Οπτική επεξηγεί πως όλα τα είδη κυμάτων (π.χ. φως, ακουστικά, ηλεκτρομαγνητικά) υφίστανται περίθλαση. Εάν δεν υπήρχε η περίθλαση, τα κύματα δε θα διαδίδονταν πίσω από εμπόδια. Στην πράξη το φαινόμενο εμφανίζεται όταν το μονοπάτι ανάμεσα σε πομπό και δέκτη εμποδίζεται από μία επιφάνεια με τραχείες ακμές και γωνίες. Τότε, οι γωνίες μετατρέπονται σε δευτερογενείς πηγές του κύματος και επανεκπέμπουν το κύμα με μικρότερη ισχύ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζονται δευτερεύοντα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε ολόκληρο το χώρο, ακόμα και πίσω από κάποιο εμπόδιο.



Εικόνα 5: Περίθλαση κύματος

2.10.4 Σκέδαση:

Σκέδαση (scattering) εμφανίζεται στην περίπτωση που το ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε αντικείμενα ή επιφάνειες με διαστάσεις παρόμοιας τάξης με το μήκος κύματος. Η σκέδαση έχει ως αποτέλεσμα την επανεκπομπή της ενέργειας του πομπού προς πολλές διαφορετικές κατευθύνσεις. Όταν το φως πέφτει πάνω σε ύλη, η ύλη αφήνει το φως να συνεχίσει ευθύγραμμα, αλλά επίσης επανεκπέμπει το φως σε όλες τις διευθύνσεις. Η σκέδαση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι αρκετά συνηθισμένη για ραδιοκύματα (π.χ. ραντάρ) και ορατό φως.



Εικόνα 6: Σκέδαση κύματος

2.10.5 Φαινόμενο Doppler:

Το φαινόμενο Doppler εμφανίζεται όταν υπάρχει σχετική κίνηση ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη ενός σήματος. Έστω ότι βρισκόμαστε στο δρόμο και κινείται προς το μέρος μας ένα περιπολικό, ενώ η σειρήνα του εκπέμπει κάποιον ήχο κάποια συγκεκριμένης συχνότητας. Το περιπολικό τρέχει με μεγάλη ταχύτητα, μας προσπερνά και συνεχίζει την πορεία του. Σε όλο αυτό το διάστημα η συχνότητα που φτάνει στα αυτιά μας δεν είναι σταθερή αλλά υπάρχει μία σταδιακή αύξηση και μείωσή της. Αυτή η αυξομείωση οφείλεται στο φαινόμενο Doppler και παρατηρείται λόγω της σχετικής κίνησης πομπού και δέκτη. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και συγκεκριμένα στη φέρουσα συχνότητα που χρησιμοποιείται στις ασύρματες επικοινωνίες.

Doppler Effect: Police Siren



Εικόνα 7: Φαινόμενο Doppler

2.11 Συνοπτικά για Η/Μ κύματα:

Ηλεκτρομαγνητικό κύμα:

- ταλάντωση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων
- μπορεί να μεταδοθεί στο κενό
- ταχύτητα διάδοσης: ταχύτητα του φωτός $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$
- στον αέρα είναι λίγο μικρότερη
- εγκάρσιο κύμα
- ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο κάθετα μεταξύ τους
- και κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος

Εξισώσεις Maxwell

Ο James Clerk Maxwell θεωρείται ο ιδρυτής της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας στη σημερινή της μορφή. Μέσα από τις θεωρητικές του προσπάθειες κατάφερε να εκδώσει την πρώτη ενοποιημένη θεωρία για ηλεκτρισμό και μαγνητισμό. Εκτός από τα γνωστά αποτελέσματα, η έκδοση αυτή περιείχε εισαγωγή στο ρεύμα μετατόπισης και πρόβλεψε την ύπαρξη κυμάτων. Οι εξισώσεις του Maxwell δεν έγιναν αποδεχτές από όλους τους επιστήμονες ώσπου επιβεβαιώθηκαν από τον Γερμανό Heinrich Rudolf Hertz. Ο Hertz κατάφερε να δημιουργήσει και να ανιχνεύσει ραδιοκύματα.

Η γενική μορφή των εξισώσεων του Maxwell φαίνονται στον παρακάτω πίνακα όπου δείχνουμε και την διαφορική και την ολοκληρωτική μορφή.

Εξισώσεις Maxwell:

ΟΝΟΜΑ	ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΜΟΡΦΗ	ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗ ΜΟΡΦΗ
Ηλεκτρικός Νόμος Gauss:	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$	$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} = \int_V \rho dV$
Μαγνητικός Νόμος Gauss:	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$
Νόμος Faraday:	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$
Νόμος Ampere	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A} + \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A}$

Εικόνα 8: Πίνακας εξισώσεων Maxwell

3.1 Νόμος Faraday:

Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή

Στην περίπτωση που έχουμε ένα συρμάτινο βρόχο που κινείται προς τα δεξιά υπό την παρουσία ενός σταθερού μαγνητικού πεδίου η ΗΕΔ που δημιουργείται στον βρόχο ,δίνεται από τον κανόνα ροής.

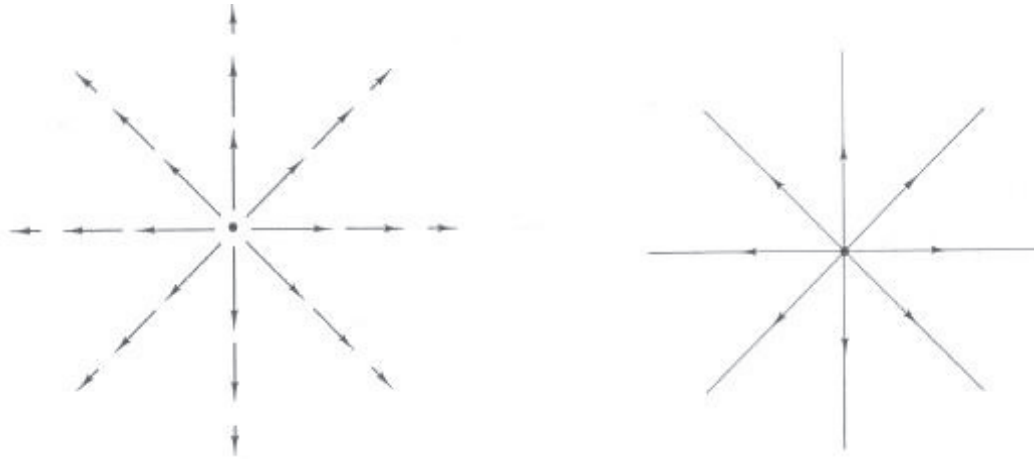
$$E = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Στην αντίθετη περίπτωση, αν κρατούσαμε τον βρόχο ακίνητο και κινούσαμε τον μαγνήτη προς τα αριστερά, η ΗΕΔ που αναπτύσσεται είναι ίδια, το μόνο που έχει σημασία είναι η σχετική ταχύτητα του μαγνήτη ως προς τον βρόχο. Στην περίπτωση του κινούμενου βρόχου είδαμε ότι η δύναμη που ήταν υπεύθυνη για την εμφάνιση της ΗΕΔ ήταν η μαγνητική. Όταν όμως ο βρόχος είναι ακίνητος, η δύναμη που κινεί τα φορτία δεν μπορεί να είναι μαγνητική, αφού ως γνωστόν σε στάσιμα φορτία δεν ασκούνται μαγνητικές δυνάμεις. Η κινητήρια δύναμη σ' αυτή την περίπτωση είναι ένα ηλεκτρικό πεδίο. Το πεδίο αυτό, όμως, σίγουρα δεν είναι ηλεκτροστατικό, αφού γνωρίζουμε ότι τα ηλεκτροστατικά πεδία δεν παράγουν ΗΕΔ. Πρόκειται για ένα εντελώς νέο είδος ηλεκτρικού πεδίου που η παρουσία του έχει να κάνει με το ότι ο μαγνήτης κινείται, δηλαδή με το γεγονός ότι μεταβάλλεται το μαγνητικό πεδίο στη γειτονία του βρόχου. Προφανώς, λοιπόν, το ηλεκτρικό αυτό πεδίο δημιουργείται επαγωγικά από ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

3.2 Νόμος του Gauss:

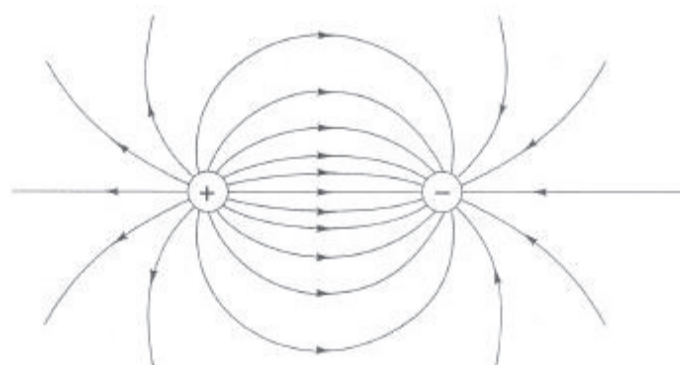
Στην απλούστερη δυνατή περίπτωση ένα μοναδικό σημειακό φορτίο q που βρίσκεται στην αρχή των αξόνων. Έστω r είναι η υπό συζήτηση θέση. Για να αποκτήσουμε μια «αίσθηση» αυτού του πεδίου, θα μπορούσαμε να σχεδιάσουμε μερικά αντιπροσωπευτικά διανύσματα.

Επειδή το πεδίο φθίνει με ρυθμό $\frac{1}{r^2}$, τα διανύσματα μικραίνουν όσο απομακρύνομαι από την αρχή, ενώ πάντα δείχνουν ακτινικά προς τα έξω. Υπάρχει όμως ένας πιο όμορφος τρόπος να αναπαραστήσουμε αυτό το πεδίο και αυτός είναι να συνδέσουμε τα βέλη, για να σχηματίσουμε τις δυναμικές γραμμές.



Εικόνα 9: Η μεταβολή των διανυσμάτων καθώς απομακρύνονται την αρχή των αξόνων

Το μέγεθος του πεδίου υποδεικνύεται από την πυκνότητα των δυναμικών γραμμών : είναι ισχυρό γύρω από το κέντρο, όπου οι δυναμικές γραμμές βρίσκονται κοντά μεταξύ τους και ασθενές πιο μακριά, όπου οι δυναμικές γραμμές είναι αραιές. Οι δυναμικές γραμμές πηγάζουν από τα θετικά φορτία και καταλήγουν στα αρνητικά, δεν γίνεται να σταματάνε στον αέρα, αν και μπορούν να επεκτείνονται στα αρνητικά, δεν γίνεται να σταματάνε στον αέρα, αν και μπορούν να εκτείνονται ως το άπειρο. Οι δυναμικές γραμμές, επιπλέον, δεν διασταυρώνονται ποτέ. Μ' όλα αυτά κατά νου, είναι εύκολο να σχεδιάσουμε το πεδίο για οποιονδήποτε απλό σχηματισμό σημειακών φορτίων.



Ίσα και αντίθετα φορτία

Εικόνα 10: Μεταφορά δυναμικών γραμμών

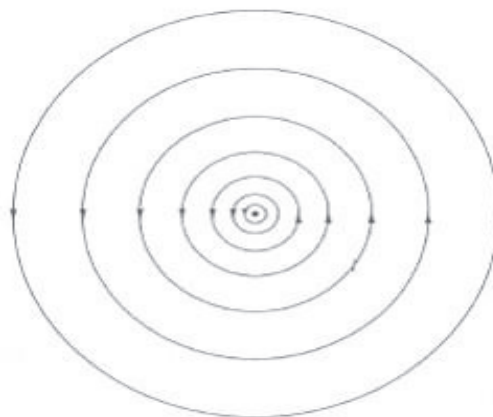
Ένα φορτίο στο εξωτερικό της επιφάνειας δεν συνεισφέρει τίποτα στη συνολική ροή, αφού οι δυναμικές του γραμμές μπαίνουν από τη μια μεριά και βγαίνουν από την άλλη.



Εικόνα 11: Δυναμικές γραμμές φορτίου διαπερνούν επιφάνεια

3.3 Νόμος του Amber:

Το μαγνητικό πεδίο ενός άπειρου ευθύγραμμου ρευματοφόρου σύρματος μπορεί να παρασταθεί από το διάγραμμα δυναμικών γραμμών του (σχήμα). Όπως πάντα, η πυκνότητα των δυναμικών γραμμών καθορίζει την ένταση του πεδίου. Το B εδώ είναι αντιστρόφως ανάλογο της απόστασης από το σύρμα, οπότε οι δυναμικές γραμμές αραιώνουν σταθερά καθώς απομακρυνόμαστε απ' αυτό. Με την πρώτη ματιά, είναι σαφές ότι το πεδίο έχει στροβιλισμό αλλά όχι απόκλιση.



Εικόνα 12: Μαγνητικό πεδίο

3.4 Αποτελέσματα των εξισώσεων του Maxwell:

Η λύση των εξισώσεων του Maxwell πρόσφερε τρία πολύ ενδιαφέροντα πράγματα.

1. Δύο σιαμαία πεδία

Το πρώτο είναι ότι το οποιοδήποτε παλλόμενο σωματίδιο με ηλεκτρικό φορτίο (αλλά και κάθε σωματίδιο με φορτίο και επιτάχυνση) δημιουργεί δύο «σιαμαία» πεδία, ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό και συγχρόνως ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό.

Γιατί το χρονικά σταθερό ηλεκτρικό πεδίο (δημιουργείται από ακίνητα ηλεκτρικά φορτία) μπορεί να υπάρχει μόνο του όπως και το χρονικά σταθερό μαγνητικό πεδίο (δημιουργείται από ρεύματα σταθερής έντασης) μπορεί να υπάρχει μόνο του, αλλά τα χρονικά μεταβαλλόμενα πεδία τόσο το ηλεκτρικό όσο και το μαγνητικό υπάρχουν μόνο ως σιαμαία.

2. Διαδίδεται με μηχανισμό κύματος

Το δεύτερο είναι ότι το ηλεκτρομαγνητικό αυτό πεδίο και η αντίστοιχη ενέργεια εξαπλώνονται στον χώρο όχι με έναν οποιοδήποτε τρόπο αλλά έτσι ώστε η διάδοση να γίνεται με τη μορφή κύματος που ταξιδεύει με ορισμένη ταχύτητα ακόμα κι αν το παλλόμενο φορτίο από το οποίο δημιουργήθηκε σταματήσει να πάλλεται.

3. Το ΦΩΣ

Το τρίτο σοβαρό ζήτημα που απορρέει από τις εξισώσεις ήταν η τιμή της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών αυτών κυμάτων. Οι εξισώσεις δηλαδή έδειχναν ότι η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού αυτού φάσματος ήταν ίση με 300.000 χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο, ήταν δηλαδή ίση με την ταχύτητα του ΦΩΤΟΣ. Άρα το φως είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Ο Maxwell πρότεινε ότι το φως είναι μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και ο Hertz απέδειξε πειραματικά ότι ο Maxwell είχε δίκιο.

Φαινόμενο Doppler

4.1 Τι είναι το φαινόμενο Doppler:

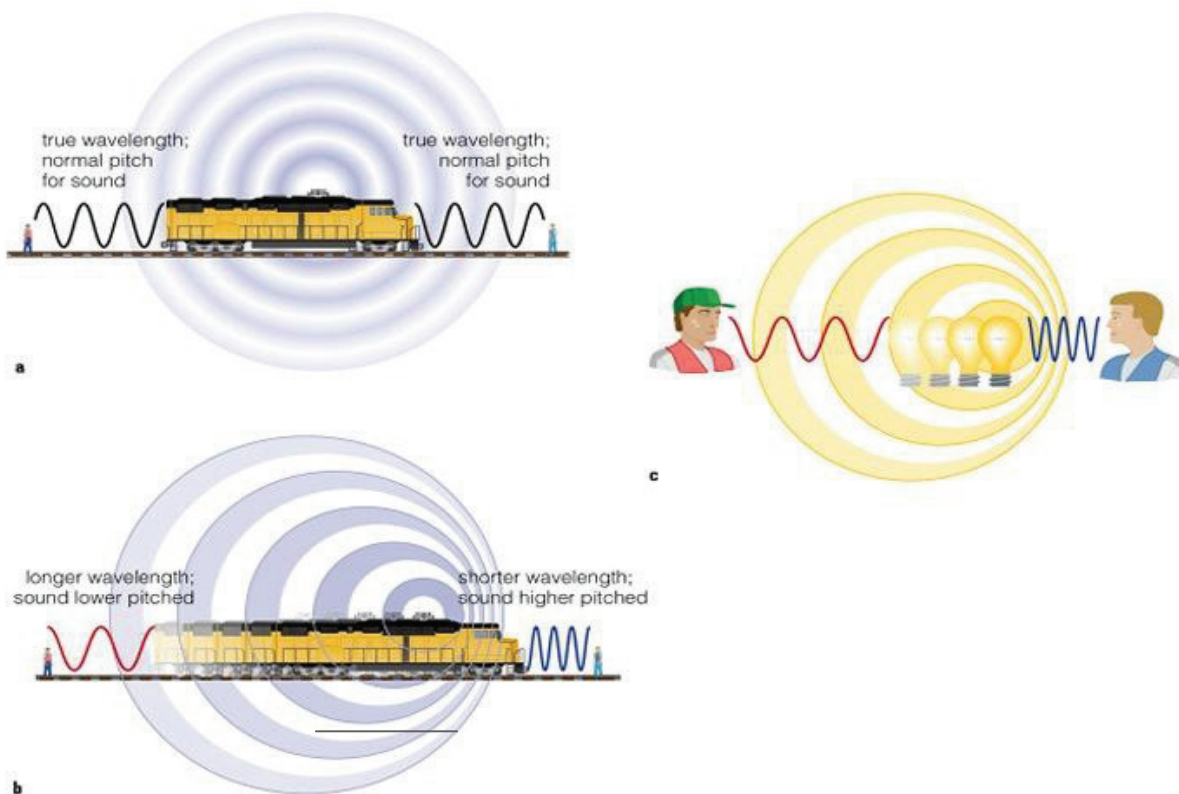
Το φαινόμενο Doppler, που ταυτοποιήθηκε το 1842 από τον αυστριακό φυσικό Christian Doppler είναι η αλλαγή στην παρατηρούμενη συχνότητα ενός κύματος, λόγω της σχετικής κίνησης παρατηρητή και πηγής. Δηλαδή ένας παρατηρητής (A) αντιλαμβάνεται ένα ήχο που εκπέμπει μία πηγή (S) ,με συχνότητα $F(A)$ διαφορετική από την συχνότητα $F(S)$ της πηγής, όταν μεταβάλλεται η μεταξύ τους απόσταση.

Στο φαινόμενο Doppler αλλάζει και το μήκος κύματος, γιατί στα κύματα ισχύει ο τύπος $u = \lambda \cdot f$, άρα όταν μικραίνει η συχνότητα μεγαλώνει το μήκος κύματος και αντίστροφα. Το φαινόμενο Doppler συμβαίνει διότι ο κινούμενος παρατηρητής “μετράει” διαφορετική ταχύτητα ήχου από την πραγματική, ενώ όταν κινείται η πηγή, ο ακίνητος παρατηρητής “μετράει” διαφορετικό μήκος κύματος από το πραγματικό. Αν υπάρχει ανάκλαση του ηχητικού σήματος τότε η ανακλαστική επιφάνεια λειτουργεί ως δευτερεύουσα πηγή ήχου ,δηλαδή εκπέμπει ένα κύμα ίδιας συχνότητας με εκείνο που δέχτηκε, αλλά προς την αντίθετη κατεύθυνση. Για να βρούμε την συχνότητα Doppler (F_d) κάνουμε χρήση του τύπου:

$$F_d = \left(2 \cdot \frac{U}{C}\right) \cdot F \text{ όπου είναι της μορφής } y = A \cdot x$$

- F -> είναι η συχνότητα της πηγής
- U -> είναι η ταχύτητα της πηγής
- C -> είναι η ταχύτητα του φωτός

Ένα παράδειγμα του φαινομένου Doppler είναι με το σφύριγμα ενός τρένου: καθώς το τρένο πλησιάζει στην αποβάθρα ο ήχος ακούγεται οξύτερος συγκρινόμενος με αυτόν που ακούγεται όταν το τρένο αναχωρεί και απομακρύνεται από την αποβάθρα. Οι συγκρίσεις αναφέρονται σε συχνότητες και όχι σε εντάσεις του ήχου που κάθε φορά γίνεται αντιληπτός καθώς η κινούμενη ηχητική πηγή πλησιάζει ή απομακρύνεται από τον ακροατή.



Εικόνα 13: Παράδειγμα φαινομένου Doppler

- Φαινόμενο Doppler για ακίνητη πηγή και ακίνητο παρατηρητή.
- Φαινόμενο Doppler για κινούμενη πηγή και ακίνητο παρατηρητή.
- Φαινόμενο Doppler για ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Εφαρμογές του φαινομένου Doppler:

- αστυνομία: Το radar της αστυνομίας εκπέμπει μικροκύματα συχνότητας f και ανιχνεύει τα ανακλώμενα από τα διερχόμενα οχήματα, υπάρχει σχηματισμός διακροτημάτων η συχνότητα των οποίων είναι μέτρο της ταχύτητας του διερχόμενου οχήματος.
- αστρονομία: Στην αστρονομία το φαινόμενο Doppler προκαλεί μετατόπιση των φασματικών γραμμών που εκπέμπονται από απομακρυσμένους αστέρες ή και γαλαξίες, χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ταχύτητας με την οποία τα αστρικά σώματα πλησιάζουν ή απομακρύνονται από το ηλιακό μας σύστημα.

- ιατρική: υπερηχογράφημα για την παρακολούθηση του εμβρύου ή τη μέτρηση της ροής του αίματος. Υπέρηχοι συχνότητας 8.2 Mhz εστιάζονται σε αγγείο. Μέρος της δέσμης ανακλάται από τα μόρια των ερυθρών αιμοσφαιρίων. Όταν το αίμα κινείται (π.χ. καρδιακός παλμός) η ανακλώμενη f είναι λίγο διαφορετική από την προσπίπτουσα, έτσι σχηματίζονται διακροτήματα με συχνότητα που εξαρτάται από την ταχύτητα και την φορά κίνησης του αίματος.

4.2 Ηχητικό φαινόμενο Doppler:

Στο φαινόμενο αυτό αντιλαμβανόμαστε διαφορετική συχνότητα (ή μήκος κύματος) για το κύμα που εκπέμπεται από μία πηγή, όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ της πηγής και του παρατηρητή. Το φαινόμενο Doppler εμφανίζεται σε όλες τις περιπτώσεις κυμάτων, αλλά συνήθως αναφέρεται στα ηχητικά και τα ορατά ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

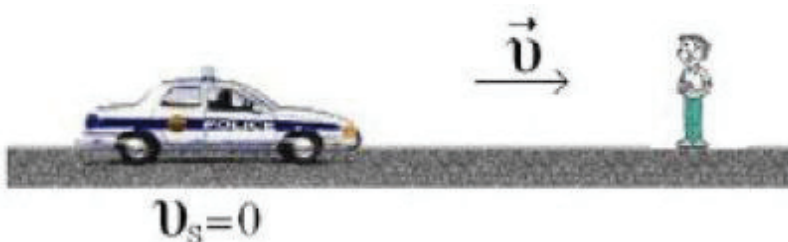
Πρέπει να γνωρίζουμε ότι τόσο για τον παρατηρητή όσο και για την πηγή, το «πλησίασμα» έχει την τάση να αυξήσει τη συχνότητα, ενώ η «απομάκρυνση» την τάση να μειώσει τη συχνότητα, με τις φορές των κινήσεων να λαμβάνονται πάντοτε σε σχέση με το μέσο διάδοσης. Έχει σημασία να καταλάβουμε ότι όταν για παράδειγμα η φορά της κίνησης του παρατηρητή είναι «προς» την πηγή, δεν σημαίνει απαραίτητα ότι την πλησιάζει μπορεί η πηγή να απομακρύνεται με μεγαλύτερη ταχύτητα. Για την εύρεση όμως του σωστού πρόσημου, αρκεί να γνωρίζουμε την «τάση» της πηγής ή του παρατηρητή να πλησιάζουν ή να απομακρύνονται, ανεξάρτητα από το τελικό αποτέλεσμα. Η τελική τιμή της συχνότητας θα προκύψει από τη σχετική «δύναμη» του αριθμητή και του παρονομαστή και μπορεί να είναι μικρότερη, μεγαλύτερη ή και ίση με την πραγματική συχνότητα, ανάλογα με τον παράγοντα που υπερισχύει.

Στα παρακάτω σχήματα θα δούμε όλες τις περιπτώσεις του ηχητικού φαινομένου doppler για την σχετική κίνηση μεταξύ παρατηρητή και πηγής αλλά και όταν παρατηρητή και πηγή είναι ακίνητα μεταξύ τους. Ακόμα αναγράφονται οι τύποι για το πως θα βρούμε την συχνότητα του παρατηρητή $f(a)$ αλλά και η διαφορά συχνότητας που υπάρχει μεταξύ πηγής και παρατηρητή.

- Η πηγή είναι ακίνητη και ο παρατηρητής είναι ακίνητος. Ισχύει η σχέση $F_a = F_s$.

Στη μονάδα του χρόνου ,όσα μέγιστα παράγει η πηγή, τόσα μέγιστα φτάνουν στον παρατηρητή.

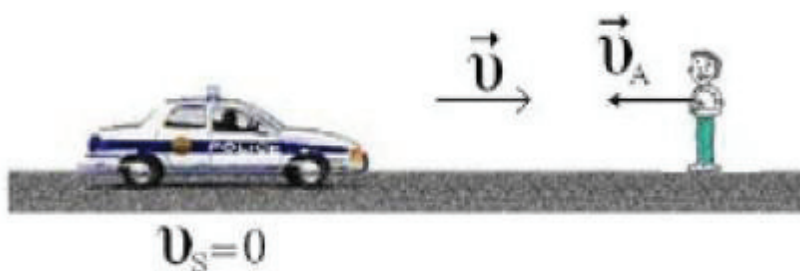
Ο παρατηρητής ακούει ήχο ίδιας συχνότητας με αυτή της πηγής.



- Η πηγή είναι ακίνητη και ο παρατηρητής πλησιάζει με ταχύτητα U_a .

Ισχύει η σχέση $F_a = \left(\frac{U + U_a}{U} \right) \cdot F_s$, $F_a > F_s$.

Στη μονάδα του χρόνου φτάνουν στον παρατηρητή περισσότερα μέγιστα του κύματος από αυτά που παράγει η πηγή στον ίδιο χρόνο. Ο παρατηρητής αντιλαμβάνεται ήχο μεγαλύτερης συχνότητας από αυτό που παράγει η πηγή, επειδή $F_a > F_s$.



- Η πηγή είναι ακίνητη και ο παρατηρητής απομακρύνεται με ταχύτητα U_a .

Ισχύει η σχέση $F_a = \left(\frac{U - U_a}{U} \right) \cdot F_s$, $F_a < F_s$. Στη μονάδα του χρόνου

φτάνουν στον παρατηρητή λιγότερα μέγιστα του κύματος από αυτά που παράγει η πηγή στον ίδιο χρόνο. Ο παρατηρητής αντιλαμβάνεται ήχο μικρότερης συχνότητας από αυτή που παράγει η πηγή, επειδή $F_a < F_s$.



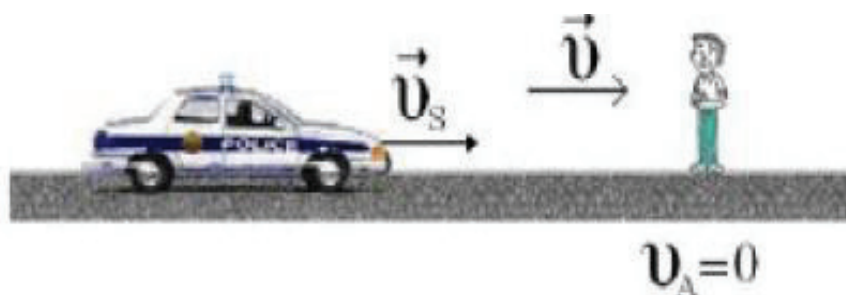
- Ο παρατηρητής είναι ακίνητος και η πηγή πλησιάζει με ταχύτητα U_s .

Ισχύει η σχέση $F_a = \left(\frac{U}{U - U_s} \right) \cdot F_s$, $F_a > F_s$.

Τα μέγιστα του κύματος που ανιχνεύει ο παρατηρητής έχουν πλησιάσει το ένα το άλλο.

Έτσι, ο παρατηρητής μετράει το μήκος κύματος και το βρίσκει μικρότερο από το μήκος κύματος της πηγής.

Ο παρατηρητής αντιλαμβάνεται ήχο μεγαλύτερης συχνότητας από αυτόν που παράγει η πηγή, επειδή $F_a > F_s$.



- Ο παρατηρητής είναι ακίνητος και η πηγή απομακρύνεται με ταχύτητα U_s .

Ισχύει η σχέση $f_a = \left(\frac{U}{U + U_s} \right) \cdot f_s$, $f_a < f_s$.

Τα μέγιστα του κύματος που ανιχνεύει ο παρατηρητής έχουν απομακρυνθεί το ένα από το άλλο.

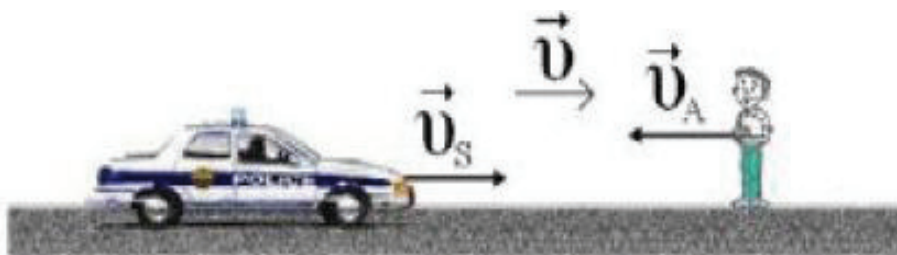
Έτσι, ο παρατηρητής μετράει το μήκος κύματος και το βρίσκει μεγαλύτερο από το μήκος κύματος της πηγής.

Ο παρατηρητής αντιλαμβάνεται ήχο μικρότερης συχνότητας από αυτόν που παράγει η πηγή, επειδή $f_a < f_s$.



- Η πηγή και ο παρατηρητής πλησιάζουν μεταξύ τους.

Ισχύει η σχέση $f_a = \left(\frac{U + U_a}{U - U_s} \right) \cdot f_s$, $f_a > f_s$.



- Η πηγή και ο παρατηρητής απομακρύνονται.

Ισχύει η σχέση $F_a = \left(\frac{U - U_a}{U + U_s} \right) \cdot F_s$, όπου ισχύει $F_a < F_s$.



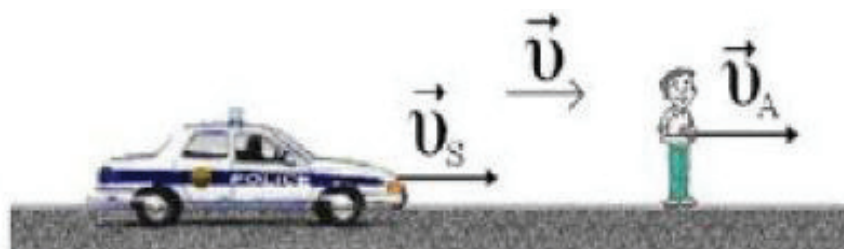
- Η πηγή πλησιάζει και ο παρατηρητής απομακρύνεται

Ισχύει η σχέση $F_a = \left(\frac{U - U_a}{U - U_s} \right) \cdot F_s$, Αν $U_a < U_s$ τότε $F_a > F_s$.



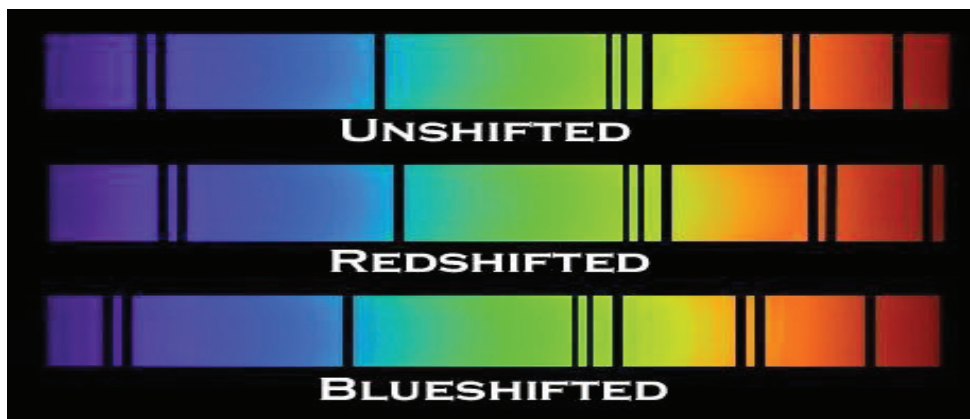
- Η πηγή απομακρύνεται και ο παρατηρητής πλησιάζει

Ισχύει η σχέση $F_a = \left(\frac{U + U_a}{U + U_s} \right) \cdot F_s$, Αν $U_a > U_s$ τότε $F_a > F_s$.



4.3 Ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο Doppler:

Το φαινόμενο Doppler παρατηρείται όχι μόνο με τα ηχητικά κύματα, αλλά και με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Το Φαινόμενο Doppler εξηγεί την εξάρτηση του μήκους κύματος του φωτός που εκπέμπει μια πηγή από την κίνηση της πηγής ως προς τον παρατηρητή. Ωστόσο, δεδομένου ότι αυτά τα κύματα (φως και ραδιοκύματα, για παράδειγμα) δεν απαιτούν ένα μέσο για να ταξιδεύουν, η διαφορά συχνότητας που παρατηρούμε είναι με βάση τις σχετικές ταχύτητες της πηγής και του παρατηρητή. Το φαινόμενο Doppler για ηλεκτρομαγνητικά κύματα χρησιμοποιείται στην αστρονομία, τον έλεγχο της κυκλοφορίας και την δορυφορική παρακολούθηση παρακολούθηση. Το φως ενός ουρανίου σώματος που πλησιάζει τη Γη συμπιέζεται και μετατοπίζεται προς το μπλε άκρο του φάσματος του φωτός. Αντίθετα το φως ουρανίων αντικειμένων που απομακρύνονται από τη Γη απλώνεται και μετατοπίζεται προς το ερυθρό άκρο του φάσματος. Μιλάμε λοιπόν για «Μετατόπιση προς το ερυθρό» και «Μετατόπιση προς το κυανό». Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως για τον εντοπισμό της απόστασης και της ταχύτητας ενός μακρινού γαλαξία. Πρέπει να παρατηρήσουμε ότι στην περίπτωση του ήχου είναι διαφορετικό το φαινόμενο να κινείται η πηγή και να είναι ακίνητος ο παρατηρητής από το φαινόμενο να κινείται ο παρατηρητής και να είναι ακίνητη η πηγή. Στην περίπτωση όμως του φωτός (δηλαδή Η/Μ κυμάτων που δεν χρειάζονται ύλη για να διαδοθούν) η ταχύτητα U του ήχου αντικαθίσταται από την ταχύτητα C , τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα στη φύση. Η ταχύτητα αυτή είναι ίδια για όλους τους παρατηρητές ή τις πηγές ανεξάρτητα από τη σχετική τους κίνηση. Αυτό σημαίνει ότι «πηγή κινούμενη - παρατηρητής ακίνητος» είναι φαινόμενο ταυτόσημο με «πηγή ακίνητη - παρατηρητής κινούμενος», δηλαδή ο τύπος του φαινομένου Doppler για το φως, θα είναι ο ίδιος στις δυο αυτές περιπτώσεις.



Εικόνα 14: Το φάσμα του φωτός

Μπλε μετατόπιση = υψηλότερη συχνότητα
Κόκκινη μετατόπιση = χαμηλότερη συχνότητα

Το φαινόμενο Doppler στην περιοχή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι διαφορετικό από ότι στην ακουστική. Η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που φαίνεται από ένα παρατηρητή εξαρτάται από την κατεύθυνση και την ταχύτητα της κίνησης του παρατηρητή ως προς την κίνηση της πηγής. Για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, σε αντίθεση με τον ήχο, δεν υπάρχει διάκριση μεταξύ κίνησης της πηγής και κίνησης του παρατηρητή. Μόνο η σχετική ταχύτητα των δύο είναι σημαντική.

Διακρίνουμε δύο απλές περιπτώσεις χωρίς απόδειξη:

Ορίζουμε: $\beta = \frac{v}{c}$.

1) Ο παρατηρητής κινείται σε φορέα κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

$$f' = f\sqrt{1-\beta^2}$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει για το φαινόμενο Doppler με την κίνηση του παρατηρητή εγκάρσια στη διεύθυνση διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

2) Ο παρατηρητής κινείται σε φορέα που συμπίπτει με τη διεύθυνση διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

➤ Παρατηρητής και πηγή πλησιάζουν: $f' = f \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}$

➤ Παρατηρητής και πηγή απομακρύνονται: $f' = f \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}$

Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν για το φαινόμενο Doppler για κίνηση του παρατηρητή κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

4.4 Εφαρμογές του φαινομένου Doppler με ηλεκτρομαγνητικά κύματα:

Μια γνώριμη εφαρμογή του φαινομένου Doppler με ραδιοκύματα είναι η μέτρηση της ταχύτητας των οχημάτων από απόσταση. Μια πηγή εκπέμπει ραδιοκύματα συγκεκριμένης συχνότητας τα οποία ανακλώνται πάνω σε κινούμενο όχημα που πλησιάζει την πηγή. Το κινούμενο όχημα παίζει επίσης ρόλο κινούμενης πηγής. Τα απευθείας και τα από ανάκλαση κύματα έχουν ολίγον διαφορεσες συχνότητες και έτσι σχηματίζουν διακρότημα, από την συχνότητα του οποίου υπολογίζεται η ταχύτητα της πηγής του κινούμενου οχήματος.

- Παρόμοιες τεχνικές χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ταχύτητας των ανέμων στην ατμόσφαιρα.
- Το φαινόμενο Doppler χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση δορυφόρων και διαστημικών οχημάτων. Καθώς ο δορυφόρος περιφέρεται περί τη Γη αρχικά πλησιάζει και στη συνέχεια απομακρύνεται από επίγεια βάση (δέκτη). Άρα ο δέκτης συλλαμβάνει σήμα μεταβλητής συχνότητας.
- Το φαινόμενο Doppler έχει μεγάλη σημασία στην Αστροφυσική. Γίνεται σύγκριση της συχνότητας που δέχονται επίγειοι σταθμοί από συγκεκριμένο στοιχείο που εκπέμπει καθώς βρίσκεται σε απομακρυσμένο αστέρα σε σχέση με τη συχνότητα που εκπέμπει το ίδιο αυτό στοιχείο στο επίγειο εργαστήριο. Έτσι βρίσκεται αν ο πλησιάζει ή απομακρύνεται από τη Γη και με πόση ταχύτητα.

4.5 Διακρότημα

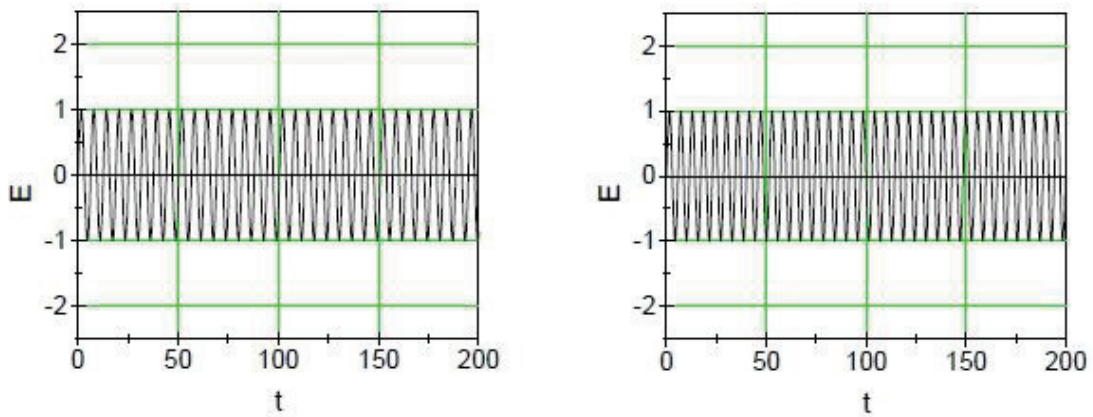
Τα διακροτήματα προκύπτουν από την συμβολή δύο κυμάτων ίσου πλάτους αλλά ελαφρώς διαφορετικής συχνότητας f_1 και f_2 .

Το φαινόμενο του διακροτήματος οφείλεται σε μια ακολουθία αυξήσεων και ελαττώσεων της έντασης ενός ήχου, ο οποίος προέρχεται από την επαλληλία δύο ηχητικών κυμάτων με μικρή διαφορά στο ύψος, δηλαδή στις συχνότητές τους. Γενικότερα, το διακρότημα ορίζεται ως η σύνθεση δύο αρμονικών ταλαντώσεων της ίδιας διεύθυνσης, των οποίων οι συχνότητες διαφέρουν πολύ λίγο. Τα διακροτήματα παρατηρούνται συνήθως όταν, για παράδειγμα, διασταυρώνονται δύο τρένα που έχουν και τα δύο τις σειρήνες τους σε λειτουργία. Το φαινόμενο μπορεί να ερμηνευθεί εύκολα, αν λάβουμε υπόψη ότι οι δύο απλοί ήχοι που προστίθενται χαρακτηρίζονται από περιοδική ακολουθία πυκνωμάτων και αραιωμάτων του αέρα. Συνεπώς, όταν μία φάση πύκνωσης ή αραιώσης συμπέσει με μία φάση του ίδιου τύπου του άλλου κύματος, υπάρχει αύξηση της έντασης του συνισταμένου ήχου, γιατί το στρώμα του αέρα που δέχεται δύο δράσεις του ίδιου τύπου συμπιέζεται ή αραιώνει περισσότερο απ' ό,τι αν δρούσε μόνο ένα κύμα. Αντίθετα, όταν έχουμε επαλληλία δύο φάσεων διαφορετικού τύπου, στο στρώμα του αέρα ενεργούν δύο αντίθετες δράσεις, οι οποίες αλληλοεξουδετερώνονται, με συνέπεια την εξασθένηση του συνισταμένου ήχου.

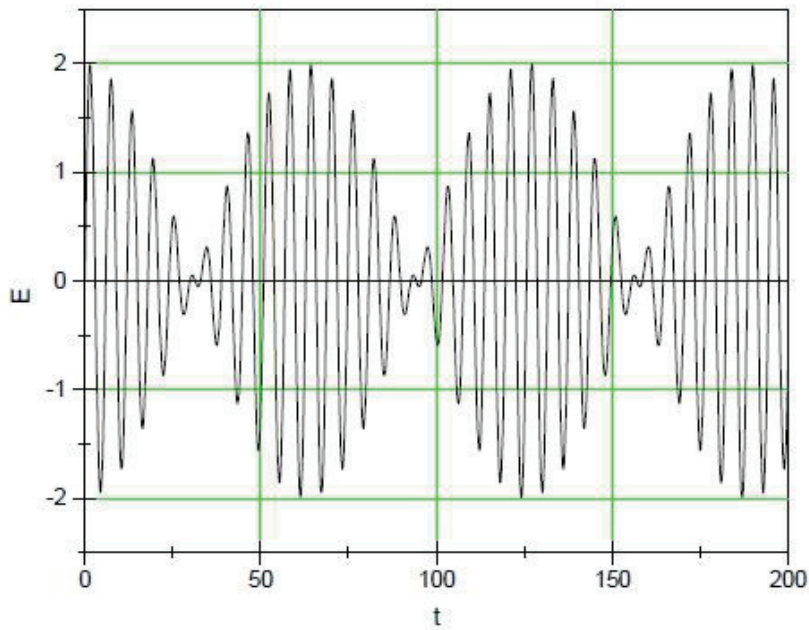
Στην Εικόνα 15 (αριστερά) έχουμε ένα σήμα συχνότητας $f_1 = \frac{1}{2} \cdot \pi Hz$

Το σήμα ανακλάται στον στόχο και επιστρέφει με συχνότητα $f_2 = \frac{1.1}{2} \cdot \pi Hz$

(δεξιά). Τα δύο σήματα δεν παρουσιάζουν αισθητή διαφορά. Αν όμως τα δύο σήματα συμβάλουν τότε το κύμα που προκύπτει παρουσιάζει περιοδικές διακυμάνσεις στην ένταση του, οι διακυμάνσεις αυτές, όπως αναφέραμε ονομάζονται διακροτήματα. Στην Εικόνα 16 παρουσιάζονται τα σχηματιζόμενα διακροτήματα που προέχονται από την συμβολή των δύο κυμάτων της Εικόνας 15.



Εικόνα 15: Απεικόνιση δύο κυμάτων με ίδιο πλάτος αλλά διαφορετική συχνότητα



Εικόνα 16: Διακρότημα

Εκπεμπόμενο (αριστερά) και επιστρεφόμενο (δεξιά) σήμα από ανάκλαση σε κινούμενο στόχο . Το επιστρεφόμενο σήμα παρουσιάζει μικρή αύξηση της συχνότητάς του.

Διακροτήματα που σχηματίζεται από την συμβολή των δύο παραπάνω κυμάτων.

Απόδειξη:

Έστω ότι συμβάλλουν τα 2 κύματα:

$$y_1 = A \cdot \sin 2\pi f_1 \cdot t$$

$$y_2 = -A \cdot \sin 2\pi f_2 \cdot t$$

Η συνισταμένη τους είναι $y = y_1 + y_2$

Γνωρίζουμε ότι $\sin(\alpha) - \sin(\beta) = 2 \sin \frac{1}{2}(\alpha - \beta) \cdot \cos \frac{1}{2}(\alpha + \beta)$

Επομένως $y = y_1 + y_2 = \left[2 \cdot A \cdot \sin \frac{1}{2} \cdot (2\pi) \cdot (f_1 - f_2) \cdot t \right] \cos \frac{1}{2} \cdot (2\pi) \cdot (f_1 + f_2) \cdot t$

- το συνιστάμενο κύμα έχει συχνότητα $\frac{1}{2}(f_1 + f_2)$
- πλάτος που διαμορφώνεται από τον όρο του ημιτόνου με συχνότητα $2 \left[\frac{1}{2}(f_1 - f_2) \right] = f_1 - f_2$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Radar-Όπλο Radar

5.1 Radar:

Το ραντάρ είναι ένα σύστημα που χρησιμοποιεί τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα για να προσδιορίσει τη σειρά, το ύψος, την κατεύθυνση, ή την ταχύτητα και την κίνηση και των σταθερών αντικειμένων όπως, σκάφη, μηχανοκίνητα οχήματα, αλλά και των καιρικών σχηματισμών και εκτάσεων. Ο όρος RADAR δημιουργήθηκε το 1941 ως αρκτικόλεξο για τα Radio Detection and Ranging. Ένα σύστημα ραντάρ έχει μια συσκευή αποστολής σημάτων που εκπέμπει είτε τα ραδιοκύματα είτε (πιο σύνηθες αυτές τις μέρες) τα μικροκύματα που απεικονίζονται από το στόχο και ανιχνεύονται από έναν δέκτη, χαρακτηριστικά στην ίδια θέση με τη συσκευή αποστολής σημάτων.

Αν και το επιστρεφόμενο σήμα είναι συνήθως πολύ αδύνατο μπορεί να ενισχυθεί. Αυτό επιτρέπει στο ραντάρ να ανιχνεύσει τα αντικείμενα στις σειρές όπου άλλες εκπομπές, όπως ο ήχος ή το ορατό φως, θα ήταν πάρα πολύ αδύνατες για να ανιχνεύσουν. Πολλά ραντάρ χρησιμοποιούν το φαινόμενο Doppler για να εξαγάγουν πληροφορίες για την ακτινική ταχύτητα των στόχων (σχεδόν όλα τα ραντάρ με σκοπό να ανιχνεύσουν τους εναέριους στόχους χρησιμοποιούν το φαινόμενο Doppler για να διακρίνουν τα κινούμενα αντικείμενα από τις ανεπιθύμητες σταθερές ηχώ- clutter).Το ραντάρ χρησιμοποιείται σε πολλά πλαίσια, συμπεριλαμβανομένης της μετεωρολογικής ανίχνευσης, μετρώντας τα ωκεάνια κύματα επιφάνειας ,ελέγχοντας την εναέρια κυκλοφορία, ανιχνεύοντας την επιταχυνόμενη κυκλοφορία καθώς και για στρατιωτικούς σκοπούς.



Εικόνα17: Radar

5.2 Είδη Ραντάρ:

Τα συστήματα ραντάρ, ανάλογα με την πλατφόρμα/φορέα και τον επιθυμητό χώρο ραδιοεντοπισμού διακρίνονται σε:

Ραντάρ Ανιχνεύσεως επιφάνειας.

Τα Ραντάρ Ανιχνεύσεως επιφάνειας ή αλλιώς ραντάρ ναυσιπλοΐας, εγκαθίστανται σε ακτές ή σε πλοία και ανιχνεύουν την επιφάνεια της θάλασσας. Ανιχνεύουν όμως και τον εναέριο χώρο, αλλά σε μικρό ύψος. Εντοπίζουν στερεά αντικείμενα από σχετικά αγώγιμο υλικό (στόχους), που βρίσκονται στην επιφάνεια της θάλασσας ή σε μικρό ύψος και παρέχουν ακριβείς πληροφορίες αποστάσεων και διοπτρεύσεων των στόχων που εντοπίζουν. Ο εντοπισμός των στόχων επιτυγχάνεται ανεξάρτητα από τις συνθήκες ορατότητας και σε αποστάσεις μεγαλύτερες από αυτές του ορατού ορίζοντα. Χρησιμοποιούνται για να διασφαλίζουν την Ασφαλή ναυσιπλοΐα, τον Εντοπισμό εχθρικών ή μη πλοίων και Την ύπαρξη ή μη αντικειμένων (στόχων) στην επιφάνεια της θάλασσας.

Ραντάρ ανιχνεύσεως αέρα.

Εγκαθίστανται στο έδαφος (σε βουνοκορφές ή κοντά σε αεροδρόμια) και σε πλοία. Ως σκοπό έχουν να ανιχνεύουν τον εναέριο χώρο σε μεγάλες αποστάσεις και σε μεγάλα ύψη. Με το Ραντάρ ανιχνεύσεως αέρα εξασφαλίζεται ο έλεγχος της εναέριας κυκλοφορίας για την εξασφάλιση της δυνατότητας προσανατολισμού των αεροσκαφών και ο εντοπισμός εχθρικών αεροσκαφών σε μεγάλες αποστάσεις

Ραντάρ ελέγχου προσγειώσεως αεροσκαφών.

Εγκαθίστανται κοντά σε διαδρόμους αεροδρομίων ή σε αεροπλανοφόρα πλοία. Έχουν μικρή εμβέλεια, αλλά μεγάλη ακρίβεια και παρέχουν πληροφορίες αποστάσεως, ύψους, κατευθύνσεως διαδρόμου προσγειώσεως και ίχνους καθόδου. Οι πληροφορίες αυτές μεταδίδονται από το χειρίστη του ραντάρ με ραδιοτηλέφωνο στα αεροσκάφη και έτσι εξασφαλίζεται ασφαλείς προσγείωση, ακόμη και σε περίπτωση εντελώς ανύπαρκτης ορατότητας.

Υψομετρικά ραντάρ.

Εγκαθίστανται σε αεροσκάφη και εξασφαλίζουν ακριβή μέτρηση του ύψους πτήσεώς τους.

Μετεωρολογικά ραντάρ.

Με αυτά εξασφαλίζεται ο έγκαιρος εντοπισμός και η παρακολούθηση των επερχομένων καταιγίδων και κυκλώνων.

Ραντάρ ελέγχου πυρός.

Αποτελούν μέρος των διαφόρων τύπων οπλικών συστημάτων, στα οποία παρέχουν τα απαραίτητα στοιχεία βολής ή και στοιχεία διορθώσεως της κατευθύνσεως κινήσεως ορισμένων τύπων τηλεκατευθυνόμενων βλημάτων.

Ραντάρ μετρήσεως ταχύτητας.

Με αυτά επιτυγχάνεται η ακριβής μέτρηση της ταχύτητας οχημάτων στους αυτοκινητόδρομους και διαπιστώνεται η τήρηση ή μη του ορίου ταχύτητας, καθώς και η μέτρηση της ταχύτητας πλοίων σε θαλάσσιες περιοχές που ισχύει όριο ταχύτητας.

Ραντάρ ανίχνευσης κίνησης.

Ανιχνεύουν κινήσεις σε σταθερούς χώρους και ενεργοποιούν συναγερμούς, φώτα και διάφορους άλλους μηχανισμούς.

5.3 Όπλο Radar:

Ένα όπλο radar ταχύτητας είναι μία μικρή radar Doppler μονάδα που χρησιμοποιείται για να μετρήσει την ταχύτητα των κινούμενων αντικειμένων, συμπεριλαμβανομένων των οχημάτων . Ένα όπλο radar ταχύτητας μετρά την ταχύτητα των αντικειμένων κατά την οποία ανιχνεύει μια διαφορετική συχνότητα του επιστρεφόμενου σήματος λόγω του φαινομένου Doppler. Τα όπλα ταχύτητας radar μπορεί να χειρός ή στατικά. Τα όπλα radar ταχύτητας, όπως και άλλα είδη ραντάρ, αποτελούνται από ένα πομπό και δέκτη. Στέλνουν ένα ράδιο σήμα, κατόπιν λαμβάνουν το ίδιο σήμα πίσω μετά από την ανάκλαση από το αντικείμενο-στόχο. Λόγω του φαινομένου Doppler , αν το αντικείμενο κινείται , η συχνότητα του ανακλώμενου ραδιοκύματος όταν επιστρέφει είναι διαφορετική από τη συχνότητα του κύματος που μεταδίδεται απο το radar και από τη διαφορά αυτή (των συχνοτήτων) το όπλο ταχύτητας radar μπορεί να υπολογίσει την ταχύτητα του αντικείμενου. Η ταχύτητα του αντικείμενου-στόχου είναι ανάλογη με την διαφορά συχνότητας μεταξύ του εκπεμπόμενου και του ανακλώμενου ραδιοκύματος. Στην περίπτωση ενός όπλου ραντάρ το φαινόμενο Doppler εμφανίζεται δύο φορές, στις πορείες ραντάρ-στόχος και στόχος-ραντάρ.



Εικόνα 18: Όπλο Radar που μετράει την ταχύτητα ενός αυτοκινήτου

Αν κάποιος θέλει να διαπιστώσει με ευκολία και αξιοπιστία, με τι ταχύτητα κινείται ένα όχημα, έχει 2 επιλογές. Η πρώτη είναι τα Radar τύπου RF και η άλλη τα "Radar" τύπου Laser (Lidar - Ladar).

Radar: RF Radar

Ο πιο κοινός τύπος Radar χειρός είναι το RF Radar. RF σημαίνει Radio Frequency, δηλαδή ραδιοσυχνότητα.

Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι το εν λόγω όργανο χρησιμοποιεί απλά ραδιοκύματα, όπως αυτά του ραδιοφώνου, και της τηλεόρασης. Τα ραδιοκύματα, όπως και το φως, ανακλώνται ιδιαίτερα πάνω σε μεταλλικά αντικείμενα. Αν "ρίξουμε" ένα ραδιοκύμα σε ένα ακίνητο μεταλλικό αντικείμενο, αυτό θα ανακλαστεί, και θα γυρίσει πίσω όπως το στείλαμε. Αν όμως το αντικείμενο κινείται προς τα εμάς ή απομακρύνεται από εμάς, τότε το ραδιοκύμα θα γυρίσει πάλι πίσω σε εμάς, αλλά με διαφορετική συχνότητα. Αυτό είναι γνωστό ως "Φαινόμενο Doppler", και πάνω σε αυτό βασίζεται η λειτουργία των Radar. Ανάλογα δε με την ταχύτητα που κινείται το αντικείμενο, τόσο πιο μακρύ ή κοντό είναι το μήκος του κύματος που επιστρέφει σε εμάς. Έτσι, το Radar, γνωρίζοντας το "μήκος κύματος" που εκπέμπει, όταν λαμβάνει πίσω ένα κύμα το οποίο έχει διαφορά συχνότητας, μπορεί να υπολογίσει την ταχύτητα που κινούμαστε.

Καθώς λοιπόν ένα όχημα κινείται, κάποιος το σημαδεύει με ένα Radar, ρίχνοντας επάνω του ραδιοκύματα. Αυτά ανακλώνται σε πολλά μέρη του οχήματος, κατά κύριο λόγο στα μεταλλικά τμήματα του, και επιστρέφουν πίσω στο Radar. Τα περισσότερα πχ. έχουν εμβέλεια από 150 μέτρα έως 2 χιλιόμετρα. Οι πρακτικοί περιορισμοί βέβαια συνήθως επιβάλλουν την μέτρηση σε απόσταση 400-1000μ. Σε πολύ μεγάλες αποστάσεις (μεγαλύτερες από 1,5km), είναι πολύ δύσκολο να σημαδέψει κανείς έναν κινούμενο στόχο πλάτους μόλις 2 μέτρων.

Επειδή, η όλη διαδικασία της μέτρησης κρατάει 5-10 δευτερόλεπτα, το πιο πιθανό είναι ότι αν κινείστε με ταχύτητα 150km/h (περίπου 42 μέτρα το δευτερόλεπτο), αν το Radar αρχίσει να σας μετράει από απόσταση 300μ, δεν θα προλάβει να σας μετρήσει, αφού θα περάσετε από δίπλα του πριν το Radar του βγάλει έγκυρη ένδειξη.

Τέλος πρέπει να γνωρίζουμε ότι όσο μικρότερη είναι η γωνία ϕ , τόσο μικρότερη είναι η ταχύτητα που καταγράφει το Radar, ενώ η πραγματική είναι μεγαλύτερη, ϕ είναι η γωνία μεταξύ αυτοκινήτου και ραντάρ όταν μετράμε την ταχύτητα του κινούμενου στόχου. Το φαινόμενο αυτό λέγεται cosine effect.

Radar: Laser (Ladar και Lidar)

Στην αρχή αναφέραμε ότι αν κάποιος θέλει να διαπιστώσει με τι ταχύτητα κινείται ένα όχημα, έχει 2 επιλογές. Ο ένας τρόπος είναι τα Radar τύπου RF. Ο δεύτερος τρόπος είναι τα Laser. Τεχνικά, δεν είναι Radar, διότι δεν χρησιμοποιούν ραδιοκύματα, αλλά φως. Λόγω του τρόπου εκπομπής, η δέσμη αυτή δεν "απλώνεται", όπως πχ. το φως από έναν φακό ή το φως από τους προβολείς του αυτοκινήτου μας, αλλά παραμένει εξαιρετικά εστιασμένη. Έτσι, ενώ το φως από έναν απλό (ακόμα και ισχυρό) φακό χάνεται μετά από μερικές δεκάδες μέτρα, το φως του Laser είναι ορατό μετά από εκατοντάδες μέτρα. Το όπλο εκτοξεύει μια λεπτή δέσμη φωτός τύπου Laser. Η ακτίνα αυτή ανακλάται στο όχημα, και επιστρέφει πίσω. Από τον χρόνο που έκανε να γυρίσει πίσω η δέσμη, το όπλο υπολογίζει την απόσταση από το όχημα (Έστω 500m) Αμέσως, μια δεύτερη δέσμη εκτοξεύεται, και πάλι ανακλάται πίσω. Αυτήν τη φορά, η απόσταση από το όχημα μετράται στα 490m. Η όλη διαδικασία, από τη στιγμή που θα πατηθεί η σκανδάλη, μέχρι να δείξει σαφή ένδειξη το όπλο, διαρκεί ελάχιστα - λιγότερο από μισό δευτερόλεπτο, και τυπικά γύρω στα 0,3 δευτερόλεπτα. Αυτό, μαζί με την ακρίβεια της Laser, κάνει αυτό το μέσο πραγματικά από τα αντίστοιχα RF Radar.

Το Laser έχει και προβλήματα. Η δέσμη Laser είναι πολύ λεπτή, και αντανακλάται (ώστε να γυρίσει πίσω στο όπλο) μόνο σε σχεδόν κάθετες επιφάνειες, όπως η πινακίδα με τον αριθμό κυκλοφορίας του οχήματος και τους προβολείς αυτού. Αυτό μειώνει αρκετά το δραστικό βεληνεκές του Laser, αφού για να πετύχει κανείς μια πινακίδα 40x15cm από 500 μέτρα απόσταση χρειάζεται αφενός τρίποδο, και αφετέρου υπομονή. Επίσης, το Laser είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στις καιρικές συνθήκες. Βροχή, ομίχλη, χρώματα στον αέρα και άλλα, μειώνουν την ισχύ της ανακλώμενης δέσμης και δυσκολεύουν (καθυστερούν) την μέτρηση.

Επίσης, το Laser δεν μπορεί να τοποθετηθεί μέσα σε αυτοκίνητο, αφού οι συνεχείς κραδασμοί από τον δρόμο διαταράσσουν την ευθυγράμμιση με το στόχο, και το παρμπρίζ μειώνει σημαντικά την ισχύ της δέσμης. Ακόμα, χρώματα όπως το μαύρο, το μπλέ και το ιώδες προσφέρουν λίγες ανακλάσεις, αφού απορροφούν μεγάλο μέρος του Laser. Το ίδιο ισχύει και για τις καμπύλες επιφάνειες, αφού ανακλάνε τη δέσμη προς όλες τις κατευθύνσεις, μειώνοντας έτσι σημαντικά την πιθανότητα ένα σημαντικό ποσοστό της δέσμης να γυρίσει πίσω. Τέλος, το Laser είναι αρκετά πιο ευπαθές από το Radar στο cosine effect (πάντα υπέρ του οδηγού).

Από την άλλη, το laser δεν έχει πρόβλημα με την (μικρή) απόσταση μέτρησης. Η ταχύτητα μετράται ακόμα και στα 50 μέτρα. Γενικά, η μέγιστη εμβέλεια των Laser είναι από 500 έως 1000 μέτρα, με ελάχιστη δυνατή απόσταση μέτρησης γύρω στα 30 μέτρα. Η δε ακαριαία μέτρηση, βοηθάει αρκετά κάποιον στο να μετρήσει την ταχύτητα σας χωρίς να χρειάζεται να περιμένει όπως στο Radar .Αυτό σημαίνει ότι αν υπάρχουν αρκετά οχήματα στο δρόμο, ο χειριστής του Laser έχει πλέον την ικανότητα να προλάβει να μετρήσει πολλά (αν όχι όλα) τα οχήματα αυτά.

Τέλος, να σημειώσουμε ότι τα Laser μπορεί να τα δείτε είτε ως LADAR (LAsER Detection And Ranging - Ανίχνευση και μέτρηση απόσταση μέσω Laser) ή ως LIDAR (LIght Detection And Ranging - Ανίχνευση και μέτρηση απόστασης μέσω φωτός). Αυτοί οι δύο όροι είναι απολύτως ισοδύναμοι, αφού το Laser ανήκει στο ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, και άρα είναι φώς.

5.4 Βασικά χαρακτηριστικά doppler radar:

Τα ραντάρ Doppler αναπτύχθηκαν αρχικά για τα στρατιωτικά συστήματα ραντάρ, αλλά έχει γίνει από τότε ένα μέρος σχεδόν όλων των συστημάτων ραντάρ, συμπεριλαμβανομένου του καιρικού ραντάρ και πυροβόλα όπλα ραντάρ για την αστυνομία κυκλοφορίας και τον αθλητισμό.

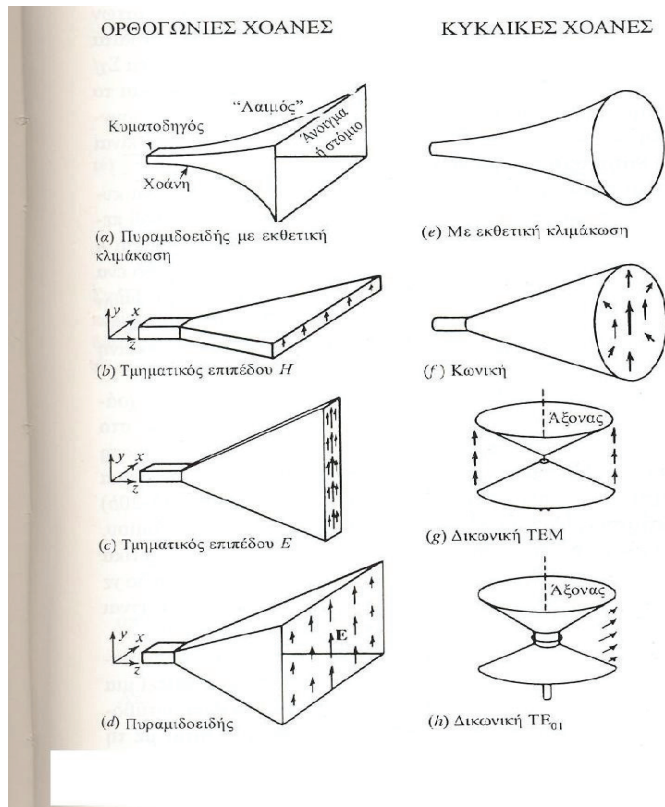
Ο όρος radar doppler αναφέρεται σε οποιοδήποτε radar όπου μπορεί να δώσει όχι μόνο μία εκτίμηση της απόστασης ενός αντικειμένου αλλά και της συχνότητας doppler αυτού, φαινόμενο το οποίο οφείλεται στην σχετική κίνηση αυτού ως προς το σύστημα. Βέβαια στον όρο «αντικείμενα» δεν εμπεριέχεται μόνο ο στόχος προς ανίχνευση αλλά και η υπέρθεση ενός συνόλου ανεπιθύμητων καταναμημένων αντικειμένων που προκαλούν ένα σημαντικό ποσοστό παρασιτικών ανακλάσεων ικανών να καταπνίξουν την επιθυμητή απόκριση του στόχου. Το radar doppler μπορεί να χρησιμοποιήσει την πληροφορία της μετρούμενης συχνότητας προκειμένου να «διακρίνει» τον επιθυμητό κινούμενο στόχο , μέσα στο υψηλά παρασιτικό περιβάλλον, συμπιέζοντας τις αποκρίσεις των υπόλοιπων στάσιμων (ή σχεδόν στάσιμων) ανακλάσεων.

Κεραίες Χοάνης

Εκπομπή και λήψη: Οι κεραίες εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα ή διαφορετικά ένα κύκλωμα όταν διαρρέετε από ρεύμα υψηλής συχνότητας ακτινοβολεί. Τυχαία το φαινόμενο αυτό είχε αποδειχθεί μαθηματικά από τις εξισώσεις του Maxwell από τις οποίες προκύπτει ότι όταν ένα καλώδιο διαρρέετε από ρεύμα γύρω από αυτό δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Επιπρόσθετα αν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται, μεταβάλλοντας το ρεύμα, δημιουργείται και ένα ηλεκτρικό πεδίο επίσης.

6.1 Κεραία Χοάνης:

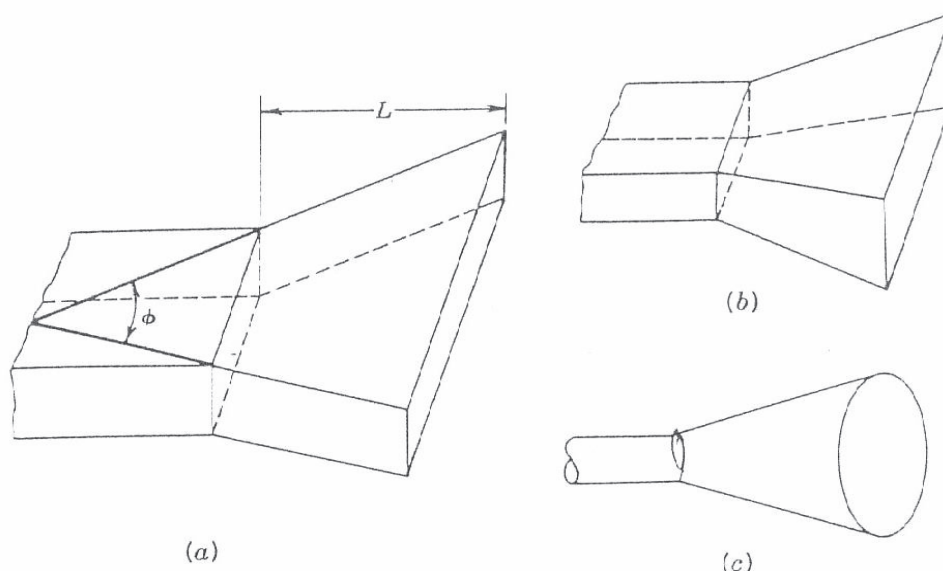
Μία κεραία χοάνης μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας διευρυμένος κυματοδηγός. Η λειτουργία της χοάνης είναι να παράγει ένα ομοιόμορφο μέτωπο φάσης με μεγαλύτερη επιφάνεια από εκείνη του κυματοδηγού, και άρα μεγαλύτερη κατευθυντικότητα. Η κεραία χοάνης είναι από τις πιο κατευθυντικές κεραίες και επίσης δεν θα υπάρξουν περιθλάσεις. Είναι απόλυτα κατάλληλη και χρησιμοποιείται πολύ. Ακόμη, η κεραία χοάνης έχει ασθενείς πλευρικούς λοβούς. Ωστόσο, οι χοάνες χρησιμοποιούνται στις μέρες μας σαν κύρια πηγή σε άλλες κεραίες. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται μερικοί τύποι χοάνης.



Εικόνα 19: Τύποι κεραιών χοάνης

6.2 Τύποι Χοανών:

Υπάρχουν αρκετοί δυνατοί τύποι χοανών : τρεις από τις πιο συνηθισμένες χοάνες παρουσιάζονται εδώ . Η χοάνη τομέα (sectoral horn) εκπέμπει σε μία μόνο κατεύθυνση και είναι ισοδύναμη με τον pillbox παραβολικό ανακλαστήρα. Η πυραμιδοειδής χοάνη (pyramidal horn) είναι μια δικάτευθυντική κεραία και έχει το σχήμα κόλουρης πυραμίδας. Η κωνική χοάνη (conical horn) είναι παρόμοια με την πυραμοειδή και αποτελεί ένα λογικό τερματισμό για τους κυκλικούς κυματοδηγούς. Αν η γωνία εκπομπής φ είναι τόσο μικρή, οδηγώντας σε μία μικρή χοάνη, η δέσμη ακτινοβολίας δεν θα είναι κατευθυντική. Το ίδιο ισχύει και για τις δύο γωνίες εκπομπής της πυραμοειδούς χοάνης. Αν η γωνία φ είναι πολύ μικρή, το ίδιο μικρό θα είναι και το στόμιο της χοάνης, και η κατευθυντικότητα θα είναι πολύ μικρή (είναι πολύ πιθανά φαινόμενα διαθλάσεως). Είναι λοιπόν φανερό ότι η γωνία εκπομπής έχει μία βέλτιστη τιμή, η οποία σχετίζεται στενά με το μήκος L , που σημειώνεται στο παρακάτω σχήμα.

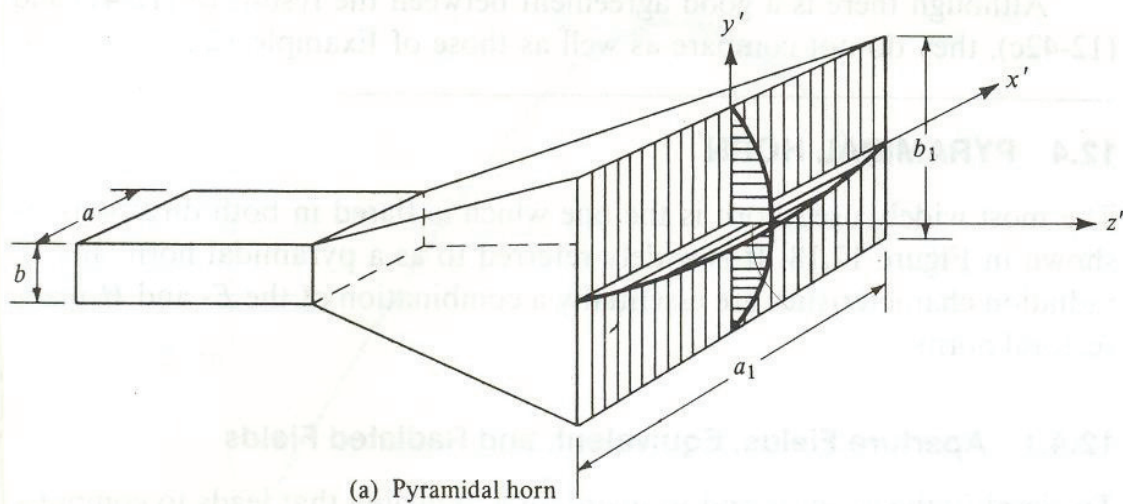


Εικόνα 20: Πυραμιδοειδής και κωνική χοάνη

6.3 Πυραμιδοειδής χοάνη:

Ένα είδος ανηχικού θαλάμου έχει σχήμα πυραμιδοειδούς χοάνης που είναι στενή στο ένα άκρο και μεγαλώνει σταδιακά έως μια μεγάλη ορθογώνια περιοχή. Οι θάλαμοι αυτοί σχεδιάζονται για συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Η κεραία εκπομπής τοποθετείται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στη στενή κορυφή, ώστε οι ανακλάσεις από τις πλευρές του θαλάμου να συνεισφέρουν απ' ευθείας στο πεδίο της υπό εξέταση κεραίας καθώς συμβαίνουν κοντά στην κεραία εκπομπής. Αποδεικνύεται ότι για μία σωστά τοποθετημένη κεραία στην κορυφή του θαλάμου υπάρχει μικρή αλλαγή στην διαφορά φάσης μεταξύ της απ' ευθείας και της ανακλώμενης ακτίνας σε οποιοδήποτε σημείο στην περιοχή μέτρησης. Οι ακτίνες αυτές προστίθενται διανυσματικά παράγοντας ένα αργά μεταβαλλόμενο χωρικά διάγραμμα παρεμβολών και συνεπώς ένα σχετικά ομαλού πλάτους πεδίο στην περιοχή μέτρησης του θαλάμου. Όσο αυξάνει η συχνότητα λειτουργίας, γίνεται δυσκολότερη η τοποθέτηση της κεραίας εκπομπής δίπλα στην κορυφή του θαλάμου. Γι' αυτό χρησιμοποιείται κεραία εκπομπής με υψηλότερη απολαβή ώστε να περιορίζονται οι ανακλάσεις και τοποθετείται πιο μακριά από τη στενή κορυφή οπότε ουσιαστικά πλησιάζει στη λειτουργία του ορθογώνιου θαλάμου.

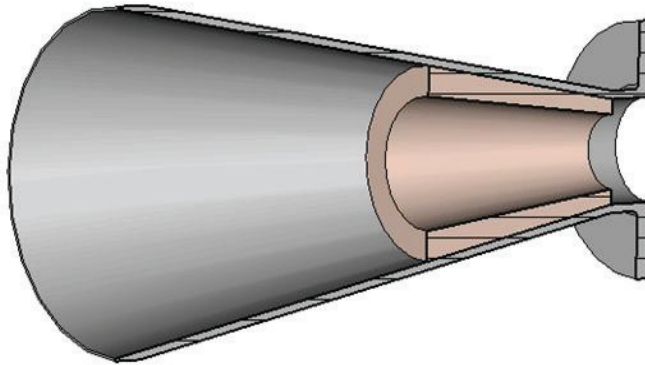
Έτσι συνήθως χρησιμοποιείται αυτό το είδος θαλάμου για μετρήσεις στην VHF και UHF μπάντα. Το πεδίο εντός του θαλάμου δεν διαδίδεται όπως το σφαιρικό κύμα, οπότε οι θάλαμοι αυτού του είδους δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις απολαβής που βασίζονται απ' ευθείας στον τύπο του Friis. Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που παράγονται στο χώρο του ανηχικού θαλάμου, ακολουθεί το μοντέλο διάδοσης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στον ελεύθερο χώρο. Αυτό συμβαίνει επειδή τα ανακλώμενα κύματα απορροφούνται από το απορροφητικό υλικό, που βρίσκεται στους τοίχους, στο πάτωμα και στην οροφή του θαλάμου. Σε περίπτωση που ο θάλαμος δεν είναι κατάλληλα επενδυμένος από αυτό το υλικό, είτε το υλικό έχει χάσει την απορροφητική του ικανότητα, τότε θα υπάρχουν εσωτερικές ανακλάσεις και κατά συνέπεια σχηματισμοί ειδώλων. Τα πλεονεκτήματα των μετρήσεων εντός ενός ανηχικού θαλάμου σε σχέση με μετρήσεις σε εξωτερικό χώρο είναι, η ανεξάρτηση από τον καιρό, η ασφάλεια του εξοπλισμού, ο έλεγχος των συνθηκών του περιβάλλοντος και η απαλλαγή από εξωτερικές παρεμβολές στις μετρήσεις.



Εικόνα 21: .Πυραμοειδή κεραία χοάνη

6.4 Κωνική κεραία χοάνης :

Η κωνική χοάνη (conical horn) είναι παρόμοια με την πυραμιδοειδή και αποτελεί ένα λογικό τερματισμό για τους κυκλικούς κυματοδηγούς. Η κυκλική χοάνη μπορεί να τροφοδοτηθεί κατευθείαν από ένα κυκλικό κυματοδηγό. Η συμπεριφορά μιας κωνικής χοάνης είναι ανάλογη με αυτή της πυραμιδοειδούς χοάνης .



Εικόνα 22: .Κωνική κεραία χοάνη

Αυξάνει το κέρδος - κατευθυντικότητα , καθώς η γωνία διεύρυνσης αυξάνει μέχρι, όμως ενός μέγιστου σημείο, γιατί έπειτα η κατευθυντικότητα αρχίζει και μειώνεται.

7.1 Πειραματική διάταξη

Αρχικά τοποθετήθηκαν τα διάφορα όργανα, όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα. Επιβεβαιώθηκε ότι προσομοιωτής ταχύτητας και κεραία εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων βρίσκονται στην ίδια ευθεία και έχουν τον ίδιο προσανατολισμό όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



Εικόνα 23: Πειραματική διάταξη φαινομένου doppler



Εικόνα 24: Τροφοδοτικό της Gunn διόδου

Το όργανο στην εικόνα 24 είναι ένα τροφοδοτικό με το οποίο τροφοδοτούμε την δίοδο Gunn με ρεύμα για να εκπέμψει ηλεκτρομαγνητικά κύματα.



Εικόνα 25: Κεραία εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Στην εικόνα 25 βλέπουμε την κεραία εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η οποία εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα προς τον στόχο μας. Η κεραία διαθέτει πομπό αλλά και δέκτη για τη λήψη των ανακλώμενων κυμάτων.

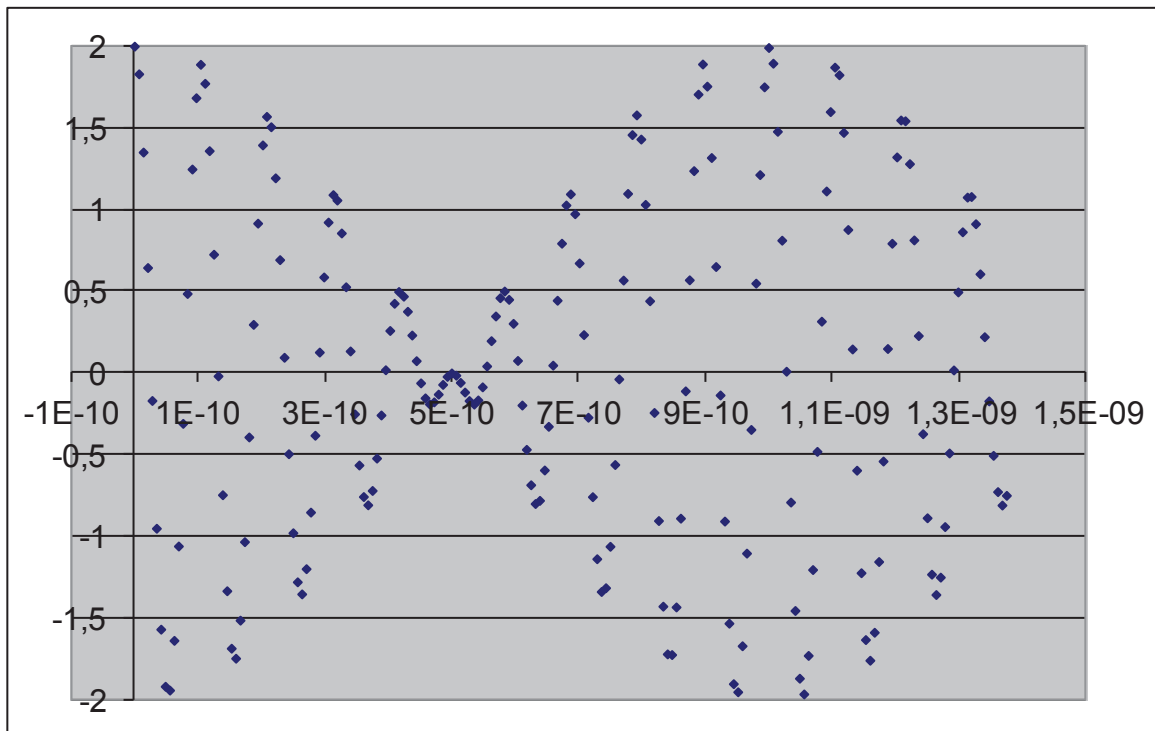


Εικόνα 26: Προσομοιωτής ταχύτητας

Στην εικόνα 26 βλέπουμε τον προσομοιωτή ταχύτητας που χρησιμοποιήσα σε λειτουργία όπου έκει σημαδευσαι με την κεραία μας για να πάρουμε τα αποτελέσματα.

Γραφικές Παραστάσεις

7.2 Γραφική παράσταση Διακροτήματος



Εικόνα 27: Διακρότημα

Διακρότημα δημιουργείται από την συμβολή δύο κυμάτων τα οποία έχουν ίδιο πλάτος αλλά έχουν ελάχιστη διαφορά στην συχνότητα τους.

7.3 Παρατηρητής πλησιάζει:

7.3.1 Γραφική παράσταση Συχνότητα Πηγής:

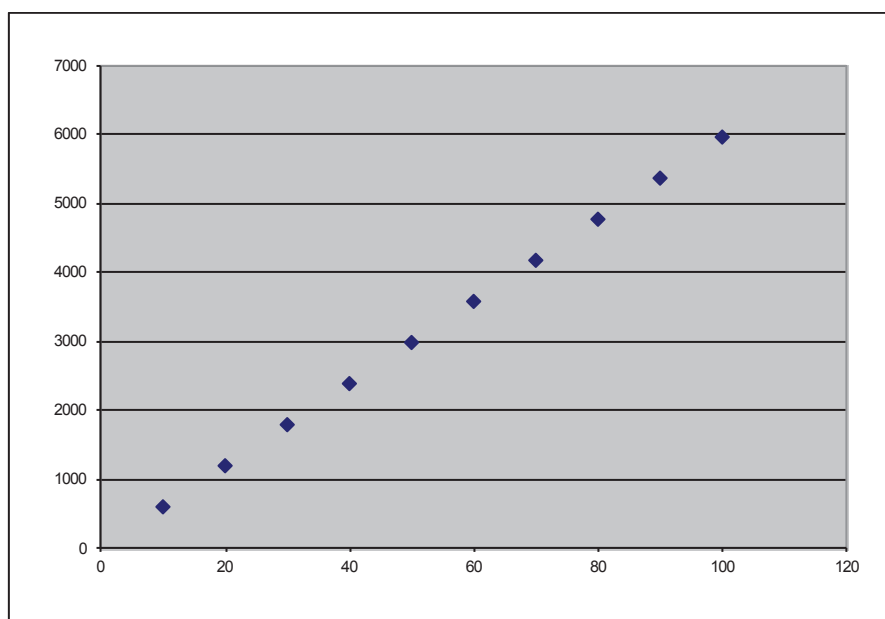
Όσο αναφορά την πρώτη μέτρηση του πειράματος θεωρήσαμε $F_{πηγής}$ (συχνότητα πηγής) 8.9 GHz. Την ταχύτητα την αυξάναμε με βήμα 10 m/s και αντίστοιχα υπολογίζαμε την F_d (συχνότητα doppler) από το διακρότημα, έτσι προέκυψε ο παρακάτω πίνακας. Βάση θεωρίας αυτά τα στοιχεία του πίνακα πρέπει να σχηματίζουν ευθεία γραμμή της μορφής $Y = A \cdot X$ και μέσου του A (κλίση της ευθείας) βρήσκουμε $F_{πηγής}$ $F_{πηγής}$ (συχνότητα πηγής).

Μετρήσεις

Συχνότητα Πηγής (Fπηγής)		
a/a	Ταχύτητα κινητού (υ m/s)	Μετατόπιση Doppler (fd Hz)
1	10	596
2	20	1192
3	30	1788
4	40	2384
5	50	2980
6	60	3576
7	70	4172
8	80	4768
9	90	5364
10	100	5960

Πίνακας 1.1: Συχνότητα πηγής

Γραφική Παράσταση Συχνότητα Πηγής (Fπηγής)



Εικόνα 28: Γραφική παράσταση συχνότητα πηγής

Για να βρούμε την συχνότητα της πηγής θα πρέπει να κάνουμε χρήση του παρακάτω τύπου:

$$Fd = \frac{2 \cdot F_{\text{πηγής}}}{C} \cdot U$$

Ο παραπάνω τύπος είναι της μορφής $Y = A \cdot X$, όπου:

A: είναι η κλίση της ευθείας

Y: είναι οι τιμές που έχουμε πάρει για την Μετατόπιση Doppler

X: είναι οι τιμές που έχουμε πάρει για την Ταχύτητα Κινητού

$$A = \frac{Y}{X}$$

Άρα για να βρούμε το A έχουμε:

$$A = 59.6$$

Με βάση τους τύπους $Fd = \frac{2 \cdot F_{\text{πηγής}}}{C} \cdot U$ και $Y = A \cdot X$ ισχύει ότι:

$A = \frac{(2 \cdot F_{\text{πηγή}})}{C}$ αν λύσουμε ως προς $F_{\text{πηγή}}$ (ζητούμενο) θα έχουμε:

$$F_{\text{πηγή}} = \frac{(A \cdot C)}{2} = 89.4 \cdot 10^8 \text{ Hz}$$

Άρα $F_{\text{πηγή}} = 89.4 \cdot 10^8 \text{ Hz}$

Από την παραπάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνει η συχνότητα Doppler (Fd) και η ταχύτητα του κινητού (U), αυξάνει και η συχνότητα της πηγής ($F_{\text{πηγή}}$).

7.3.2 Γραφική παράσταση Ταχύτητας Κινητού:

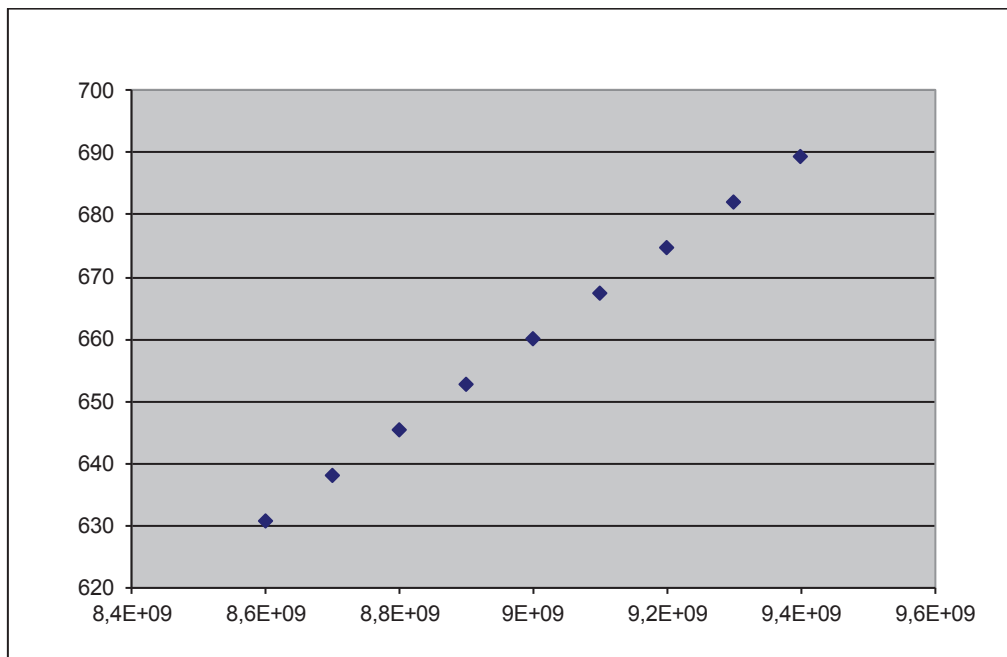
Όσο αναφορά την δεύτερη μέτρηση του πειράματος θεωρήσαμε U (ταχύτητα πηγής) 10 m/s. Την συχνότητα πηγής την αυξάναμε με βήμα 10^8 Hz και αντίστοιχα υπολογίζαμε την Fd (συχνότητα doppler) από το διακρότημα, έτσι προέκυψε ο παρακάτω πίνακας. Βάση θεωρίας αυτά τα στοιχεία του πίνακα πρέπει να σχηματίζουν ευθεία γραμμή της μορφής $Y = A \cdot X$ και μέσου του A (κλίση της ευθείας) βρήσκουμε U (ταχύτητα πηγής).

Μετρήσεις

Ταχύτητας Κινητού (U)		
a/a	Συχνότητα πηγής (f _{πηγή} Hz)	Μετατόπιση Dopplern (fd Hz)
1	8600000000	630,6
2	8700000000	638,0
3	8800000000	645,4
4	8900000000	652,7
5	9000000000	660,0
6	9100000000	667,2
7	9200000000	674,7
8	9300000000	682,0
9	9400000000	689,3

Πίνακας 1.2: Ταχύτητας κνητού

Γραφική παράσταση ταχύτητας κινητού



Εικόνα 29: Γραφική παράσταση ταχύτητας κινητού

Για να βρούμε την ταχύτητα του κινητού θα πρέπει να κάνουμε χρήση του παρακάτω τύπου:

$$Fd = \frac{2 \cdot U}{C} \cdot F_{\text{πηγής}}$$

Ο παραπάνω τύπος είναι της μορφής $Y = A \cdot X$, όπου:

A: είναι η κλίση της ευθείας

Y: είναι οι τιμές που έχουμε πάρει για την Μετατόπιση Doppler

X: είναι οι τιμές που έχουμε πάρει για την Συχνότητα Πηγής

Άρα για να βρούμε το A έχουμε: $A = \frac{Y}{X}$

$$A = 7.33 \cdot 10^{-8}$$

Με βάση τους τύπους $Fd = \frac{2 \cdot U}{C} \cdot F_{\text{πηγής}}$ και $Y = A \cdot X$ ισχύει ότι: $A = \frac{(2 \cdot U)}{C}$

αν λύσουμε ως προς U (ζητούμενο) θα έχουμε:

$$U = \frac{(A \cdot C)}{2} = \frac{(7.33 \cdot 10^{-8} \cdot 3 \cdot 10^8)}{2} = \frac{21.99}{2} = 11 \text{ m/sec}$$

Άρα $U = 11 \text{ m/sec}$

Από την παραπάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνει η συχνότητα Doppler (Fd) και η συχνότητα της πηγής ($F_{πηγής}$), αυξάνει και η ταχύτητα του κινητού (U).

7.4 Παρατηρητής απομακρύνεται:

7.4.1 Γραφική παράσταση Συχνότητα Πηγής:

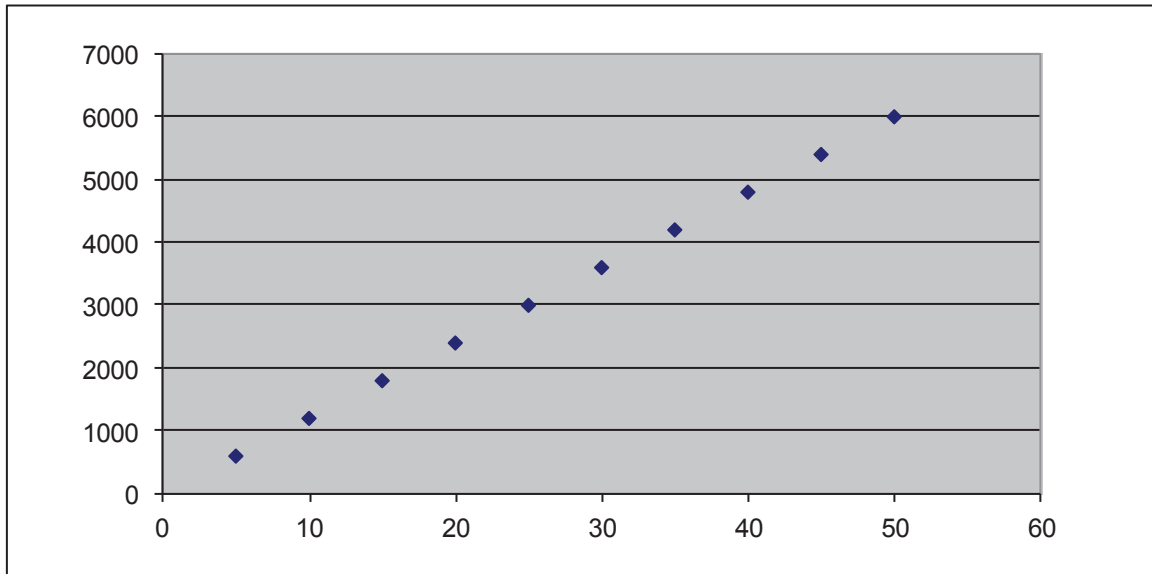
Στην τρίτη μέτρηση του πειράματος θεωρήσαμε $F_{πηγής}$ (συχνότητα πηγής) 8.9 GHz. Την ταχύτητα την αυξάναμε με βήμα 5 m/s και αντίστοιχα υπολογίζαμε την Fd (συχνότητα doppler) από το διακρότημα, έτσι προέκυψε ο παρακάτω πίνακας. Βάση θεωρίας αυτά τα στοιχεία του πίνακα πρέπει να σχηματίζουν ευθεία γραμμή της μορφής $Y = A \cdot X$ και μέσου του A (κλήση της ευθείας) βρήσκουμε $F_{πηγής}$ $F_{πηγής}$ (συχνότητα πηγής).

Μετρήσεις

Συχνότητα Πηγής (Fπηγής)		
a/a	Ταχύτητα κινητού (υ m/s)	Μετατόπιση Doppler (fd Hz)
1	5	600
2	10	1200
3	15	1800
4	20	2400
5	25	3000
6	30	3600
7	35	4200
8	40	4800
9	45	5400
10	50	6000

Πίνακας 1.3: Συχνότητα πηγής

Γραφική Παράσταση Συχνότητα Πηγής (Fπηγής)



Εικόνα 30: Γραφική παράσταση συχνότητα πηγής

Για να βρούμε την συχνότητα της πηγής θα πρέπει να κάνουμε χρήση του παρακάτω τύπου:

$$Fd = \frac{2 \cdot F_{\text{πηγής}}}{C} \cdot U$$

Ο παραπάνω τύπος είναι της μορφής $Y = A \cdot X$, όπου:

A: είναι η κλίση της ευθείας

Y: είναι οι τιμές που έχουμε πάρει για την Μετατόπιση Doppler

X: είναι οι τιμές που έχουμε πάρει για την Ταχύτητα Κινητού

$$A = \frac{Y}{X}$$

Άρα για να βρούμε το A έχουμε:

$$A = 120$$

Με βάση τους τύπους $Fd = \frac{2 \cdot F_{\text{πηγής}}}{C} \cdot U$ και $Y = A \cdot X$ ισχύει ότι:

$A = \frac{(2 \cdot F_{\text{πηγή}})}{C}$ αν λύσουμε ως προς $F_{\text{πηγή}}$ (ζητούμενο) θα έχουμε:

$$F_{\text{πηγή}} = \frac{(A \cdot C)}{2} = 180 \cdot 10^8 \text{ Hz}$$

Άρα $F = 180 \cdot 10^8 \text{ Hz}$

Από την παραπάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνει η συχνότητα Doppler (Fd) και η ταχύτητα του κινητού (U), αυξάνει και η συχνότητα της πηγής ($F_{\text{πηγή}}$).

7.4.2 Γραφική παράσταση Ταχύτητας Κινητού:

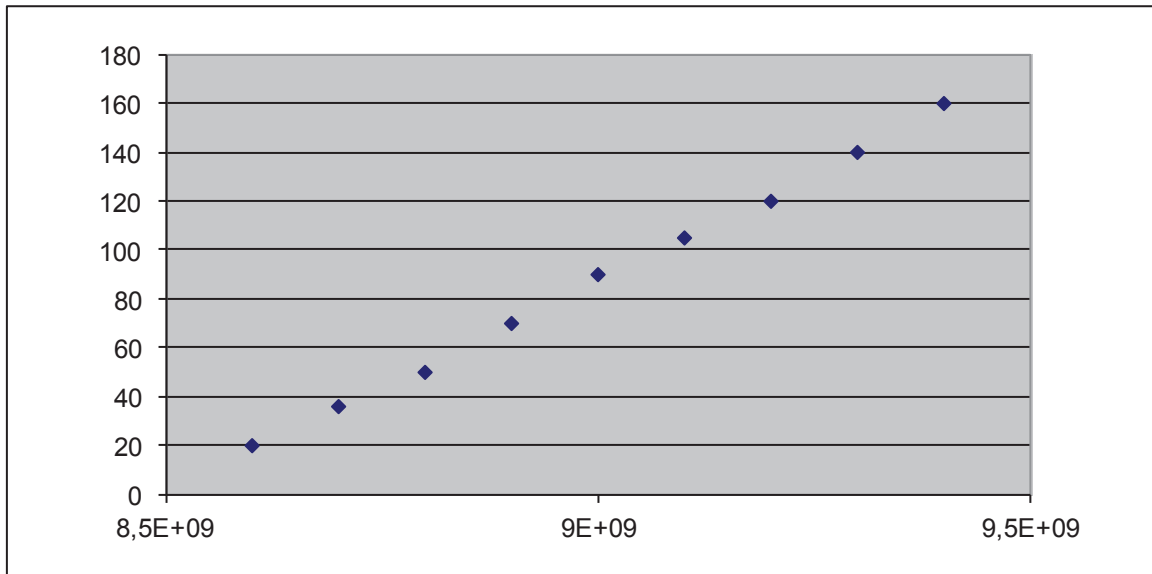
Στην τέταρτη μέτρηση του πειράματος θεωρήσαμε U (ταχύτητα πηγής) 14 m/s. Την συχνότητα πηγής την αυξάναμε με βήμα 10^8 Hz και αντίστοιχα υπολογίζαμε την Fd (συχνότητα doppler) από το διακρότημα, έτσι προέκυψε ο παρακάτω πίνακας. Βάση θεωρίας αυτά τα στοιχεία του πίνακα πρέπει να σχηματίζουν ευθεία γραμμή της μορφής $Y = A \cdot X$ και μέσου του A (κλήση της ευθείας) βρήσκουμε U (ταχύτητα πηγής).

Μετρήσεις

Ταχύτητας Κινητού (U)		
a/a	Συχνότητα πηγής (f _{πηγή} Hz)	Μετατόπιση Doppler (fd Hz)
1	8600000000	20
2	8700000000	36
3	8800000000	50
4	8900000000	70
5	9000000000	90
6	9100000000	105
7	9200000000	120
8	9300000000	140
9	9400000000	160

Πίνακας 1.4: Ταχύτητας κινητού

Γραφική παράσταση ταχύτητας κινητού



Εικόνα 31: Γραφική παράσταση ταχύτητας κινητού

Για να βρούμε την ταχύτητα του κινητού θα πρέπει να κάνουμε χρήση του παρακάτω τύπου:

$$Fd = \frac{2 \cdot U}{C} \cdot F_{\text{πηγής}}$$

Ο παραπάνω τύπος είναι της μορφής $Y = A \cdot X$, όπου:

A: είναι η κλίση της ευθείας

Y: είναι οι τιμές που έχουμε πάρει για την Μετατόπιση Doppler

X: είναι οι τιμές που έχουμε πάρει για την Συχνότητα Πηγής

Άρα για να βρούμε το A έχουμε: $A = \frac{Y}{X}$

$$A = 9.76 \cdot 10^{-8}$$

Με βάση τους τύπους $Fd = \frac{2 \cdot U}{C} \cdot F_{\text{πηγής}}$ και $Y = A \cdot X$ ισχύει ότι:

$A = \frac{(2 \cdot U)}{C}$ αν λύσουμε ως προς U (ζητούμενο) θα έχουμε:

$$U = \frac{(A \cdot C)}{2} = 14.6 \text{ m/s}$$

Άρα $U = 14.6 \text{ m/s}$

Από την παραπάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνει η συχνότητα Doppler (Fd) και η συχνότητα της πηγής ($F_{πηγής}$), αυξάνει και η ταχύτητα του κινητού (U).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Θεωρία Σφαλμάτων

8.1 Εισαγωγή:

Οι πειραματικές μετρήσεις πρέπει να είναι ακριβείς ώστε να οδηγούμαστε σε ορθά αποτελέσματα. Κατά την διαδικασία λήψης των πειραματικών μετρήσεων γίνονται σφάλματα που άλλοτε οφείλονται σε συνθήκες παρατήρησης και άλλοτε σε εξωτερικά αίτια που δεν ελέγχονται. Μερικοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις και προκαλούν σφάλματα είναι οι ατέλειες των οργάνων, αδεξιότητες παρατηρητή, εξωτερικά πεδία, θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στο κεφαλαίο αυτό, πέρα από τις βασικές αρχές του πειραματισμού θα ασχοληθούμε με τη μελέτη και εύρεση των σφαλμάτων μετρήσεων.

8.2 Πειραματικά Σφάλματα:

8.2.1 Είδη Μετρήσεων:

Τις μετρήσεις τις διακρίνουμε σε δυο κατηγορίες: τις απλές (άμεσες) και τις σύνθετες (έμμεσες). Απλές είναι οι μετρήσεις στις οποίες η αριθμητική τιμή ενός μεγέθους προκύπτει απευθείας από μια παρατήρηση, όπως για παράδειγμα η μέτρηση μιας απόστασης. Σύνθετες είναι οι μετρήσεις με τις οποίες η αριθμητική τιμή ενός μεγέθους προκύπτει σα συνάρτηση των τιμών άλλων μεγεθών, που προέκυψαν από απλές μετρήσεις, όπως για παράδειγμα ο υπολογισμός του εμβαδού μια επιφάνειας.

8.2.2 Σημαντικά Ψηφία:

Το πλήθος των σημαντικών ψηφίων ενός αριθμού μας δίνει ένα μέτρο της ακρίβειας ενός πειραματικού αποτελέσματος. Για τον καθορισμό των σημαντικών ψηφίων μιας μέτρησης κατά την αναφορά του πειραματικού μας αποτελέσματος χρησιμοποιούμε τους ακόλουθους κανόνες:

1. ως πρώτο (και περισσότερο) σημαντικό πεδίο καταμετράται το αριστερότερο ευρισκόμενο μη μηδενικό ψηφίο
2. απουσία υποδιαστολής, ως τελευταίο (και λιγότερο) σημαντικό ψηφίο καταμετράται το δεξιότερο μη μηδενικό ψηφίο
3. παρουσία υποδιαστολής ως τελευταίο (και λιγότερο) σημαντικό ψηφίο καταμετράται το δεξιότερο ψηφίο ακόμα και αν είναι το μηδέν
4. όλα τα ψηφία ανάμεσα στο πρώτο σημαντικό και το τελευταίο σημαντικό καταμετρώνται ως σημαντικά ψηφία

8.2.3 Σφάλματα Μετρήσεων:

8.2.3.1 Ακρίβεια και Διακριτική ικανότητα:

Ο όρος διακριτική ικανότητα περιορίζεται αποκλειστικά στην αξιολόγηση των οργάνων μέτρησης. Για μια μοναδική μέτρηση που πραγματοποιείται από ένα συγκεκριμένο όργανο, η διακριτική ικανότητα αποτελεί τη μέγιστη ακρίβεια με την οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί η μέτρηση.

Ορίζουμε ακόμη την απόλυτη ακρίβεια μιας μέτρησης. Αυτή εκφράζεται με τις ίδιες μονάδες που χρησιμοποιούνται για το μέγεθος που μετράται. Η σχετική ακρίβεια εκφράζει την ίδια ιδιότητα σε ποσοστιαίες μονάδες σε σχέση με την απόλυτη τιμή που προσδιορίζει τη μέτρηση. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα κατά την εκτέλεση ενός πειράματος είναι τα σφάλματα που υπεισέρχονται στις μετρήσεις. Η γνώση τους αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχία κάποιου πειράματος. Η δε προσπάθεια μείωσης τους μπορεί να οδηγήσει σε τεράστια αύξηση τους κόστους ή ακόμα και σε αδιέξοδες καταστάσεις. Οπότε ο όρος “σφάλμα” στην επιστημονική γλώσσα σημαίνει την αναπόφευκτη, αριθμητικά εκφρασμένη, έλλειψη ακρίβειας που υπάρχει στη μέτρηση ενός μεγέθους σε όλα τα πειράματα καθώς και τις τυχόν ατέλειες ή ελαττωματικότητας των οργάνων και των μεθόδων μας. Στην περίπτωση που στην ίδια μέτρηση έχουμε πολλά σφάλματα κρατάμε πάντα το μεγαλύτερο. Στο τέλος κάθε πειράματος μας, μετά την λήψη μετρήσεων και την επεξεργασία των τιμών πάντα τη μέση τιμή με τα σφάλματα της (και το απόλυτο και το σχετικό).

8.2.3.2 Μαθηματικός Ορισμός του Σφάλματος:

Έστω N το πλήθος των φυσικών παραμέτρων x_1, x_2, \dots, x_N που επηρεάζουν με οποιοδήποτε τρόπο τη μέτρηση ενός μεγέθους. Υποθέτουμε ότι σε μια ιδανική μέτρηση όπου είναι δυνατό να βρεθεί η αληθινή τιμή του a του μετρούμενου μεγέθους οι παραπάνω παράμετροι παίρνουν τις τιμές u_1, u_2, \dots, u_N . Σε μια πραγματική μέτρηση, η τιμή του μεγέθους που μετριέται είναι συνάρτηση της αληθινής τιμής αυτού του a και των τιμών x_1, x_2, \dots, x_N των παραμέτρων κατά τη μέτρηση αυτή. Εάν x είναι η μετρούμενη τιμή τότε σύμφωνα με τα παραπάνω

$$x = F(a, x_1, x_2, \dots, x_N)$$

Στην περίπτωση ιδανικής μέτρησης θα ικανοποιηθεί προφανώς η συνθήκη

$$a = F(a, u_1, u_2, \dots, u_N)$$

Εάν οι διαφορές $(x_1 - u_1), (x_2 - u_2), (x_3 - u_3), \dots, (x_N - u_N)$ ή γενικότερα $(x_i - u_i)$, $i = 1, 2, 3, \dots, N$, είναι μικρές ώστε να μπορούν να παραλειφθούν οροί δεύτερης και ανώτερης τάξης στη σειρά Taylor της συνάρτησης $x = F(a, x_1, x_2, \dots, x_N)$ τότε:

$$x = F(a, x_1, x_2, \dots, x_N) \text{ τότε:}$$

$$x - a = \sum_{i=1}^N \frac{\partial F(a, x_1, x_2, \dots, x_N)}{\partial x_i} \cdot (x_i - u_i)$$

η διαφορά

$$E = x - a = (\text{μετρούμενη τιμή}) - (\text{αληθινή τιμή})$$

είναι το σφάλμα που παρατηρήθηκε κατά τη μέτρηση ή το ολικό σφάλμα της μέτρησης και το

$$\varepsilon_i = \frac{\partial F}{\partial x_i} \cdot (x_i - u_i), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N$$

είναι το σφάλμα της παραμετρού x_i .

Προφανώς

$$E = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i$$

Η εξίσωση $E = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i$ μας λέει πως η γνώση όλων των σφαλμάτων ε_i μας

επιτρέπει να υπολογίσουμε το ολικό σφάλμα E και επομένως να μπορούμε να προσδιορίσουμε την αληθινή τιμή. Ανάλογα με τη δυνατότητα προσδιορισμού των εξωτερικών αιτιών που επιρεάζουν μια μέτρηση τα σφάλματα μπορούμε να τα χωρίσουμε σε διάφορες κατηγορίες.

8.2.2.3 Κατηγορίες Σφαλμάτων:

Τα σφάλματα χωρίζονται σε δυο κατηγορίες τα συστηματικά και τα τυχαία σφάλματα. Τα συστηματικά σφάλματα αλλοιώνουν μια μέτρηση πάντοτε κατά τον ίδιο τρόπο και κατά την ίδια φορά δηλαδή είτε είναι θετικά είτε αρνητικά. Τα αίτια τους μπορούν να προσδιοριστούν γιατί σχετίζονται με την μέθοδο της μέτρησης. Τα συστηματικά σφάλματα οφείλονται:

- Σε ατέλειες των οργάνων μέτρησης: οι ατέλειες των οργάνων είναι κυρίως η βαθμονόμηση της κλίμακας μέτρησης καθώς και η φθορά του οργάνου.
- Στη μέθοδο μέτρησης: τα σφάλματα αυτά βρίσκονται δύσκολα, γι' αυτό επιβάλλεται ο έλεγχος της μέτρησης και με άλλη μέθοδο.

- Σε εξωτερικά αίτια: όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, το γήινο μαγνητικό πεδίο, οι ηλεκτρικές επιδράσεις κ.α. είναι δυνατόν να επηρεάσουν τις μετρήσεις

Τα τυχαία σφάλματα παρατηρούνται όταν επαναλαμβανόμενες μετρήσεις του ίδιου μεγέθους με την ίδια μέθοδο και τα ίδια όργανα δίνουν διαφορετικές τιμές. Τα σφάλματα αυτά μπορεί να είναι είτε θετικά είτε αρνητικά. Τα τυχαία σφάλματα οφείλονται:

- Στην περιορισμένη ευαισθησία του οργάνου μέτρησης: τα διάφορα μεγέθη μετρούνται συνήθως με κατάλληλα βαθμολογημένα κλίμακα. Η κλίμακα είναι διαιρεμένη σε πεπερασμένο αριθμό διαστημάτων και η πιο λεπτή υποδιαίρεση βάζει ένα όριο στην ακρίβεια. Είναι πράγματι αδύνατο να μετρηθούν αποστάσεις με ακρίβεια μεγαλύτερη των 0.5 mm εάν μια μετροταινία έχει υποδιαίρεσεις μέχρι 1 mm.
- Στην ικανότητα του παρατηρητή: η πείρα, η προσοχή και η προσωπική ικανότητα του παρατηρητή είναι στοιχεία που συντελούν στη μεγαλύτερη ακρίβεια των μετρήσεων.
- Στην αστάθεια των εξωτερικών συνθηκών
- Στο πλήθος αστάθμητων παραγόντων

8.2.3.4 Τυχαία Σφάλματα:

Τα τυχαία σφάλματα σχετίζονται με την ακρίβεια μιας μέτρησης και είναι εκείνα που ανακύπτουν στατιστικά από την ανάλυση των επαναλαμβανόμενων και πολλαπλών μετρήσεων. Ειδικότερα, ποσοτικοποιούνται με καλύτερη ακρίβεια (και η τάξη μεγέθους τους ελαττώνεται) από την αυξανόμενη πολλαπλότητα των μετρήσεων. Τα Τυχαία Σφάλματα διαπράττονται αναπόφευκτα σε κάθε πειραματική διαδικασία, ακόμα και αν θεωρήσουμε ότι ο πειραματιστής εξαντλεί την προσοχή και την επιμέλειά του. Οφείλονται σε αστάθμητους κι ανεξέλεγκτους παράγοντες (τυχαίες διακυμάνσεις). Επενεργούν άλλοτε κατά τη μία και άλλοτε κατά την άλλη κατεύθυνση, «διασπείροντας» τις πειραματικές τιμές που καταγράφουμε «εκατέρωθεν» (δηλαδή δεξιά κι αριστερά) της πραγματικής τιμής του υπό μέτρηση φυσικού μεγέθους. Όλα τα σφάλματα που θα κληθείτε να προσδιορίσετε ποσοτικά, κατά την εξάσκησή σας στα Εργαστήρια Φυσικής, θα είναι πάντοτε τυχαία. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα τυχαίου σφάλματος αποτελούν οι παρατηρούμενες μικροδιαφοροποιήσεις στην καταγραφή του χρόνου πραγματοποίησης ενός φαινομένου.

8.2.3.5 Συστηματικά Σφάλματα:

Τα συστηματικά σφάλματα εκφράζουν την πιστότητα μίας μέτρησης. Οφείλονται σε λόγους είτε (α) θεωρητικούς (χάρην απλοποίησης της θεωρητικής προσέγγισης ενός φαινομένου, αμελούμε την επίδραση κάποιου παράγοντα και ως εκ τούτου η μέτρηση μας δεν το λαμβάνει υπόψη), είτε (β) πρακτικούς (βρίσκονται «εκτός δικαιοδοσίας» του πειραματιστή και συνήθως οφείλονται σε κατασκευαστική ατέλεια του χρησιμοποιούμενου μετρητικού οργάνου).

Τα συστηματικά σφάλματα επενεργούν πάντοτε κατά την ίδια κατεύθυνση μετατοπίζοντας «συστηματικά» την καταγεγραμμένη τιμή του υπό μέτρηση μεγέθους είτε μόνιμα σε μεγαλύτερη, είτε μόνιμα σε μικρότερη ένδειξη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα διάπραξης συστηματικού σφάλματος είναι το εξής: Υποθέστε ότι επιχειρούμε τη μέτρηση ενός μήκους με ένα κανόνα (χάρακα). Κι έστω ότι βρίσκουμε το εν λόγω μήκος να έχει την τιμή των 8 μέτρων. Από τη στιγμή που πληροφορηθούμε ότι ο συγκεκριμένος χάρακας που χρησιμοποιήσαμε δεν έχει μήκος ακριβώς 1m ή 100cm, όπως νομίζαμε, αλλά λόγω κατασκευαστικών ατελειών είναι κάπως «ελαττωματικός» με συνέπεια το πραγματικό του μήκος να μην είναι 100cm, αλλά 98cm για παράδειγμα. Οπότε, το υπό μέτρηση μέγεθος (εδώ, μήκος) δεν είναι $8 \times 100\text{cm} = 8$ μέτρα, αλλά $8 \times 98\text{cm}$.

Σε αντίθεση, τα τυχαία σφάλματα σχετίζονται με την Ακρίβεια μιας μέτρησης και περιγράφονται από την επαναληψιμότητα της συγκεκριμένης μέτρησης.

8.2.3.6 Σημαντικά Ψηφία και Στρογγυλοποίηση:

Η στρογγυλοποίηση είναι η διαδικασία προσεγγιστικής αναγραφής ενός δεδομένου αριθμού με την μορφή του αμέσως ανώτερης τάξης μεγέθους «πλησιέστερου» του.

Σε μια διαδικασία στρογγυλοποίησης :

1. αν το ψηφίο που πρόκειται να απαλειφθεί είναι κάποιο από τα 1, 2, 3, 4 τότε το προηγούμενο του (ή το αριστερά ευρισκόμενο του ή το αμέσως μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερο του) διατηρείται ως έχει. Αν το ψηφίο που πρόκειται να απαλειφθεί είναι κάποιο από τα 6, 7, 8, 9 τότε το προηγούμενο του (ή το αριστερά ευρισκόμενο του, ή το αμέσως μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερο του) αυξάνεται κατά μια μονάδα.
2. αν το προς απαλοϊφή ψηφίο είναι το 5 τότε κοιτάζουμε το προηγούμενο του (ή αλλιώς το αριστερά ευρισκόμενο του, ή το αμέσως μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερο του). Αν το ψηφίο αυτό είναι περιττό, τότε το 5 απαλείφεται και το προηγούμενο του ψηφίο αυξάνεται κατά 1. Αν το εν λόγω ψηφίο είναι άρτιο τότε το 5 απαλοϊφεται κι αυτό παραμένει ως έχει.

8.2.3.7 Σημαντικά Ψηφία και Σφάλματα:

Κανόνας 1: Τα πειραματικά σφάλματα πρέπει να αναφέρονται με (ή να στρογγυλοποιούνται στο) ένα (1) σημαντικό ψηφίο

Κανόνας 2: Κατά την αναγραφή ενός πειραματικού αποτελέσματος πρέπει η μετρούμενη τιμή (ή η μέση τιμή των μετρήσεων) και το σφάλμα της να αναφέρονται με την ίδια ακρίβεια. Ουσιαστικά, αυτό που ονομάζουμε «σωστή αναγραφή πειραματικού αποτελέσματος» έγκειται στον επιτυχή συγκερασμό των εξής δύο εγχειρημάτων:

α) Αναφορά της μέτρησης (ή της μέσης τιμής των μετρήσεων) και του σφάλματος με την ίδια ακρίβεια

β) Αναφορά του σφάλματος με ένα σημαντικό ψηφίο.

8.3 Πολλαπλές Μετρήσεις:

Σε πολλές μετρήσεις είναι αδύνατον να εκτιμήσουμε το σφάλμα μόνο με βάση την ένδειξη του οργάνου. Για παράδειγμα όταν με τη βοήθεια χρονομέτρου μετράμε το χρόνο ανάμεσα σε δύο γεγονότα το σφάλμα μας οφείλεται (αν εξαιρέσουμε διάφορους άλλους παράγοντες) κύρια στην αντίδραση του χειριστή του χρονομέτρου, γιατί είναι σχεδόν αδύνατο να θεωρήσουμε ότι πάντα βάζει σε λειτουργία το χρονόμετρο "ταυτόχρονα" με το πρώτο γεγονός και το σταματάει "ταυτόχρονα" με το δεύτερο. Σ' αυτή την περίπτωση επαναλαμβάνουμε τη μέτρηση μερικές φορές και έτσι μπορούμε να βρούμε καλύτερα και την τιμή που είναι κοντά στην πραγματική, αλλά και το σφάλμα.

8.3.1 Μέσος Όρος μιας Σειράς Μετρήσεων:

Οι τιμές που προκύπτουν από την επανάληψη της μέτρησης μιας ποσότητας προσεγγίζουν μια κεντρική τιμή. Έστω λοιπόν ότι μετράμε την ίδια ποσότητα N φορές και βρίσκουμε τις τιμές x_1, x_2, \dots, x_N . Τότε σύμφωνα με τη θεωρία των πιθανοτήτων θεωρούμε ότι η τιμή που βρίσκεται πιο κοντά στην "πραγματική" είναι η μέση τιμή που υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\bar{x} = \langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Ο μέσος όρος είναι η πιθανότερη τιμή, με άλλα λόγια αντιπροσωπεύει την καλύτερη εκτίμηση της αληθινής τιμής. Εάν οι αριθμοί x_1, x_2, \dots, x_n επαναλαμβάνονται μέσα σε σύνολο τιμών f_1, f_2, \dots, f_n φορές αντίστοιχα, τότε λεμμέ ότι η συχνότητα επανάληψης της τιμής x_1 είναι f_1 , της τιμής x_2 είναι f_2 κ.λ.π. Στην περίπτωση αυτή έχουμε

$$\bar{x} = \langle x \rangle = \frac{f_1 \cdot x_1 + f_2 \cdot x_2 + \dots + f_n \cdot x_n}{\sum_{k=1}^n f_k = N} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n f_k x_k$$

όπου $f_k \geq 1$.

Σε ένα σύνολο τιμών x_i ($i=1, N$) μιας μέτρησης ορίζουμε σαν απόκλιση μιας τιμής x_i από το μέσο όρο το μέγεθος

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}$$

Μια από της βασικές ιδιότητες της αριθμητικής μέσης τιμής είναι ότι το άθροισμα των αποκλίσεων των όρων του συνόλου των τιμών από αυτή είναι μηδέν, δηλαδή

$$\sum_{i=1}^N \Delta x_i = 0$$

Αυτό μπορούμε να το αποδείξουμε εύκολα

$$\sum_{i=1}^N \Delta x_i = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) = \sum_{i=1}^N x_i - N\bar{x} = \sum_{i=1}^N x_i - N \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} = \sum_{i=1}^N x_i - \sum_{i=1}^N x_i = 0$$

Επίσης για το ίδιο σύνολο τιμών x_i ($i=1, N$) ορίζουμε σαν μέση απόκλιση $\bar{\Delta x}$, το πηλίκο του αθροίσματος των αποκλίσεων κάθε τιμής x_i κατά απόλυτο τιμή από τη μέση τιμή \bar{x} δια του συνολικού αριθμού των διαφορών N , δηλαδή

$$\bar{\Delta x} = \frac{\sum_{i=1}^N |\Delta x_i|}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}|}{N} = \frac{|x_1 - \bar{x}| + |x_2 - \bar{x}| + \dots + |x_N - \bar{x}|}{N}$$

Εάν η κατανομή των τιμών x_i ($i=1, N$) δίνεται από μια συνεχή καμπύλη που έστω ότι παριστάνεται με τη συνάρτηση $f(x)$, τότε το $\bar{\Delta}x$ ορίζεται στο ολοκλήρωμα

$$\bar{\Delta}x = \int |x_i - \bar{x}| f(x) dx$$

8.3.2 Μέσο Σφάλμα ή Τυπική Απόκλιση της μιας Μέτρησης:

Εάν έχουμε ένα σύνολο τιμών x_i ($i=1, N$) ενός μεγέθους τότε η απόκλιση μιας τιμής x_i από την αληθινή τιμή a του μεγέθους είναι το σφάλμα της τιμής αυτής και παριστάνεται με

$$\varepsilon_i = x_i - a$$

Το σφάλμα αυτό μπορεί να είναι είτε θετικό είτε αρνητικό με ίση πιθανότητα ώστε το άθροισμα των σφαλμάτων ενός πολύ μεγάλου αριθμού N παρατηρήσεων να είναι ίσο με το μηδέν, δηλαδή

$$\sum_{i=1}^N \varepsilon_i = 0$$

Στην πράξη όταν μιλάμε πολύ μεγάλο αριθμό παρατηρήσεων συνήθως εννοούμε $N > 30$.

Για τον υπολογισμό του μέσου σφάλματος (ή της τυπικής απόκλισης) μιας παρατήρησης σε ένα σύνολο N παρατηρήσεων χρησιμοποιούμε το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων, γιατί δίνει το καλύτερο μέτρο για το χαρακτηρισμό της ακριβείας (αρχή ελαχίστων τετραγώνων του Legendre).

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2}{N} = \frac{1}{N} [\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \dots + \varepsilon_N^2]$$

Όταν ο αριθμός των παρατηρήσεων N είναι πολύ μεγάλος τότε η τυπική απόκλιση μιας παρατήρησης δίνεται από την έκφραση

$$s = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2}{N}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \alpha)^2}{N}}$$

Επειδή όμως στην πράξη, η αληθινή τιμή δεν μας είναι γνωστή, αντί αυτής χρησιμοποιούμε το μέσο όρο \bar{x} και αντί της απόκλισης ε_i χρησιμοποιούμε την Δx_i , όπως ορίσαμε και παραπάνω

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}$$

Όπως θα αποδειχθεί στην περιγραφή της κατανομής Gauss, εάν ο αριθμός των παρατηρήσεων γίνει πολύ μεγάλος, δηλαδή $N \rightarrow \infty$ τότε $\bar{x} \rightarrow a$, στη περίπτωση αυτή μπορούμε να γράψουμε

$$\sum_{i=1}^N (x_i - a)^2 = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

Έτσι για πολύ μεγάλο αριθμό παρατηρήσεων η τυπική απόκλιση της μιας παρατήρησης δίνεται από τη σχέση

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta x_i)^2}{N}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

Για σχετικά μικρό αριθμό παρατηρήσεων, $N < 30$, το μέσο σφάλμα ή η τυπική απόκλιση της μιας μέτρησης είναι

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta x_i)^2}{N-1}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$$

8.3.3 Σφάλμα ή Τυπική Απόκλιση του Μέσου Όρου:

Στην προηγούμενη παράγραφο βρήκαμε την τυπική απόκλιση σ μιας μόνο παρατήρησης. Σε ένα πείραμα όμως δεν ενδιαφέρει το σφάλμα μιας μόνο παρατήρησης αλλά το σφάλμα της μέσης τιμής ενός συνόλου N παρατηρήσεων. Στην πλειοψηφία των πειραμάτων οι μετρήσεις είναι σχετικά λίγες, $N < 30$.

Αν x_i είναι η τιμή μιας και μόνο παρατήρησης σε ένα σύνολο τιμών, που υπακούει σε κανονική κατανομή, με αληθινή τιμή α και τυπική απόκλιση σ_x , τότε ο μέσος όρος \bar{x} που υπολογίζεται από N μετρήσεις ακολουθεί επίσης κανονική κατανομή με την ίδια αληθινή τιμή και τυπική απόκλιση

$$\delta\bar{x} = \sigma(\bar{x}) = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}}$$

όπου σ_x είναι η τυπική απόκλιση μιας παρατήρησης και $\sigma(\bar{x})$ η τυπική απόκλιση του μέσου όρου. Το ίδιο ισχύει και για μικρότερο αριθμό μετρήσεων $N < 30$. Συμβολίζουμε το απόλυτο σφάλμα της μέσης τιμής με το μικρό ελληνικό γράμμα «δ» για να συμμορφωνόμαστε με τα διεθνώς κείμενα και ισχύοντα.

Παρατηρούμε ότι το απόλυτο σφάλμα της μέσης τιμής δεν είναι τίποτε άλλο από αυτό που είχαμε ορίσει στην προηγούμενη παράγραφο ως «τυπική απόκλιση της μέσης τιμής». Σημειώνουμε ότι το δx έχει τις ίδιες διαστάσεις (δηλαδή μετρείται στις ίδιες μονάδες) με τη μέση τιμή του μετρούμενου μεγέθους και αυτό είναι κάτι το οποίο δεν πρέπει να αμελούμε ποτέ να επισημαίνουμε, κατά την αναφορά των αποτελεσμάτων μας. Η τυπική απόκλιση σ_x μιας μόνο παρατήρησης σε ένα σύνολο σχετικά μικρού αριθμού παρατηρήσεων όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι

$$\sigma_x = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$$

Αν αντικαταστήσουμε την τιμή αυτή της σ_x στη σχέση $\sigma(\bar{x}) = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}}$ προκύπτει η

$$\sigma(\bar{x}) = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)}}$$

Η παραπάνω σχέση δίνει το σφάλμα ή την τυπική απόκλιση του μέσου όρου \bar{x} ενός συνόλου N παρατηρήσεων που έγιναν για τη μέτρηση του μεγέθους. Δηλαδή, για να βρούμε το σχετικό σφάλμα ενός μεγέθους, διαιρούμε απλά το απόλυτο σφάλμα με τη μέση τιμή. Σημειώνουμε τα εξής ευνόητα:

(α) Οι δύο εκφράσεις των σφαλμάτων είναι πολύ συγγενείς και αλληλένδετες μεταξύ τους. Από τη στιγμή που γνωρίζουμε το ένα απ' αυτά, μπορούμε να υπολογίσουμε και το άλλο (αρκεί να ξέρουμε τη μέση τιμή) και σε τελική ανάλυση νομιμοποιούμαστε να ισχυριστούμε ότι το σχετικό σφάλμα δεν είναι τίποτε άλλο παρ' εκτός η αναφορά του απόλυτου σφάλματος υπό τη μορφή ποσοστού

(β) Επειδή ακριβώς το σχετικό σφάλμα $r = \frac{\sigma(\bar{x})}{\bar{x}}$ εκφράζεται ως ποσοστό,

δηλαδή λόγος δύο ομοειδών μεγεθών, γι' αυτό είναι και αδιάστατο (είναι όπως λέμε ένας καθαρός αριθμός ή δεν έχει μονάδες μέτρησης). Θα δούμε στη συνέχεια της παρούσας παραγράφου τί σκοπούς εξυπηρετεί αυτό και σε τί πλεονεκτεί η αναφορά του σχετικού σφάλματος σε σχέση με την αναφορά του απόλυτου σφάλματος. Επίσης, θα δούμε τι επιπτώσεις έχει στον τρόπο αναγραφής των αποτελεσμάτων το γεγονός ότι το σχετικό σφάλμα είναι αδιάστατο.

(γ) Συνηθέστατα, το σχετικό σφάλμα αναφέρεται και ως ποσοστό επί τοις εκατό.

Συνεπώς η τιμή του μετρούμενου μεγέθους κυμαίνεται στα όρια

$$x = \bar{x} \pm \sigma(\bar{x})$$

Βασικοί κανόνες που πρέπει να τηρούνται στη γραφή του αποτελέσματος είναι οι ακόλουθοι:

- Δεν πρέπει να γράφεται η μέση τιμή \bar{x} με περισσότερα από ένα σημαντικά ψηφία όσα έχει μια από τις τιμές του συνόλου.
- Να μην γράφεται το τυπικό σφάλμα με περισσότερα από ένα σημαντικά ψηφία.
- Δεν πρέπει να γράφεται η μέση τιμή \bar{x} με περισσότερα ψηφία από το πρώτο σημαντικό ψηφίο του τυπικού σφάλματος $\sigma(\bar{x})$.
- Η ελάχιστη μονάδα (υποδιαίρεση) που μπορούμε να διαβάσουμε στην κλίμακα ενός οργάνου δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη του διπλάσιου του τυπικού σφάλματος των μετρήσεων.

Πάντως, εκείνο που κρατούμε ως κανόνα είναι το εξής: Στο τέλος κάθε πειράματος, μετά τη λήψη μετρήσεων και την επεξεργασία των τιμών, αναφέρουμε πάντα τη μέση τιμή με τα σφάλματα της (και το απόλυτο και το σχετικό).

8.4 Ολικό Σφάλμα Σύνθετης Μέτρησης:

Γενικά, υπάρχουν δύο τρόποι για να βρίσκουμε το πώς « διαδίδονται » τα σφάλματα των άμεσα μετρούμενων μεγεθών, που υπεισέρχονται ως μεταβλητές στην εξίσωση υπολογισμού του τελικά ζητούμενου μεγέθους.

Ο πρώτος (και ο απλούστερος) είναι να προσθέτουμε απλά τα επί μέρους σχετικά σφάλματα. Το μειονέκτημα αυτού του τρόπου είναι ότι «υπερεκτιμά» τα επί μέρους σφάλματα, δηλαδή τα λαμβάνει όλα υπόψη εξ ίσου, ανεξάρτητα από το αν είναι μεγάλα ή μικρά και μη εξετάζοντας το πόσο συμβάλλουν στο τελικό σφάλμα. Συνήθως, το σφάλμα μιας επί μέρους εμπλεκόμενης μεταβλητής είναι ανεξάρτητο από τα σφάλματα των άλλων μεταβλητών και στο τέλος κάποια από αυτά καταλήγουν να είναι αμελητέα σε σχέση με τα υπόλοιπα.

Ο δεύτερος τρόπος είναι σωστότερος, πλέον ενδεδειγμένος και (τέλος πάντων) είναι αυτός που πρέπει να χρησιμοποιείτε. Το σωστό λοιπόν τρόπο χειρισμού των διαδιδόμενων σφαλμάτων το δανειζόμαστε από ένα μαθηματικό πρόβλημα αποκαλείται «πρόβλημα του τυχαίου δρόμου». Το πρόβλημα του τυχαίου δρόμου μας παρέχει μία πολύ εκλεπτυσμένη και κομψή μαθηματική έκφραση για να υπολογίζουμε το σφάλμα συναρτήσεων πολλών μεταβλητών σ' ένα πειραματικό εγχείρημα. Για να είμαστε σε θέση να το κατανοήσουμε πλήρως, χρειαζόμαστε κάτι ακόμα! Πρέπει (για μία φορά ακόμη) να προστρέξουμε στο οπλοστάσιο των μαθηματικών μας, για να εφοδιαστούμε με ένα νέο μαθηματικό εργαλείο: την μερική παράγωγο. Σ' αυτό το σημείο ως ανοίξουμε μία μεγάλη παρένθεση για μερικές απλές και σύντομες –το υποσχόμαστε- αμμίγεις γνώσεις μαθηματικών: Εστω λοιπόν μία συνάρτηση τριών (3) μεταβλητών $f = f(x, y, z)$, τότε γράφουμε

$$\frac{\partial f}{\partial x}$$

διαβάζουμε «μερική παράγωγος της f ως προς x » κι εννοούμε ότι $\frac{\partial f}{\partial x}$ είναι το αποτέλεσμα της παραγωγίσης της f ως προς τη μεταβλητή x (όπως ακριβώς ξέραμε μέχρι τώρα, σαν η f να εξαρτιόταν μόνο από τη μεταβλητή x), συμπεριφερόμενοι στα y και z σαν να ήταν σταθερές. Δηλαδή, αν μας δώσουν την $f = f(x, y, z) = 8x^5 yz^3$ και μας ζητήσουν να υπολογίσουμε τις μερικές της παραγώγους, αυτές θα είναι:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = 40x^4 yz^3, \quad \frac{\partial f}{\partial y} = 8x^5 z^3 \quad \text{και} \quad \frac{\partial f}{\partial z} = 8x^5 y3z^2$$

Ο γενικός κανόνας υπολογισμού του σφάλματος δf , στην περίπτωση που η f είναι συνάρτηση πολλών μεταβλητών, $f = f(x, y, \dots, z)$ και με την προϋπόθεση ότι τα σφάλματα των x, y, \dots, z είναι τυχαία κι ανεξάρτητα μεταξύ τους δίνεται από τη σχέση:

$$\delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \delta y\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \delta z\right)^2}$$

Περιφραστικά, η εξίσωση που μόλις γράψαμε «εισηγείται» ότι το σφάλμα μιας συνάρτησης πολλών μεταβλητών ισούται με τη τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των επί μέρους σφαλμάτων όλων των ανεξάρτητων μεταβλητών, σταθμισμένων με την επίδρασή τους πάνω στην f .

Βιβλιογραφία:

- [1] (Α. Αραβαντινός - Μ. Γιαννούρη - Μ. Πετράκη) Ήχος: Φαινόμενο Doppler Δημιουργία-Μελέτη Διακροτήματος
- [2] (Μιχαήλ Ν. Πέτσιος) Ιχνηλασία πολυστατικού συστήματος ραντάρ ανίχνευσης ιπτάμενων οχημάτων
- [3] (ΘΕΟΔΩΡΟΥ ΖΕΡΒΟΥ) ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΤΕΡΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ
- [4] (Άννυ Λουίζη) Επίδραση της μη ιονίζουσας ηλιακής ακτινοβολίας: Είδη ακτινοβολιών
- [5] (Σταυρούλα Δάφνη, Γεώργιος Ρουμελίωτης, Βασίλειος Κεκάτος, Κωνσταντίνος Μπερμπερίδης) Συστήματα μετάδοσης πληροφορίας
- [6] (Γιώργος Τουρούτογλου) Απλή Εξομοίωση Οθόνης Ραντάρ
- [7] (Λ. Περιβαλαρόπουλος) Εξισώσεις Maxwell
- [8] (Ανδρέας Ιωάννου) Το φαινόμενο Doppler και η διδασκαλία του
- [9] (Μαρία Λύρα Γεωργοσοπούλου) Έγχρωμη απεικόνιση Doppler

