



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μελέτη Παλμικού Ραντάρ Για Απεικόνιση Του Υπεδάφους

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Κ. Παπαντώνης

Επιβλέπων : Νικόλαος Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Φεβρουάριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μελέτη Παλμικού Ραντάρ Για Απεικόνιση Του Υπεδάφους

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Κ. Παπαντώνης

Επιβλέπων : Νικόλαος Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τη 2^η Φεβρουαρίου 2011

.....
Ν. Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Δ. Κακλαμάνη
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

.....
Π. Φράγκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Φεβρουάριος 2011

.....

Δημήτριος Κ. Παπαντώνης

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

Copyright © Δημήτριος Κ. Παπαντώνης, 2011

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την απεικόνιση μιας περιοχής του χώρου με βάση της ηλεκτρομαγνητικές της ιδιότητες. Με τη χρήση ενός ειδικά κατασκευασμένου ραντάρ γίνεται η καταγραφή του ανακλώμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος από μια περιοχή μελέτης. Στη συνέχεια με επεξεργασία των μετρήσεων αυτών επιδιώκεται η τρισδιάστατη απεικόνιση της περιοχής αυτής στον υπολογιστή. Η μελέτη των σημάτων γίνεται στο πεδίο του χρόνου και η επεξεργασία των μετρήσεων με τη χρήση matlab και την εφαρμογή εξειδικευμένου για το project αλγορίθμου που θα περιγραφεί αναλυτικά στη συνέχεια. Το ραντάρ κατασκευάστηκε στα εργαστήρια του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με επιβλέποντα καθηγητή τον κύριο Ουζούνογλου στα πλαίσια διδακτορικής εργασίας. Οι μελέτες που πραγματοποιήθηκαν ξεκίνησαν με εφαρμογή της μεθόδου στον αέρα για να καταλήξουμε στο πολύ δυσκολότερο περιβάλλον του υπεδάφους και την ανίχνευση θαμμένων αντικειμένων.

Στο σύγγραμμα, κατ' αρχήν γίνεται μια γενική παρουσίαση των μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί για την ανίχνευση θαμμένων αντικειμένων με επικέντρωση στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους και τα ραντάρ ανίχνευσης υπεδάφους. Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε καθώς και του αλγορίθμου που εφαρμόστηκε στην επεξεργασία των δεδομένων. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν, η περιγραφή τους και οι προϋποθέσεις κάτω από τις οποίες θα μπορούσαμε να έχουμε ποιο ακριβείς μετρήσεις και κατά συνέπεια καλύτερη απεικόνιση και μεγαλύτερη ανάλυση.

Λέξεις Κλειδιά

Ραντάρ, Απεικόνιση, Θαμμένα Αντικείμενα, Υπέδαφος, GPR, Κεραία, Πομπός, Δέκτης, Διάταξη, Ανακλώμενο Σήμα, Συνέλιξη, Χαρακτηριστική Διαύλου

Abstract

The current project's main object is the imaging of an underground area based on its electromagnetic properties. With the use of a particularly constructed radar, the recording of the backscattered wave of a given area can be implemented. The target is a three dimensional imaging of this area on screen by means of processing these measurements. The signals are considered in the time domain and the processing of the measurements is done with the use of matlab and the application of a specific to the project algorithm which will be comprehensively described at following. The radar was constructed at the laboratories of National Technical University of Athens with supervisor professor Mr. Ouzounoglou within the limits of doctoral thesis. The studies begun with the application of the technique at the air to eventually reach the much more complicated environment of underground field and the detection of buried objects.

At the book, at first, a general presentation of all major methods for the detection of buried objects is laid, with focalization to the electromagnetic techniques and the use of ground penetrating radars. Afterwards, a thorough description of the used apparatus as well as of the applied algorithm for the processing of the acquired data is laid. At closing, the arisen results are presented, accompanied by their explanation and the conditions under which we could attain more precise measurements and thus more efficient imaging and higher resolution.

Key Words

Radar, Imaging, Buried Objects, Underground, GPR, Antenna, Transmitter, Receiver, Apparatus, Backscattered Wave, Channel Transfer Function

Να ευχαριστήσω εκτός από τον Κύριο Ουζούνογλου,
το Δημήτρη Οικονόμου για τη συμβολή του, καθώς και
το Σπύρο Αθανασιάδη για την άψογη συνεργασία.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	8
Περιεχόμενα Σχημάτων	10
Περιεχόμενα Εικόνων	12
Περιεχόμενα Πινάκων	13
Κεφάλαιο 1. Ανίχνευση Θαμμένων Αντικειμένων	15
1.1 Εισαγωγή.....	15
1.2 Είδη Μεθόδων Ανίχνευσης.....	15
1.3 GPR.....	16
1.3.1 Επισκόπηση	16
1.3.2 Διαδικασία Σχεδιασμού Συστήματος	18
1.3.3 Πηγές σήματος και μέθοδοι διαμόρφωσης	24
1.3.3.1 Σχεδιασμός Γεννήτριας Παλμών	26
1.3.3.2 Ραντάρ διαμόρφωσης συχνότητας συνεχούς κύματος (FMCW) και Ραντάρ βηματικής συχνότητας (Stepped-Frequency Radar).....	29
1.3.4 Κεραίες GPR.....	30
1.3.5 Τεχνικές Επεξεργασίας Σήματος.....	35
1.4 Αισθητήρες Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής – Electromagnetic Induction (EMI) Sensors	37
1.4.1 Επισκόπηση	37
1.4.2 Θεωρία Λειτουργίας.....	38
1.4.3 Απόδοση του Συστήματος.....	39
1.5 Ακουστικοί και Σεισμικοί Αισθητήρες	40
1.5.1 Επισκόπηση	40
1.5.2 Γραμμικές Ακουστικές Τεχνικές.....	41
1.5.4 Σύγχρονη Χρήση Ελαστικών και Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων.....	43
1.5.5 Αλγόριθμοι Ανίχνευσης	44
1.5.5.1 Τεχνικές Ανίχνευσης Βασισμένες σε Μοντέλα	45
1.5.5.2 Ανίχνευση Βασισμένη στο Σχήμα.....	47
1.6 Οπτικοί Ανιχνευτές	47
1.7 Άλλοι Αισθητήρες	48
Κεφάλαιο 2. Περιγραφή Διάταξης	50
Κεφάλαιο 3. Περιγραφή του Αλγορίθμου	64
Κεφάλαιο 4. Παρουσίαση των Μετρήσεων	67
Κεφάλαιο 5. Δοκιμή μιας Μεθόδου για Εξάλειψη της Διασποράς	77
Επίλογος.....	84

Παράρτημα	85
Αναφορές.....	89

Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1. Μπλοκ Διάγραμμα GPR Συστήματος.....	18
Σχήμα 2. Συμπεριφορά της Επιφάνειας Σκέδασης για Κυλινδρικά Αντικείμενα στον Αέρα	21
Σχήμα 3. Μοντέλο Διάδοσης GPR Συστήματος.....	22
Σχήμα 4. Unit Step function.....	24
Σχήμα 5. Impulse Function – Derivative of Step Function – Monopulse Signal.....	25
Σχήμα 6. Gaussian Monocycle Signal - Derivative of Step Function	25
Σχήμα 7. Διάγραμμα Γεννήτριας Monocycle Παλμών	27
Σχήμα 8. Μετρούμενη Έξοδος Monocycle Παλμού στο Πεδίο του Χρόνου	27
Σχήμα 9. Μετασχηματισμός στο Πεδίο της Συχνότητας Monocycle Παλμού	28
Σχήμα 10. Έξοδος Monocycle Παλμού Γεννήτριας Χιονοσιβάδας	28
Σχήμα 11. Συμπεριφορά στο Πεδίο της Συχνότητας Σήματος Γεννήτριας Χιονοσιβάδας .	29
Σχήμα 12. Μπλοκ Διάγραμμα Ραντάρ Σάρωσης Συχνότητας	30
Σχήμα 13. Τύποι Κεραίων GPR Μεγάλου Εύρους Ζώνης : (a) Σπείρα του Αρχιμήδη Δύο Άκρων , (b) Λογαριθμική Σπирάλ Κεραία Δύο Άκρων , (c) Κεραία "παπιγιόν" Τριγωνικών Πλακών , (d) TEM Horn Τριγωνικών Πλακών , (e) TEM Horn με Μεταλλικούς Βραχίονες (από πάνω) , (f) Γεωμετρία PDTEM Horn (από πλάγια) , (g) Σπирάλ Κεραία Μέσα σε Κυλότητα , (h) Πιάτο με Συγκεντρωτικό Συλλέκτη.....	31
Σχήμα 14. Μετρημένες στο Πεδίο της Συχνότητας S_{21} Αποκρίσεις των Δισδιάστατων Κεραίων για 60 cm Ξηρό Έδαφος : (a) Λογαριθμική Σπирάλ ($r_1=0.5\text{cm}$, $r_{2h}=5.5\text{cm}$, $r_{2v}=7.3\text{cm}$) , (b) Σπείρα του Αρχιμήδη ($r_1=0.5\text{cm}$, $r_2=8\text{cm}$) , (c) bowtie ($\alpha=60^\circ$, $d=0.5\text{cm}$, $L=7.3\text{cm}$) , (d) bowtie – κοινή πόλωση.	32
Σχήμα 15. Σχεδιάγραμμα Λόγου Στάσιμου Κύματος PDTEM Horn Κεραίας($L=10\text{cm}$, $\alpha=30^\circ$, $\theta=80^\circ$).....	33
Σχήμα 16. Κέρδη Κεραίων Μεγάλου Εύρους Ζώνης GPR συστημάτων.....	34
Σχήμα 17. Μετρούμενα Σειριακά Δεδομένα A και B Σάρωσης αντίστοιχα για Σύστημα Παλμικού GPR.	36
Σχήμα 18. Επεξεργασμένα Δεδομένα A και B Σάρωσης Παλμικού Ραντάρ.....	37
Σχήμα 19. Σύστημα Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής.....	38
Σχήμα 20. Σχηματική Αναπαράσταση των Αρχών Λειτουργίας των Πηνίων α) του Πομπού και β) του Δέκτη.....	38
Σχήμα 21. Σχέδιο Σάρωσης με Laser – Μέτρηση της Ταχύτητας των Ταλαντώσεων του Εδάφους.....	42
Σχήμα 22. Διάταξη LDV Ανιχνευτών Πάνω σε Κινούμενη Πλατφόρμα.	42
Σχήμα 23. Χρήση Ελαστικών και Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων για Ανίχνευση Αντικειμένου.	44
Σχήμα 24. Παραγόμενα Σήματα στο Πεδίο του Χρόνου από LDV Μετρήσεις Συστήματος Ακουστικής/Σεισμικής Ανίχνευσης.	44
Σχήμα 25. Παραγόμενα Σήματα στο Πεδίο της Συχνότητας από LDV Μετρήσεις Συστήματος Ακουστικής/Σεισμικής Ανίχνευσης.	45
Σχήμα 26. Δείγμα Bode Διαγράμματος της Συνάρτησης Μεταφοράς στη Σχέση (17).	46
Σχήμα 27. Εικόνα Οπτικής Ανίχνευσης Τραβηγμένη σε Διαφορετικές Ώρες της Ημέρας : (α) 8:00 πμ, (β) 2:00 μμ, (γ) 3:00 μμ.	48
Σχήμα 28. Κανονικοποιημένο Διάγραμμα Ακτινοβολίας της Κεραίας. Ο Άξονας που φαίνεται είναι ο z Μοναδιαίος Άξονας Ορθογώνιων Συντεταγμένων. Οι Μοίρες που αναγράφονται μετρούν τη Γωνία φ. Η θ ξεκινά να μετρά από τον Άξονα z και προς τα κάτω.....	56
Σχήμα 29. Διάγραμμα Πλάτους του Συντελεστή Ανάκλασης της Κεραίας.	56

Σχήμα 30. Χαρακτηριστικές του Κέρδους, της Κατευθυντικότητας, του Λόγου Στάσιμου Κύματος, της Ισχύος Εξόδου για 1 dB Συμπίεση και της Φασματικής Ισχύος του Θορύβου.	59
Σχήμα 31. Η συνδεσμολογία της διάταξης. Με μωβ συμβολίζονται τα καλώδια SMA, με κόκκινο τα USB και με σκούρο κόκκινο τα PCMCIA.....	63
Σχήμα 32. Ο Παλμός που Δημιουργεί η Γεννήτρια – PRF = 85 nsec.	67
Σχήμα 33. Ο Παλμός της Γεννήτριας – 4.5 V Πλάτος, 1 nsec Διάρκεια.....	67
Σχήμα 34. Συνδεσμολογία Μέτρησης με τις Κεραίες Πρόσωπο με Πρόσωπο.....	68
Σχήμα 35. Σήμα Λήψης δύο Κεραίων Πρόσωπο με Πρόσωπο.....	68
Σχήμα 36. Συνδεσμολογία Μέτρησης του Ανακλώμενου Σήματος από δύο Κεραίες.....	68
Σχήμα 37. Σήμα από Ανάκλαση με τον Σωλήνα στα 60 εκατοστά.....	69
Σχήμα 38. Σήμα από Ανάκλαση με τον Σωλήνα στα 30 εκατοστά.....	69
Σχήμα 39. Ανακλώμενο από το Σωλήνα Σήμα σε Περιβάλλον χωρίς Ανακλάσεις.....	70
Σχήμα 40. Ανακλώμενο από το Σωλήνα Σήμα σε Περιβάλλον με Παρεμβολές.....	70
Σχήμα 41. TEM Horns face to face. Σύγκριση με σχήμα 48.....	70
Σχήμα 42. Οι ανακλάσεις στο Κύκλωμα του Πομπού.....	71
Σχήμα 43. Εξάλειψη των Ανακλάσεων από τους Εξασθενητές.....	72
Σχήμα 44. Πλάτος Μετασχηματισμού Fourier του Παλμού της Γεννήτριας.....	72
Σχήμα 45. Πλάτος Μετασχηματισμού Fourier του Σήματος Λήψης.....	73
Σχήμα 46. Τυχαίο Δείγμα Μέτρησης από μια Κεραία της Διάταξης με Κενό Φόντο.....	74
Σχήμα 47. Δείγμα Μέτρησης με Μεταλλική Πλάκα σε Απόσταση 20 εκατοστών.....	74
Σχήμα 48. Σύγκριση δειγμάτων με το Μέσο Όρο της Μέτρησης.....	75
Σχήμα 49. Απεικόνιση με τη μία Μεταβλητή Σταθερή.....	75
Σχήμα 50. Τρισδιάστατη Απεικόνιση.....	76
Σχήμα 51. Είσοδος και Έξοδος στο Δίαυλο των δύο Κεραίων.....	77
Σχήμα 52. Είσοδος και Έξοδος στο Δίαυλο των δύο Κεραίων-άξονας t, 32017 σημείων. ..	78
Σχήμα 53. Η $H(j\omega)$ σε Φάσμα που Εκτείνεται ως τα 2.33 GHz, μετά Κόβεται αφού είναι εκτός Εύρους Συχνοτήτων του Κύριου Σήματος.....	78
Σχήμα 54. Χαρακτηριστική του Διαύλου $h(t)$ για το Διάστημα των 100 nsec. Αποτελεί το Πραγματικό Μέρος του $F^{-1}\{ H(j\omega) \}$	79
Σχήμα 55. Η Συνάρτηση $h(t)$ που Υπολογίσαμε Πράγματι Περιγράφει το Δίαυλο.....	79
Σχήμα 56. Η $h^{-1}(t)$ για το Διάστημα των 100 nsec.....	80
Σχήμα 57. Συνέλιξη του Σήματος Εξόδου του Διαύλου με την Αντίστροφη της Χαρακτηριστικής του Διαύλου για να Προκύψει και πάλι ο Παλμός της Γεννήτριας.....	80
Σχήμα 58. Σήμα από Ανάκλαση σύμφωνα με το Σχήμα 49 – απόσταση 55 cm.....	81
Σχήμα 59. Συνέλιξη του Σήματος του Σχήματος 72 με την $h^{-1}(t)$	81
Σχήμα 60. Φάσμα του $\gamma(t)$	82
Σχήμα 61. $Y(j\omega)/H(j\omega)$	82
Σχήμα 62. $F^{-1}\{ Y(j\omega) / H(j\omega) \}$	83

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1. Η Διάταξη στο Χώρο των Μετρήσεων.....	50
Εικόνα 2. Οι θέσεις και η Αρίθμηση των Κεραιών.	51
Εικόνα 3. Ο Διαχωριστής με τους Εξασθενητές σε Μεγέθυνση.....	51
Εικόνα 4. Η Γεννήτρια και ο Παραγόμενος Παλμός στο Πεδίο του Χρόνου.	52
Εικόνα 5. Στην εικόνα φαίνονται οι επιλογές στην πρόσοψη της γεννήτριας. ON/OFF και ένδειξη λειτουργίας, τρεις κέρσορες για τη ρύθμιση του PRF (pulse repetition frequency), delay για ρύθμιση της σχετικής καθυστέρησης μεταξύ της αναφοράς του trigger και της κύριας εξόδου (η καθυστέρηση κυμαίνεται στην περιοχή 0-100nsec), είσοδος για εξωτερικό trigger (η επιλογή πρέπει να βρίσκεται στο EXT), synchronization – έξοδος του trigger, AM και PM (amplitude και pulse width)- ρύθμιση του πλάτους και της διάρκειας του παλμού εξόδου και τέλος OUT - έξοδος του παραγόμενου σήματος.	54
Εικόνα 6. Τροφοδοσία και επιπλέον επιλογές της γεννήτριας (OS – DC offset, Ground – γείωση και M δεύτερη έξοδος του σήματος της γεννήτριας εξασθενημένη κατά 20 dB). .	54
Εικόνα 7. Η Κεραία Εκπομπής.	55
Εικόνα 8. Ο πολυπλέκτης.	57
Εικόνα 9. Ενισχυτής.	58
Εικόνα 10. Το τροφοδοτικό.	59
Εικόνα 11. Η Κάρτα Δειγματοληψίας.....	60
Εικόνα 12. Το πλαίσιο PCI με την κάρτα δειγματοληψίας.	60
Εικόνα 13. Το λογισμικό ελέγχου IC3 digitizer- NEW με τα συνοδευτικά προγράμματα που φαίνονται στη λίστα.	61
Εικόνα 14. Το interface του προγράμματος όπου ρυθμίζουμε τον αριθμό των δειγμάτων στο πεδίο του χρόνου, των αριθμό επανάληψης κάθε μέτρησης, την καθυστέρηση έναρξης των μετρήσεων σε σχέση με το trigger, την περίοδο δειγματοληψίας και το επίπεδο της ενίσχυσης με μέγιστη τιμή τα 5 V.	62
Εικόνα 15. Ο Combiner ZFSC-2-2500 της Mini Circuits που Χρησιμοποιήθηκε στο Πείραμα.	71

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1. Τύποι Cross Section (RCS) για βασικές γεωμετρίες στόχων	20
Πίνακας 2. Απώλειες Διάδοσης στα 100 MHz και στο 1 GHz για Διαφορετικούς Τύπους Εδάφους.....	23
Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά Γεννήτριας :	53
Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά Κεραίας Εκπομπής :	55
Πίνακας 5. Χαρακτηριστικά Διάταξης του Δέκτη :	57
Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά Ενισχυτή :	58

Κεφάλαιο 1. Ανίχνευση Θαμμένων Αντικειμένων

1.1 Εισαγωγή

Η ανίχνευση του υπεδάφους και η αναγνώριση γεωλογικών και συνθετικών (κατασκευασμένων από τον άνθρωπο) δομών είναι επί του παρόντος μία σημαντική περιοχή έρευνας και μια αναπτυσσόμενη τεχνολογική ιδέα σε παγκόσμια κλίμακα. Το πεδίο του προβλήματος είναι πολύ σύνθετο και οι πτυχές του θέματος εξαρτώνται από ευρέως φάσματος απαιτήσεις από στρατιωτικές μέχρι εμπορικές ανάγκες. Η ποικιλία των άγνωστων λανθασμένων και μη επιθυμητών στόχων του υπεδάφους περιπλέκει το ζήτημα του εντοπισμού. Επιπλέον, το μέσο μετάδοσης είναι συνήθως μη ομογενές και με απώλειες. Το μέγεθος, η γεωμετρία, η σύσταση (διηλεκτρικό, μέταλλο, εκρηκτικό υλικό κτλ) και το βάθος των στόχων, καθώς και τα χαρακτηριστικά του μέσου (υγρό έδαφος, αμμώδες κτλ) είναι βασικές παράμετροι του σχεδιασμού. Μέχρι τώρα δεν υπάρχει δυστυχώς μια μόνη μέθοδος και ένα ενιαίο σύστημα που να ανιχνεύει όλα τα είδη των αντικειμένων τυχαίου μεγέθους, σχήματος, βάθους κτλ. Επομένως ένας αριθμός διαφορετικών τεχνολογιών χρησιμοποιείται ανάλογα τη συγκεκριμένη περίπτωση. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να έχουν κοινές, παρόμοιες ή και εντελώς διαφορετικές δυνατότητες ανίχνευσης.

Αυτό το κείμενο είναι μια εισαγωγή στην ανίχνευση θαμμένων αντικειμένων και μια προσπάθεια σύνθεσης και παρουσίασης των διαθέσιμων μεθόδων στους αναγνώστες που πιθανόν ασχολούνται με τη φυσική, γεωφυσική, αρχαιολογία, ηλεκτρολογία ανεξαρτήτως του μορφωτικού ή ακαδημαϊκού τους επιπέδου. Εξετάζονται διαφορετικές τεχνολογίες και συστήματα ραντάρ με ηλεκτρομαγνητικές, ακουστικές, υπερύθρων και χημικές μεθόδους όσον αφορά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους όπως επίσης και τις αρχές λειτουργίας, τους περιορισμούς και τις δυνατότητές τους. Επιπλέον συζητούνται κάποιες ευέλικτες προσεγγίσεις που αφορούν σε ευρέως φάσματος εφαρμογές ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση σε κάθε συγκεκριμένη περίπτωση.

1.2 Είδη Μεθόδων Ανίχνευσης

Οι κύριες αισθητήριες διατάξεις για ανίχνευση θαμμένων αντικειμένων βασίζονται σε ηλεκτρομαγνητικές, ακουστικές, σεισμικές και οπτικές τεχνολογίες. Οι ηλεκτρομαγνητικές διατάξεις χωρίζονται σε δύο ομάδες : ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (electromagnetic induction EMI) και ραντάρ διείσδυσης υπεδάφους (ground penetrating radar GPR). Η μέθοδος EMI ή αναγνώριση μετάλλου χρησιμοποιεί χαμηλής συχνότητας ηλεκτρομαγνητικό πεδίο για να επάγει διννορεύματα στα μεταλλικά μέρη των θαμμένων αντικειμένων. Είναι μια ώριμη, δημοφιλής και σχετικά φθηνή τεχνολογία που εφαρμόζεται σε ευρύ τύπο περιβαλλοντικών συνθηκών για ανίχνευση αγώγιμων στόχων. Ο κύριος περιορισμός της μεθόδου EMI είναι τα πιθανά περιττά ή ανεπιθύμητα μεταλλικά αντικείμενα που είναι διασκορπισμένα στο έδαφος, ειδικά για στόχους χαμηλής αγωγιμότητας ή μικρής περιεκτικότητας σε μέταλλο. Ο GPR είναι ένας άλλος ευρέως χρησιμοποιούμενος και εδραιωμένος τύπος αισθητήριας ηλεκτρομαγνητικής διάταξης. Η κύρια αρχή λειτουργίας είναι η ανάκλαση και η σκέδαση προς την πηγή του ραδιοκύματος RF από θαμμένα μεταλλικά ή διηλεκτρικά αντικείμενα. Η GPR ανιχνεύει όλες τις ανωμαλίες κάτω από το έδαφος, ακόμα και τις μη μεταλλικές. Το κυριότερο πρόβλημα είναι τα ανεπιθύμητα διάσπαρτα αντικείμενα στο υπεδάφος και οι θαμμένοι στόχοι που έχουν παραμέτρους

σύστασης παρόμοιες με αυτές του εδάφους. Οι ακουστικές και σεισμικές μέθοδοι εκμεταλλεύονται το ηχητικό και σεισμικό κύμα από ανάκλαση από τους στόχους. Αν και αυτές δεν είναι απολύτως εδραιωμένες τεχνολογίες, τέτοια συστήματα έχουν χαμηλό ρυθμό λανθασμένου συναγερμού. Παρόλα αυτά το μεγάλο βάθος, οι ανώμαλες επιφάνειες, οι επιφάνειες καλυμμένες με νερό ή βλάστηση ή το παγωμένο έδαφος παρουσιάζουν σημαντικές δυσκολίες στην ανίχνευση. Οι οπτικές μέθοδοι χρησιμοποιούν το υπέρυθρο και υπερφασματικές ζώνες για να ξεχωρίσουν το στόχο από διαφορές στη θερμοκρασία και την ανακλαστικότητα του φωτός. Εάν η χωρητικότητα της απορροφώμενης θερμικής ενέργειας του αντικειμένου είναι πολύ διαφορετική από αυτή του εδάφους, η επίδοση της μεθόδου είναι πολύ ικανοποιητική. Οι ανιχνευτές υπέρυθρων μπορούν γρήγορα να σκανάρουν μεγάλες περιοχές από μεγάλα ύψη. Όμως αυτή δεν είναι η κατάλληλη μέθοδος για βαθιά θαμμένα αντικείμενα.

Εκτός από τις κύριες τεχνολογίες που αναφέρθηκαν παραπάνω μερικά πρόσθετα συστήματα ανίχνευσης μπορούν να εξεταστούν για βελτίωση της απόδοσης των κύριων συστημάτων ή για εξειδικευμένες εφαρμογές όπως ανίχνευση εκρηκτικών υλών. Για παράδειγμα, η μικροκυματική τομογραφία του υπεδάφους χρησιμοποιεί αρχές παρόμοιες με αυτές του GPR και πετυχαίνει υψηλής ανάλυσης απεικόνιση των ρηχά θαμμένων αντικειμένων. Η τομογραφία ηλεκτρικής σύνθετης αντίστασης προσδιορίζει την κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας της επιφάνειας. Ο αισθητήρας ακτίνων Χ απεικονίζει τα θαμμένα αντικείμενα με ακτινοβολία ακτίνων Χ. Τέλος, συστήματα βασισμένα σε μεθόδους ηλεκτρομαγνητικές, πιεζοηλεκτρικές, βιολογικές και πυρηνικής φυσικής έχουν αποδειχθεί χρήσιμες για ανίχνευση εκρηκτικής αέριας ύλης. Λεπτομερής συζήτηση όλων αυτών των τύπων παρουσιάζεται στις επόμενες ενότητες.

1.3 GPR

1.3.1 Επισκόπηση

Οι όροι διείσδυση εδάφους (ground probing), ανίχνευση υπεδάφους (subsurface detecting) και διείσδυση επιφανείας (surface penetrating) αναφέρονται σε μια ευρεία κλίμακα ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων για ανίχνευση και αναγνώριση θαμμένων αντικειμένων ή δομών κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, υπό το γενικό όρο ραντάρ διείσδυσης εδάφους (ground penetrating radar-GPR). Η μέθοδος GPR χρησιμοποιεί τη μετάδοση και τη σκέδαση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για να εντοπίσει, να εξακριβώσει ποσοτικά και να απεικονίσει τις μεταβολές κάτω από το έδαφος όσον αφορά στις ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες. Μπορεί να εκτελεστεί από την επιφάνεια της γης με όχημα ή από αέρος και έχει μεγάλη ακρίβεια στην απεικόνιση του υπεδάφους ανάλογη με αυτή των γεωφυσικών μεθόδων, προσεγγίζοντας την ακρίβεια εκατοστού κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες. Εφόσον η GPR αντιλαμβάνεται τις ηλεκτρικές ανομοιογένειες του υπεδάφους, η επίδοση της ανίχνευσης των χαρακτηριστικών του υπεδάφους όπως το βάθος, ο προσανατολισμός, η υγρασία, το μέγεθος και το σχήμα συνδέονται άμεσα με τις ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες. Η απόδοση μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω με την ερμηνεία αυτών των ποσοτικών χαρακτηριστικών μέσω της μοντελοποίησης. Η τεχνολογία GPR είναι κατά πολύ προσανατολισμένη στις εφαρμογές. Η υλοποίηση του υλικού και του λογισμικού καθορίζει και τα χαρακτηριστικά της επίδοσης όλου του συστήματος. Η κλίμακα ανίχνευσης ποικίλει από μερικά εκατοστά έως δεκάδες μέτρα. Μπορούν να ανιχνευθούν μεταλλικές ή διηλεκτρικές δομές. Αναγνώριση μικρών αντικειμένων ακόμη και με ακρίβεια εκατοστού είναι δυνατή. Οποιοδήποτε μεταλλικό αντικείμενο και διηλεκτρική ασυνέχεια μπορεί να αναγνωριστεί από τη μέθοδο GPR. Ο στόχος μπορεί να είναι ένα μακρύ, λεπτό,

κυλινδρικό ή σφαιρικό αντικείμενο ή μια επιφάνεια και μπορεί να κατηγοριοποιηθεί με βάση τη γεωμετρία του και την ηλεκτρική του σύσταση. Όλες αυτές οι επιδόσεις εξαρτώνται ισχυρά από τις ιδιότητες του εδάφους και τις παραμέτρους του ραντάρ, που είναι κυρίως η συχνότητα λειτουργίας, η ισχύς του πομπού και η πόλωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

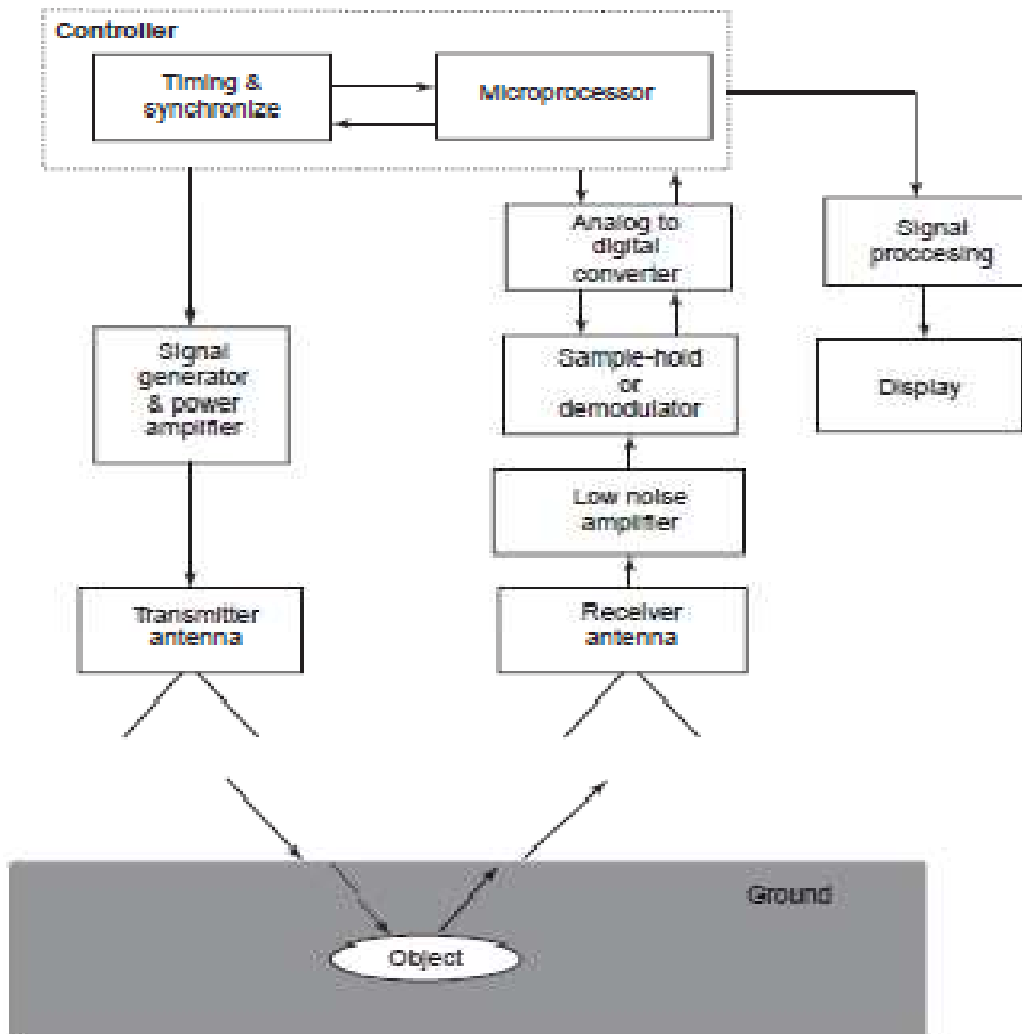
Δύο είδη GPR συστημάτων – το GPR διέγερσης (impulse) και το GPR σάρωσης συχνότητας (swept-frequency) – χρησιμοποιούνται στις περισσότερες σύγχρονες εφαρμογές. Το GPR διέγερσης χρησιμοποιεί εκπομπή ηλεκτρομαγνητικού παλμού στο πεδίο του χρόνου και τις αρχές της σκέδασης. Το σχήμα του παλμού διέγερσης καθορίζει το εύρος ζώνης συχνοτήτων. Η ανίχνευση του στόχου γίνεται μέσω του πλάτους και της καθυστέρησης του παλμού επιστροφής. Στα ραντάρ σάρωσης συχνότητας το εύρος ζώνης λειτουργίας καθορίζεται καθαρά από τον σχεδιαστή. Το ηλεκτρομαγνητικό πρόβλημα σκέδασης λύνεται στο πεδίο της συχνότητας. Η πληροφορία για το στόχο αποκτάται από το πλάτος και τη φάση του παλμού επιστροφής. Το GPR δεν είναι πολύ διαφορετικό από τα κλασικά ραντάρ. Οι κύριες διαφορές είναι η κοντινή ακτίνα δράσης, η ανάλυση του κοντινού πεδίου και το μη ομογενές και με απώλειες μέσω διάδοσης. Η τεχνική ανίχνευσης είναι συνήθως βασισμένη στο κύμα που σκεδάζεται προς τα πίσω από το στόχο, αλλά και η προς τα μπρος σκέδαση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μερικές φορές για παραγωγή πληροφορίας. Εφόσον μιλάμε για ραντάρ κοντινής ακτίνας η ανομοιογένεια του χώρου (clutter) είναι το σημαντικότερο πρόβλημα. Η πηγή του clutter είναι ο θόρυβος της κεραίας, η σύζευξη πομπού/δέκτη, η ανάκλαση από την επιφάνεια του εδάφους και η σκέδαση από ανεπιθύμητες ανωμαλίες του εδάφους. Μέτρα προς αποφυγή των παραπάνω, όπως η σωστή επιλογή κεραίας, σχέδιο προστατευτικού καλύμματος και προσαρμοστικές μέθοδοι επεξεργασίας σήματος πρέπει να παρθούν για τη βελτίωση της επίδοσης του συστήματος.

Η επιλογή της κεντρικής συχνότητας, του εύρους ζώνης και της ισχύος του συστήματος είναι καθοριστικός παράγοντας στο σχεδιασμό. Η ανάκλαση του κύματος από την επιφάνεια του εδάφους και η εξασθένησή του αυξάνονται απότομα με την αύξηση της συχνότητας και την αγωγιμότητα του εδάφους, όπως φαίνεται στον πίνακα 2. Κατά κανόνα, υλικά με μεγάλη αγωγιμότητα έχουν και μεγάλη εξασθένηση. Κατά συνέπεια η εφαρμογή σε άμμο, αμμοχάλικο, ξηρό έδαφος και καθαρό νερό είναι πολύ ευκολότερη από ότι σε άργιλο, υγρά εδάφη ή με μέταλλα ή στο αλμυρό νερό. Αφού η εξασθένηση και η ανάκλαση αποτελούν ένδειξη για τις απώλειες και το clutter, χαμηλότερες συχνότητες χρησιμοποιούνται για βαθιά θαμμένα αντικείμενα. Παρόλα αυτά οι υψηλότερες συχνότητες ευνοούν την καλύτερη ανάλυση και την πιο λεπτομερή αντήχηση μικρών αντικειμένων. Γι' αυτό το λόγο, το GPR απλωμένου φάσματος χρησιμοποιείται για να επωφεληθούμε και από τις χαμηλές και από τις υψηλές συχνότητες. Ο σχεδιασμός της κεραίας μεγάλου εύρους συχνοτήτων είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για την απόδοση. Οι κεραίες του πομπού και του δέκτη σχεδιάζονται έτσι ώστε να συμβαδίζουν με το υπάρχον hardware για να εκπέμπουν και να μεταδίδουν το σήμα στο έδαφος με αποδοτικό τρόπο.

Η διαδικασία του αντικειμενοστραφούς σχεδιασμού και οι κρίσιμες παράμετροι των συστημάτων GPR συζητούνται στην ενότητα 3.2. Ειδικότερα συζητούνται κατάλληλες κεραίες μεγάλου εύρους, κατάλληλες γεννήτριες συνεχούς κύματος ή παλμού διέγερσης, δέκτες RF χαμηλού θορύβου και τεχνικές επεξεργασίας σήματος.

1.3.2 Διαδικασία Σχεδιασμού Συστήματος

Η μέθοδος GPR έχει μια εξαιρετικά ευρεία περιοχή εφαρμογής από εξερεύνηση μεγάλων υπόγειων δομών μέχρι ανίχνευση μικρών αντικειμένων κάτω ακριβώς από την επιφάνεια. Η αρχή λειτουργίας συνίσταται στη δημιουργία ενός παλμού ή σήματος RF από τη γεννήτρια, την ακτινοβολία του από την κεραία πομπό, το χαρακτηρισμό του εδάφους και γενικά του μέσου διάδοσης, λήψη από την κεραία δέκτη του σκεδαζόμενου από το θαμμένο αντικείμενο ηλεκτρομαγνητικού κύματος και τελικά κβάντιση και επεξεργασία του λαμβανόμενου σήματος από τον αποδιαμορφωτή (σχήμα 1).



Σχήμα 1. Μπλοκ Διάγραμμα GPR Συστήματος

Οι κρίσιμες παράμετροι όπως ο τύπος του εδάφους και οι ιδιότητες του στόχου επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση της ανίχνευσης. Ο κύριος στόχος του σχεδιασμού είναι να παρέχει πληροφορίες προσανατολισμένες στις εφαρμογές και να παρουσιάσει τις διαθέσιμες τεχνικές επιλογές στο χρήστη.

Για να λειτουργήσει ένα σύστημα GPR με επιτυχία πρέπει να ικανοποιούνται οι ακόλουθες απαιτήσεις :

1. Επαρκής ισχύς σήματος ή παλμού εκπομπής για να πετύχουμε το επιθυμητό βάθος διείσδυσης.
2. Κατάλληλη κεραία που να μεταδίδει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα στο έδαφος αποδοτικά, με επαρκές εύρος ζώνης, στενό λοβό ακτινοβολίας και μικρή ανάκλαση εισόδου
3. Κατάλληλα μεγάλο εύρος ζώνης για να λαμβάνουμε επαρκές σκεδαζόμενο σήμα από μικρά αντικείμενα.
4. Κατάλληλο υλικό του δέκτη για να λαμβάνουμε επαρκή σηματοθορυβικό λόγο και λόγο χρήσιμου σήματος προς ανακλάσεις από το clutter για την καλύτερη επίδοση της ανίχνευσης.
5. Προσαρμοσμένες τεχνικές επεξεργασίας σήματος που να ξεχωρίζουν και να χαρακτηρίζουν τα θαμμένα αντικείμενα.

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του μέσου είναι σημαντικές παράμετροι στο σχεδιασμό ενός συστήματος GPR. Το έδαφος γενικά είναι ημιμογενές και η ηλεκτρική του συμπεριφορά μπορεί να καθοριστεί από τις συστατικές του παραμέτρους, δηλαδή διηλεκτρική σταθερά (ϵ), μαγνητική διαπερατότητα (μ) και ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ). Εδώ οι σχετικές ηλεκτρικές και μαγνητικές σταθερές (ϵ_r, μ_r) καθορίζουν το μήκος κύματος και η αγωγιμότητα του εδάφους τις απώλειες διάδοσης. Όλες αυτές οι παράμετροι είναι επίσης συναρτήσεις της συχνότητας. Για παράδειγμα οι απώλειες διάδοσης και ανάκλασης από την επιφάνεια του εδάφους αυξάνονται απότομα πάνω από τα 3 GHz και σε πολλές περιπτώσεις το γεγονός αυτό περιορίζει το εύρος ζώνης λειτουργίας. Παρόλα αυτά, όταν τα θαμμένα αντικείμενα μειώνονται κατά μέγεθος τα αποτελέσματα προσομοιώσεων δείχνουν ότι οι τιμές RCS του ραντάρ είναι ανεπαρκείς και σε μικρότερες συχνότητες. Όπως είναι γνωστό, η τιμή RCS ενός αντικειμένου παριστάνει το επίπεδο της προς τα πίσω σκέδασης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, δηλαδή πόσο εύκολα αναγνωρίσιμο είναι το σώμα. Εφόσον το RCS εξαρτάται από τα ηλεκτρικά μεγέθη του αντικειμένου (μετρημένα σε σχέση με το μήκος κύματος) και το μήκος κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογο με την τετραγωνική ρίζα της διηλεκτρικής σταθεράς, η συχνότητα του GPR μπορεί να μετακινηθεί προς τα κάτω σε μέσα με μεγάλη διηλεκτρική σταθερά, πχ σε βρεγμένα εδάφη. Για παράδειγμα, η συχνότητα λειτουργίας πρέπει να είναι τουλάχιστον 2 GHz για να πάρουμε επαρκώς σκεδαζόμενο σήμα από ένα κυλινδρικό στόχο διαμέτρου 5 cm σε ξηρό έδαφος. Όμως αν αυτό το σώμα ήταν θαμμένο σε υγρό έδαφος, εύρος ζώνης 1 GHz θα ήταν αρκετό για αυτό το επίπεδο σκέδασης.

Πίνακας 1. Τύποι Cross Section (RCS) για βασικές γεωμετρίες στόχων

Αντικείμενο	Κατεύθυνση Αναφοράς	RCS (dBsm)	Παράμετροι Σχήματος
Σφαίρα	Ομοιοκατευθυντικά	πR^2	Ακτίνα Σφαίρας R (m)
Κύλινδρος	Από Πλάγια	$\frac{2\pi a d^2}{\lambda}$	Ακτίνα Κυλίνδρου a (m) Ύψος Κυλίνδρου d (m)
Επίπεδη Πλάκα	Κανονικά	$\frac{4\pi w^2 h^2}{\lambda^2}$	Πλάτος Πλάκας w (m) Μήκος Πλάκας h (m) Μήκος Κύματος λ (m)
Γωνιακός Ακτινοβολητής, Δίεδρος	Άξονας Συμμετρίας	$\frac{8\pi A^2}{\lambda^2}$	Επιφάνεια Ακτινοβολητή A (m ²)
Γωνιακός Ακτινοβολητής, Ορθογώνιος Τρίεδρος	Άξονας Συμμετρίας	$\frac{4\pi L^4}{3\lambda^2}$	Μήκος Πλευράς L (m)

Το βήμα όσον αφορά την ανάκλαση κατά βάθος είναι άλλος ένας σημαντικός παράγοντας επίδοσης στο σχεδιασμό GPR. Η απόσταση των στρωμάτων στον z άξονα κατά την απεικόνιση σε οθόνη είναι φυσικά το ίδιο μέγεθος με το μήκος βήματος ανάλυσης. Για τα παλμικά ραντάρ το εύρος ζώνης είναι αντιστρόφως ανάλογο με το ΔRz, τύπος (1) $BW = \frac{c}{2 \Delta Rz \sqrt{\epsilon_r}}$, όπου c η ταχύτητα του φωτός στον αέρα και ε_r η σχετική διηλεκτρική σταθερά του εδάφους. Αν υποθέσουμε ότι ε_r=9 και ΔRz=2cm, το απαιτούμενο εύρος ζώνης θα είναι 2.5 GHz.

Η εξίσωση (2) δίνει τα όρια ανίχνευσης για δεδομένο RCS σε διαφορετικές περιπτώσεις παραμέτρων, όπως ισχύ, συχνότητα, τύπο εδάφους και δομή της κεραίας (βλέπε σχήμα 2).

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t}{(4\pi R^2)^2} \cdot \frac{A_e \cdot RCS}{L} \quad (2)$$

$$L(\text{dB}) = L_a(\text{dB}) + L_{r1}(\text{dB}) + L_{s1}(\text{dB}) + L_{s2}(\text{dB}) + L_{r2}(\text{dB}) \quad (3)$$

,όπου

P_r = ισχύς λήψης (W)

P_t = ισχύς πομπού (W)

G_t = κέρδος κεραίας πομπού

R = απόσταση στόχου (m)

A_e = ενεργός επιφάνεια κεραίας δέκτη (m²)

RCS = επιφάνεια σκέδασης (m²)

L = ολικές απώλειες διάδοσης (εκτός από τις απώλειες ελεύθερου χώρου)

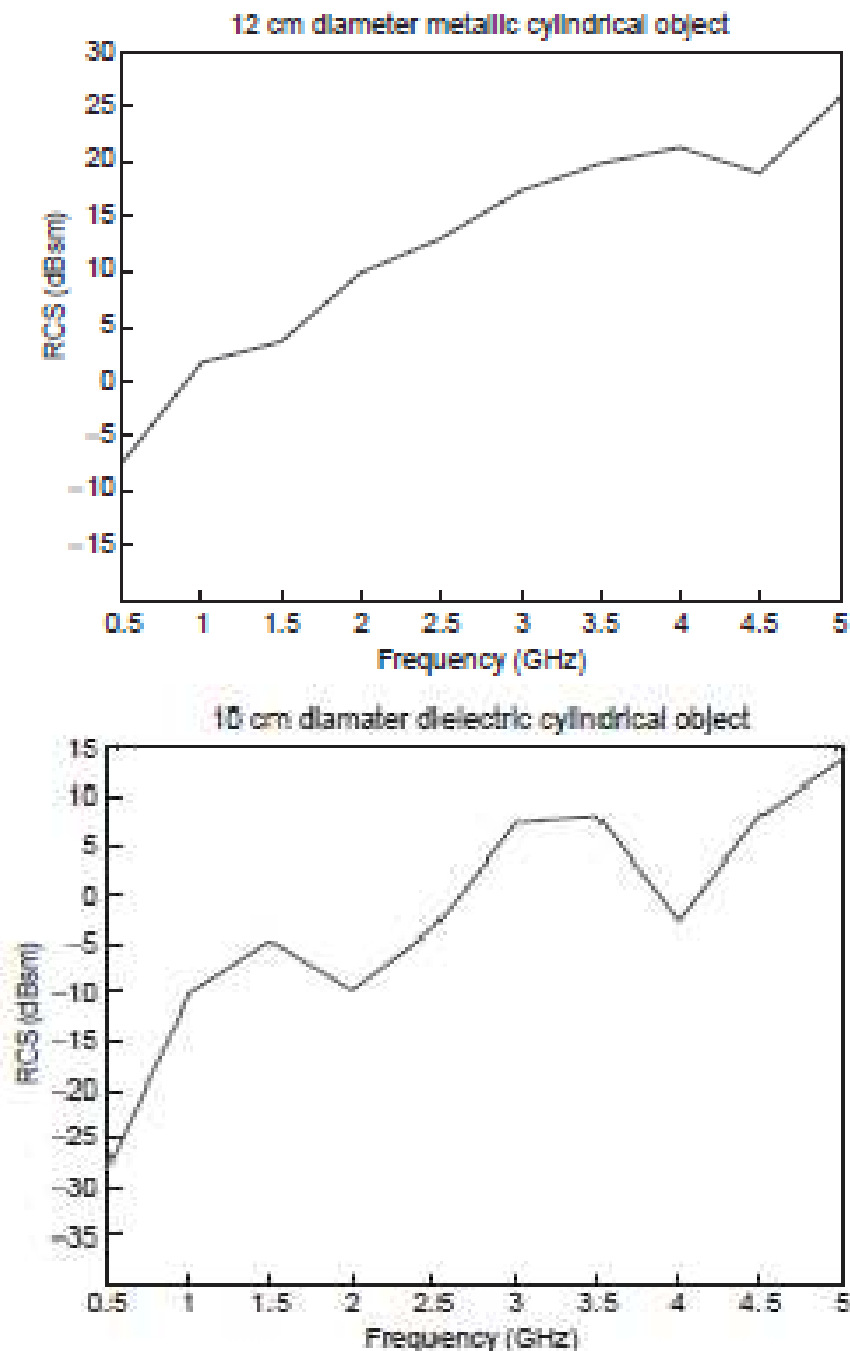
L_a = απώλειες απόδοσης κεραίων πομπού και δέκτη

L_{r1} = απώλειες ανάκλασης (αέρα προς έδαφος)

L_{r2} = απώλειες ανάκλασης (εδάφους προς αέρα)

$L_{s1,2}$ = απώλειες εξασθένισης μέσου

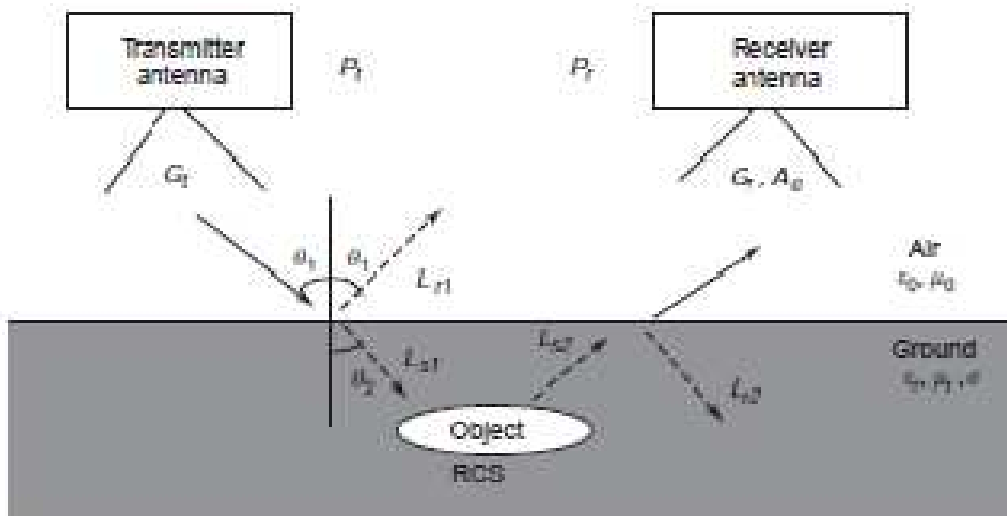
Το κέρδος κεραίας του πομπού (G_t) εξαρτάται από τον τύπο της κεραίας, τη γεωμετρία και τη συχνότητα. Το κέρδος σε συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων είναι το σημαντικό μέγεθος για stepped-frequency GPR, ενώ το κέρδος κορυφής (ή το μέσο κέρδος) μας ενδιαφέρει για impulse GPR. Τυπικά κέρδη κυμαίνονται από πλην μερικά decibel για τις ισοτροπικές κεραίες έως πάνω από 10 dBi. Η ενεργός επιφάνεια της κεραίας του δέκτη εκφράζεται συναρτήσει του κέρδους του δέκτη (4) $A_e = G_r \lambda^2 / 4\pi$. Οι αποδόσεις των κεραιών γενικά σχετίζονται με τις απώλειες λόγω των αντιστάσεων και της κακής προσαρμογής του υλικού. Αυτές οι απώλειες εκφράζονται τυπικά με μερικά decibel. Η επιφάνεια σκέδασης του στόχου εξαρτάται από τη γεωμετρία και τη δομή. Όμως, τα μοντέλα για κανονικά σχήματα που δίνονται στον πίνακα 1 και τα διαγράμματα για διηλεκτρικούς στόχους 10 και 12 εκατοστών στο σχήμα 3 παρουσιάζονται για να εκφράσουν τη γνώμη του συγγραφέα.



Σχήμα 2. Συμπεριφορά της Επιφάνειας Σκέδασης για Κυλινδρικά Αντικείμενα στον Αέρα

Οι απώλειες ανάκλασης αέρα-εδάφους και εδάφους-αέρα υπόκεινται στο γενικό πρόβλημα ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης από διηλεκτρική επιφάνεια. Πολλές παράμετροι, όπως οι αποστάσεις της κεραίας και του στόχου από το έδαφος, η διηλεκτρική σταθερά του εδάφους, οι γεωμετρία της κεραίας και του στόχου, τα σχήματα στο πεδίο του χρόνου των κυματομορφών ακτινοβολίας της κεραίας και του σκεδαζόμενου σήματος και οι γωνίες κλίσης της κεραίας και του αντικειμένου περιλαμβάνονται σε αυτό τον υπολογισμό. Σε αυτή την περίπτωση, μερικές χρήσιμες προσεγγίσεις συνήθως προτείνονται για εύκολους και με συνοχή υπολογισμούς. Για παράδειγμα, οι απώλειες ανάκλασης αέρα-εδάφους δίνονται από τον τύπο 5 υποθέτοντας ότι το κύμα στην επιφάνεια του εδάφους είναι ένα ομοιόμορφα καταναμημένο επίπεδο κύμα, βλέπε σχήμα 3.

$$L_{r1} = 20 \log_{10} \left(\frac{\sqrt{\epsilon_0} \cos \theta_1 - \sqrt{\epsilon r} \cos \theta_2}{\sqrt{\epsilon_0} \cos \theta_1 + \sqrt{\epsilon r} \cos \theta_2} \right) \quad (\text{dB}) \quad (5)$$



Σχήμα 3. Μοντέλο Διάδοσης GPR Συστήματος

Μια άλλη γενική μέθοδος βασισμένη στην προσέγγιση γραμμής μεταφοράς που χρησιμοποιεί τη χαρακτηριστικές αντιστάσεις του αέρα (Z_{air}) και του εδάφους (Z_{soil}) εκφράζεται στην εξίσωση (6):

$$L_{r1} = 20 \log_{10} \left(\frac{2 Z_{\text{soil}} l}{Z_{\text{soil}} + Z_{\text{air}}} \right) \quad (\text{dB}) \quad (7)$$

,όπου

$Z_{\text{air}} = 377 \Omega$ και

$$Z_{\text{soil}} = \left(\sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \right) \cdot \frac{(\cos \frac{\delta}{2} + j \sin \frac{\delta}{2})}{(1 + \tan^2 \delta)^{1/4}}$$

Μια τυπική τιμή Z_{soil} διάφορους τύπους εδάφους είναι περίπου 100Ω , συνεπώς $L_{r1} \approx 8-10 \text{ dB}$ και $L_{r2} \approx 5 \text{ dB}$. Τέλος, οι απώλειες μετάδοσης του εδάφους υπολογίζονται ως

$$L_{s1,2} = 8.686 \cdot 2\pi f R' \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon_r}{2} \{ \sqrt{(1 + \tan^2 \delta)} - 1 \}} \quad (8)$$

,όπου

δ είναι οι απώλειες διάδοσης σε neper ανά μέτρο στο έδαφος ($N = 8.686 \text{ dB}$), f η συχνότητα λειτουργίας και R' το μήκος δρόμου στο έδαφος. Ο πίνακας 2 παρουσιάζει τις απώλειες RF μετάδοσης σε διάφορα εδάφη στα 100 MHz και 1 GHz .

Πίνακας 2. Απώλειες Διάδοσης στα 100 MHz και στο 1 GHz για Διαφορετικούς Τύπους Εδάφους

Υλικό	Σχετική Διηλεκτρική Σταθερά	Αγωγιμότητα (mS/m)	Απώλειες 100 MHz (dB/m)	Απώλειες 1GHz (dB/m)
Αέρας	1	0	0	0
Άσφαλτος, στεγνή	2-4	1-10	2-15	20-150
Άσφαλτος, υγρή	6-12	10-100	5-20	50-200
Άργιλος	2-40	1-1000	5-300	50-3000
Τσιμέντο	4-20	1-100	1-25	10-250
Νερό	81	0.1	0.1	1
Βράχος	4-10	0.1-1	0.01-1	0.1-10
Άμμος, στεγνή	4-6	0.0001-1	0.01-2	0.1-20
Θαλασσινό Νερό	81	4	1000	10000
Χιόνι	8-12	0.001-0.001	0.1-2	1-20
Αμμώδες Χώμα	4-30	0.1-10	0.1-5	1-50
Εύθρυπτο Αργιλώδες Χώμα	4-20	0.1-100	0.5-60	5-600
Αργιλώδες Χώμα	4-15	0.1-1000	0.3-100	3-1000

Σα γενικός κανόνας, το κατώφλι θορύβου του συστήματος προσδιορίζει το επίπεδο ελάχιστου ανιχνεύσιμου σήματος – minimum detectible signal (MDS). Ανίχνευση του στόχου είναι δυνατή αν η λαμβανόμενη σκεδασμένη ισχύς είναι επαρκώς υψηλότερη και από το θόρυβο και από το clutter. Το MDS μπορεί να υπολογιστεί από την (9) χρησιμοποιώντας το εύρος ζώνης του συστήματος (BW), το συντελεστή θορύβου του δέκτη (NF) και τον απαιτούμενο σηματοθορυβικό λόγο (SNR)

$$MDS = k \cdot T_0 \cdot BW \cdot NF \cdot SNR \quad (9)$$

, όπου k σταθερά του Boltzmann και T_0 η θερμοκρασία δωματίου σε Kelvin ($kT_0 \approx 4 \times 10^{-21}$ W/Hz). Για να πάρουμε λαμβανόμενη ισχύ P_r που ξεπερνά αυτή την τιμή, το MDS δεν θα είναι αρκετό για ανίχνευση αν το clutter επικρατεί του σήματος. Η πηγή του clutter είναι κυρίως το ανεπιθύμητο απευθείας σήμα από τον πομπό στο δέκτη, το σκεδαζόμενο σήμα από άλλα θαμμένα αντικείμενα και η ανάκλαση από την επιφάνεια του εδάφους. Για αυτό το λόγο, ο ελάχιστος σηματοθορυβικός λόγος του συστήματος πρέπει να υπολογίζεται με ακρίβεια κατά το σχεδιασμό ώστε να εγγυηθεί την επιθυμητή ανάλυση του φυσικού ραντάρ.

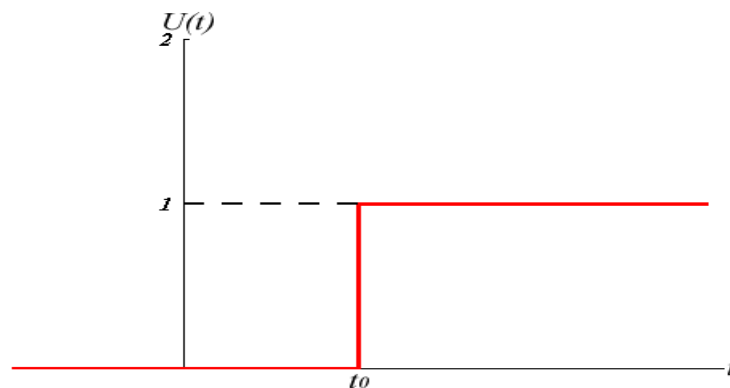
Παράδειγμα Σχεδιασμού :

Υποθέτουμε ότι θέλουμε να ανιχνεύσουμε ένα διηλεκτρικό κυλινδρικό αντικείμενο διαμέτρου 10 εκατοστών που είναι θαμμένο σε απόσταση μεγαλύτερη από ένα μέτρο. Η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος έχει επιλεγεί στο 1 GHz. Το έδαφος είναι ξηρό και εύθρυπτο αργιλώδες ($\epsilon_r=4$). Η κεραία του πομπού έχει 3 dB κέρδος και η ενεργός επιφάνεια της κεραίας του δέκτη είναι $A_e=0.0012 \text{ m}^2$. Χρησιμοποιώντας τις (2)-(9), τον πίνακα 2 και το σχήμα 3, βρίσκουμε οι απώλειες διάδοσης μετ' επιστροφής είναι συνολικά 15 dB, οι απώλειες εξασθένησης του εδάφους είναι 10 dB, ο στόχος έχει επιφάνεια σκέδασης -10 dBm² και οι συνολικές απώλειες ισχύος (dynamic range) είναι στα ~ 94 dB. Αν υποθέσουμε ότι ο ενισχυτής του GPR πομπού έχει συντελεστή θορύβου 3 dB σε εύρος ζώνης 1 GHz, το ελάχιστο κατώφλι σήματος για τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του δέκτη είναι $MDS = 8 \times 10^{-10} \text{ W}$ ή -91 dBw, θεωρώντας ότι ο σηματοθορυβικός λόγος είναι $SNR = 20$. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, η κορυφή ισχύος του πομπού πρέπει να είναι τουλάχιστον 3 dBw ή περίπου 2 W. Για 50 Ω - impulse GPR σύστημα, αυτό σημαίνει 10 V έξοδο στον πομπό.

1.3.3 Πηγές σήματος και μέθοδοι διαμόρφωσης

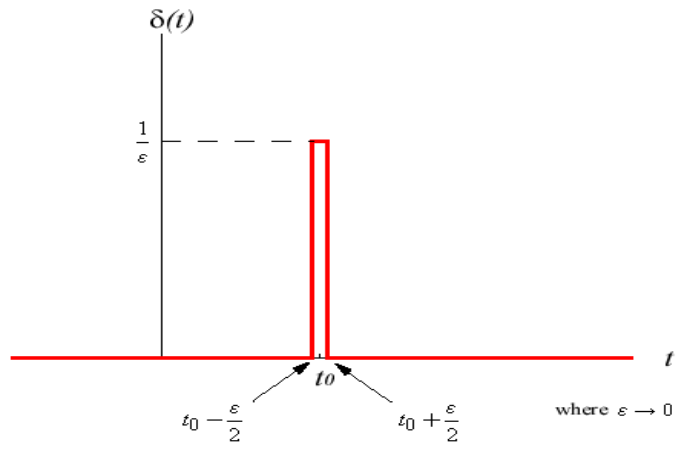
Πολλά είδη τεχνικών διαμόρφωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συστήματα ραντάρ διεξόδου υπεδάφους. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα συστήματα GPR είναι τα ραντάρ διέγερσης (impulse radars) που δημιουργούν σύντομους παλμούς (pulses) ή κρουστικές διεγέρσεις (impulses) διαμορφωμένες κατά πλάτος (AM) και τα ραντάρ σάρωσης (swert radar) ή βηματικής συχνότητας (stepped-frequency radar) που χρησιμοποιούν διαμόρφωση συχνότητας παράγοντας ένα διαμορφωμένο παλμό.

Το Impulse GPR είναι το πιο δημοφιλές εμπορικά σύστημα και προτιμάται για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στη δημιουργία ενός σήματος διέγερσης με συγκεκριμένο πλάτος και εύρος ζώνης συχνοτήτων. Οι πηγές δημιουργούν monocycle ή monopulse σήματα που μπορούν να διαρκέσουν από μερικές εκατοντάδες picosecond μέχρι μερικά νανοδευτερόλεπτα.



Σχήμα 4. Unit Step function

Οι κυματομορφές είναι γενικά Gaussian όσον αφορά το σχήμα τους και το εύρος ζώνης συχνοτήτων τους ξεκινά από μερικές εκατοντάδες MHz έως μερικά GHz, ανάλογα με την εφαρμογή (Εικ. 9). Η κύρια διαφορά μεταξύ ενός monocyclus και ενός monopulse σήματος είναι η συμπεριφορά στο πεδίο της συχνότητας. Το monopulse σήμα περιέχει DC ή χαμηλών συχνοτήτων συνιστώσες.



Σχήμα 5. Impulse Function – Derivative of Step Function – Monopulse Signal

Εν αντιθέσει το monopulse σήμα έχει μερικά πλεονεκτήματα στα συστήματα διάδοσης και ακτινοβολίας που λειτουργούν στο πεδίο του χρόνου.



Σχήμα 6. Gaussian Monopulse Signal - Derivative of Step Function

Τα ραντάρ διαμόρφωσης συχνότητας συνεχούς κύματος Frequency-modulated continuous-wave (FMCW) και τα ραντάρ βηματικής συχνότητας χρησιμοποιούνται όταν οι στόχοι που μας ενδιαφέρουν είναι ρηχοί και η συχνότητα πρέπει να παραμείνει σταθερή. Αυτά τα συστήματα είναι ευκολότερα στο σχεδιασμό σε σχέση με τα παλμικά ραντάρ. Αυτά τα ραντάρ swept- και stepped-frequency έχουν το πλεονέκτημα καλύτερης επιλογής και ελέγχου του εύρους ζώνης λειτουργίας. Αυτό το χαρακτηριστικό παρέχει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στην ακτινοβολία με γεννήτριες υψηλής ισχύος και κεραιές μεγάλου κέρδους, χαμηλότερα επίπεδα θορύβου σε στενότερες ζώνες λειτουργίας και κατά συνέπεια μεγαλύτερο σηματοθορυβικό λόγο (dynamic range DNR) σε σχέση με τα παλμικά ραντάρ.

1.3.3.1 Σχεδιασμός Γεννήτριας Παλμών

Υπάρχουν δύο κύρια ζητήματα για μια γεννήτρια παλμών χρησιμοποιούμενη σε GPR εφαρμογές: (1) το σχήμα και η διάρκεια παλμών και (2) το πλάτος του παλμού. Σε πολλές περιπτώσεις και οι δύο αυτές παράμετροι είναι ιδιαίτερα κρίσιμες. Το σχήμα και η διάρκεια του παλμού σχετίζονται με χαρακτηριστικά ευρείας ζώνης, πρόσφορα για την ανίχνευση μικρών θαμμένων αντικειμένων. Από την άλλη, το πλάτος σχετίζεται με την ισχύ του συστήματος που με τη σειρά της σχετίζεται με το βάθος της λειτουργίας ανίχνευσης του στόχου στο έδαφος.

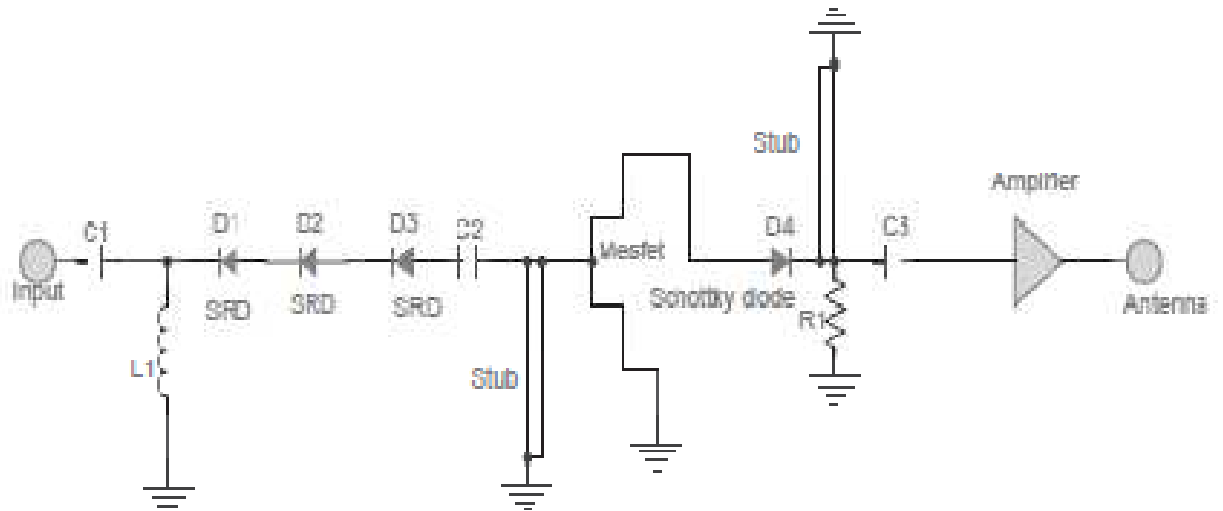
Το σχήμα του παλμού επηρεάζει αυστηρά τη συχνότητα λειτουργίας του συστήματος GPR. Για παράδειγμα, ένας βηματικός παλμός έχει μεγάλο ποσό φασματικής ενέργειας στις χαμηλές συχνότητες με το φάσμα να μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα της συχνότητας ($1/f$), ενώ ένας παλμός που μοιάζει με Dirac έχει ομοιόμορφα κατανομημένο φάσμα. Σε κάθε περίπτωση, το περιεχόμενο υψηλών συχνοτήτων του παλμού περιορίζεται είτε από το χρόνο ανόδου του παλμού (T_s) για την πρώτη περίπτωση είτε από τη διάρκεια του παλμού για την περίπτωση της Dirac (T_d). Για ιδανικές κυματομορφές ο πρώτος μηδενισμός στο φάσμα συμβαίνει στο $f_0=1/T_d$. Η κατανομή της φασματικής ισχύος του παλμού μειώνεται απότομα μετά το f_0 και τυπικά έχει τη μορφή ημιτόνου. Ένα μονοκύκλιο κύμα μπορεί να αναλυθεί ως μια AM διαμόρφωση παλμού ενός ημιτονικού φέροντος. Κατά συνέπεια το φάσμα ενός μονοκύκλιου παλμού μετακινείται προς τα πάνω στο πεδίο της συχνότητας ανάλογα με το χρόνο ανόδου και κεντράρεται στη συχνότητα του φέροντος που αντιστοιχεί στο $1/T_d$. Η δημιουργία αυτών των διάφορων κυματομορφών ξεκινά με μια πολύ γρήγορη ακμή-άνοδο, βηματικός παλμός. Μετά κάποιος μπορεί να πάρει την πρώτη παράγωγο και να έχει ένα κρουστικό παλμό, impulse. Για να πάρουμε ένα μονοκύκλιο κύμα παίρνουμε την πρώτη παράγωγο μιας κρουστικής ή τη δεύτερη παράγωγο ενός βηματικού παλμού. Στην πράξη η διαδικασία αυτή μπορεί να υλοποιηθεί προσθέτοντας μια βραχυκυκλωμένη γραμμή μεταφοράς στη έξοδο της γεννήτριας. Η κεραία και ο ενισχυτής μεγάλου εύρους ζώνης πρέπει να έχουν σχεδιαστεί κατάλληλα, ώστε να αποφεύγουν το ζωνοπερατό φιλτράρισμα που μπορεί να προκαλέσει multicycling. Πολλών ειδών transistor-διακόπτες υψηλής ισχύος ή FETS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποκτήσουμε τους τυπικούς παλμούς GPR των μερικών εκατοντάδων picoseconds ή των μερικών nanosecond. Transistor χιονοστιβάδας συχνά χρησιμοποιούνται για να παράγουν κυματομορφές με κορυφές ισχύος από 50 Watt ως μερικά kilowatt. Για τη ζώνη 3-10 GHz, η διαθεσιμότητα κατάλληλων συσκευών είναι πιο περιορισμένη. Step Recovery Diodes (SRDs) μπορούν να παράγουν ακμές 50-200 ps με πλάτος αρκετών volts.

Τα ακόλουθα δίνονται ως μια διαδικασία σχεδιασμού κυκλώματος μονοκύκλιου παλμών ειδικά για εφαρμογές GPR υψηλών συχνοτήτων και μεγάλου πλάτους:

- Γεννήτρια μικρού χρόνου ανόδου και μεγάλου πλάτους σήματος.
- Γεννήτρια κρουστικών διεγέρσεων με διόδους step recovery (snap-off diode ή charge-storage diode ή memory varactor).
- Προσαρμογή σύνθετης αντίστασης μεγάλου εύρους ζώνης με αντιστάσεις και διόδους Schottky μεγάλων ταχυτήτων.
- Βελτίωση του φάσματος του παλμού με βραχυκυκλωμένα στελέχη διακλάδωσης.
- Ευρείας ζώνης MMIC ενισχυτής (αν η ισχύς του σήματος δεν είναι αρκετή).

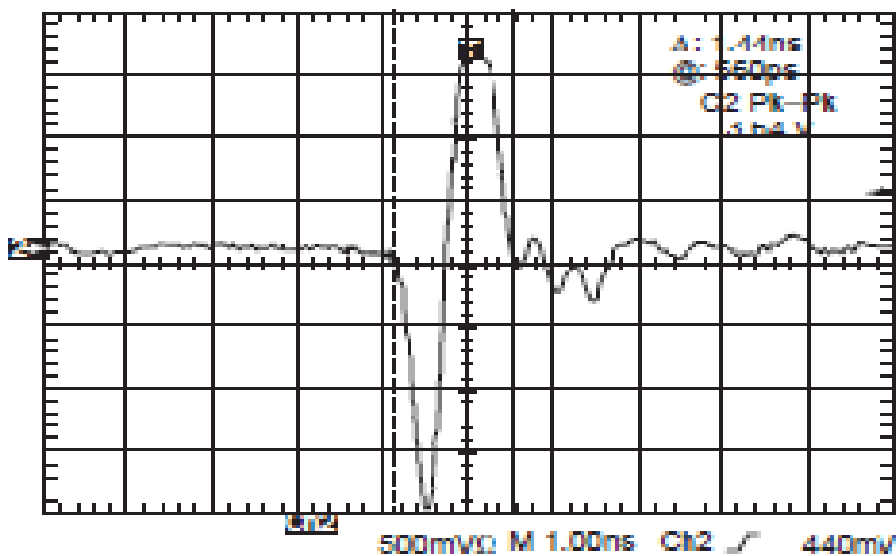
Η γεννήτρια μονοκύκλιου παλμών του σχήματος 4 αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας στελέχη γραμμής μεταφοράς πραγματοποιημένα από εύκαμπτα καλώδια, SRDs και μια δίοδο Schottky, ένα MESFET και ένα μικροκυματικό ολοκληρωμένο ενισχυτή- monolithic microwave integrated circuit amplifier (MMIC). Στην είσοδο εφαρμόζεται μια ακολουθία τετραγωνικών παλμών με συχνότητα επανάληψης 400 KHz. Από ένα μικροεπεξεργαστή. Ο χρόνος ανόδου του σήματος μειώνεται με τη χρήση ενός συγκριτή. Το σήμα προχωρά προς τη γεννήτρια που αποτελείται από SRDs σε ενεργό κατάσταση. Η λειτουργία στην ενεργό

κατάσταση επιτρέπει στο σχεδιαστή να διαμορφώσει τον παλμό ρυθμίζοντας τη DC πόλωση του ρεύματος που έρχεται από τη DC πηγή. Το MESFET συγκεκριμένα για την απομόνωση του κυκλώματος και την προσαρμογή της σύνθετης αντίστασης στο επιθυμητό εύρος ζώνης συχνοτήτων. Τελικά, το πρώτο στέλεχος που είναι στην πύλη του MESFET χρησιμοποιείται για να παράγει ένα παλμό πολύ μικρής διάρκειας. Σημειώνεται ότι, εξαιτίας του buffer του MESFET, η κεραία δε μπορεί να ανακλάσει πίσω με μη επιθυμητό τρόπο.

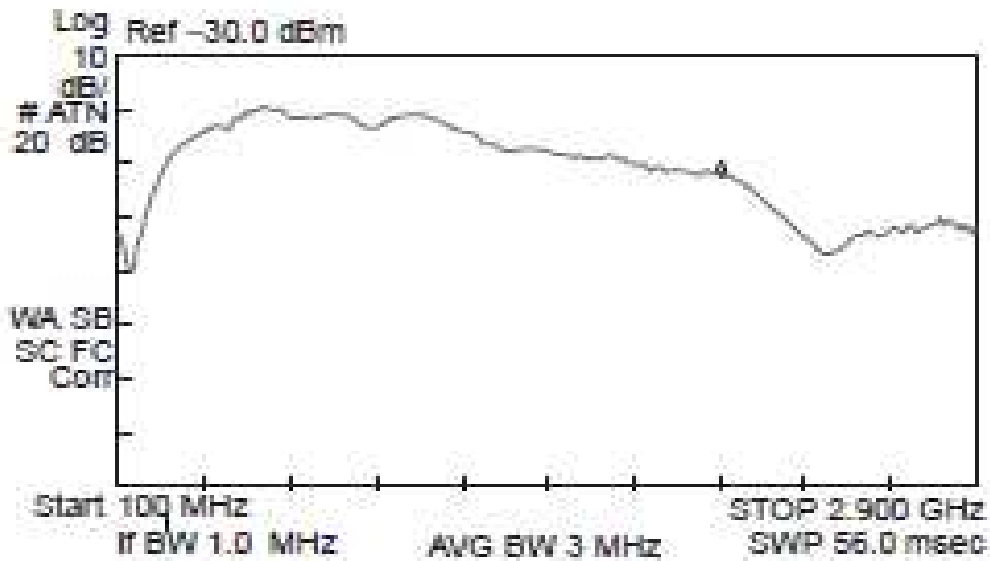


Σχήμα 7. Διάγραμμα Γεννήτριας Monocycle Παλμών

Τα σχήματα 5 και 6 δείχνουν την έξοδο ενός monocycle παλμού στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας αντίστοιχα. Η μετρούμενη κυματομορφή έχει διάρκεια μικρότερη από 1.5 nsec στο πεδίο του χρόνου και το φάσμα της στο πεδίο της συχνότητας είναι περίπου 2 GHz.

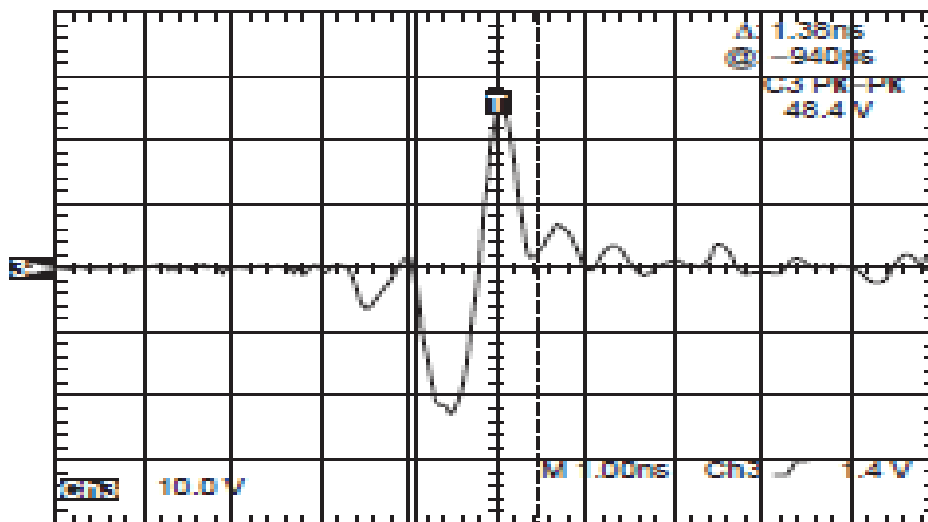


Σχήμα 8. Μετρούμενη Έξοδος Monocycle Παλμού στο Πεδίο του Χρόνου

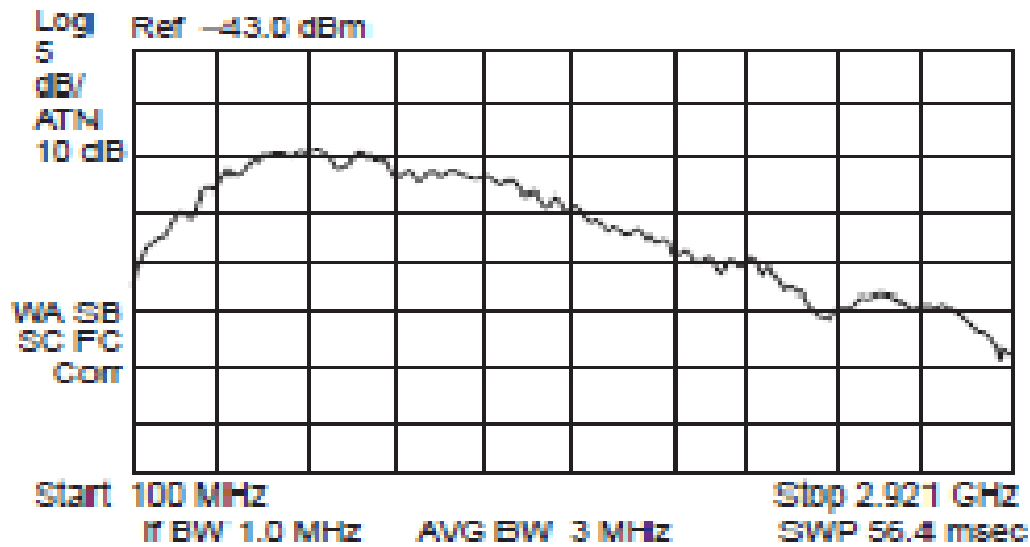


Σχήμα 9. Μετασηματισμός στο Πεδίο της Συχνότητας Monocycle Παλμού

Η διαδικασία σχεδιασμού της γεννήτρια παλμών με ρύθμιση χιονοστιβάδας είναι παρόμοια με αυτή του κυκλώματος SRD. Η κύρια διαφορά είναι ότι ένα transistor χιονοστιβάδας χρησιμοποιείται αντί για διόδους SRD. Το transistor λειτουργεί στην περιοχή κατάρρευσης χιονοστιβάδας με τη χρήση διακοπών αποφορτίζοντας την αποθηκευμένη ενέργεια στις γραμμές μεταφοράς. Αυτά είναι φορτία εξόδου που επίσης περιλαμβάνουν την αντίσταση εισόδου της κεραίας. Οι έξοδοι μιας γεννήτριας χιονοστιβάδας στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας δίνονται στα σχήματα 10 και 11.



Σχήμα 10. Έξοδος Monocycle Παλμού Γεννήτριας Χιονοστιβάδας



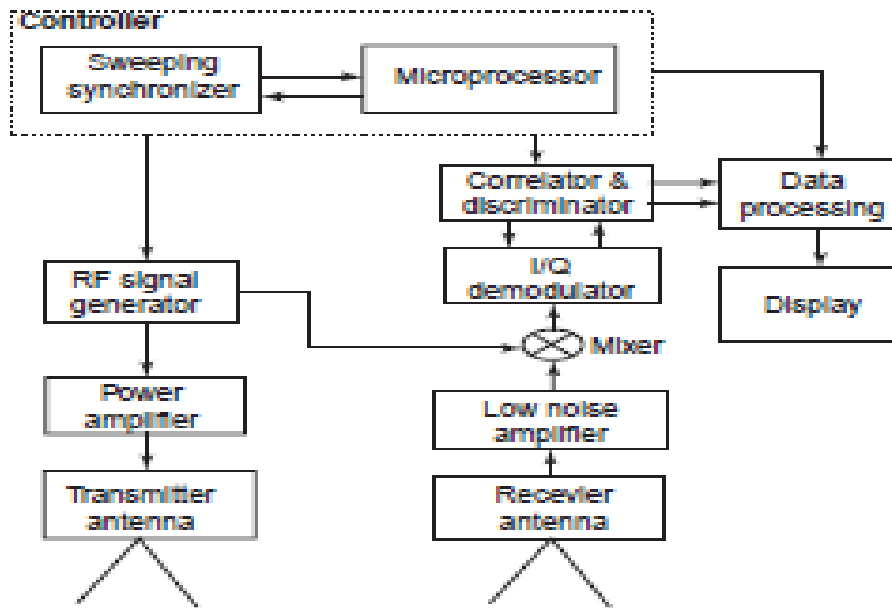
Σχήμα 11. Συμπεριφορά στο Πεδίο της Συχνότητας Σήματος Γεννήτριας Χιονοστιβάδας

1.3.3.2 Ραντάρ διαμόρφωσης συχνότητας συνεχούς κύματος (FMCW) και Ραντάρ βηματικής συχνότητας (Stepped-Frequency Radar)

Το ραντάρ FMCW εκπέμπει ένα RF φέρον μεταβαλλόμενης συχνότητας ελεγχόμενο από ένα ταλαντωτή ελεγχόμενο από τάση, voltage control oscillator (VCO) σε μια επιλεγμένη ζώνη συχνοτήτων. Η ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας μπορεί να επιλεγεί λαμβάνοντας υπόψη κυρίως το μέγιστο βάθος και το ελάχιστο μέγεθος των θαμμένων αντικειμένων. Το σκεδαζόμενο πίσω σήμα από το στόχο πολλαπλασιάζεται με το εκπεμπόμενο και τα αποτελέσματα σε μια άλλη συχνότητα, που αποκαλείται ενδιάμεση συχνότητα (intermediate frequency IF), προκύπτουν από ένα ζευγάρι τετραγωνικών συμφασικών μεικτών- I/Q in phase/quadrature mixer pair. Η IF έξοδος περιέχει τα δεδομένα του πλάτους και της φάσης του λαμβανόμενου σήματος. Η πληροφορία του πλάτους δίνει την απόσταση του στόχου εφόσον σχετίζεται με τη χρονική καθυστέρηση. Μόνο αν υπάρχει στόχος θα παραχθεί το σήμα IF. Αν η μεταβολή της συχνότητας είναι γραμμική συνάρτηση του χρόνου, τότε η επιστροφή από το στόχο θα συμβεί τη χρονική στιγμή $T_r = 2R/u$ (10), όπου R είναι η απόσταση σε μέτρα και u η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού σήματος στο μέσο διάδοσης (αέρας, χώμα ή και τα δύο) σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο.

Εφόσον το ραντάρ FMCW ουσιαστικά μετράει τη φάση του IF σήματος, που σχετίζεται ευθέως με την απόσταση του στόχου, απαιτεί μεγάλο βαθμό γραμμικότητας στη μεταβολή της συχνότητας για να αποφύγουμε διαπλάτυνση του φάσματος του IF σήματος, που σημαίνει χειροτέρευση της ανάλυσης του συστήματος. Στην πράξη τα επίπεδα μη γραμμικότητας της συχνότητας πρέπει να παραμένουν μικρότερα του 0.1 %. Οι χαρακτηριστικές του ενισχυτή και της κεραίας πρέπει να είναι επίσης γραμμικές ως προς τη συχνότητα για ένα σωστό σχεδιασμό συστήματος. Ένα ισοδύναμο στο πεδίο του χρόνου παλμικό ραντάρ μπορεί να προκύψει με αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier.

Το ραντάρ βηματικής συχνότητας είναι ένα σύστημα συνεχούς κύματος που επαναλαμβάνει τη λειτουργία του διαδοχικά σε διαφορετικές συχνότητες, όπως φαίνεται στο σχήμα 9. Αυτό το είδος ραντάρ εκπέμπει μια ακολουθία από φέροντα N βημάτων συχνότητας και το πλάτος και η φάση του λαμβανόμενου αποθηκεύονται. Η μετάθεση του σήματος στη IF ζώνη συχνοτήτων είναι παρόμοια με αυτή του FMCW ραντάρ. Ο σύνθετος μετασχηματισμός Fourier εφαρμόζεται για να πάρουμε την απόκριση στο πεδίο του χρόνου του ανακλώμενου-σκεδαζόμενου σήματος. Η χωρική ανάλυση προσδιορίζεται ως $\Delta R = \frac{u}{2N\Delta f}$, όπου Δf είναι η αύξηση συχνότητας κάθε βήματος.

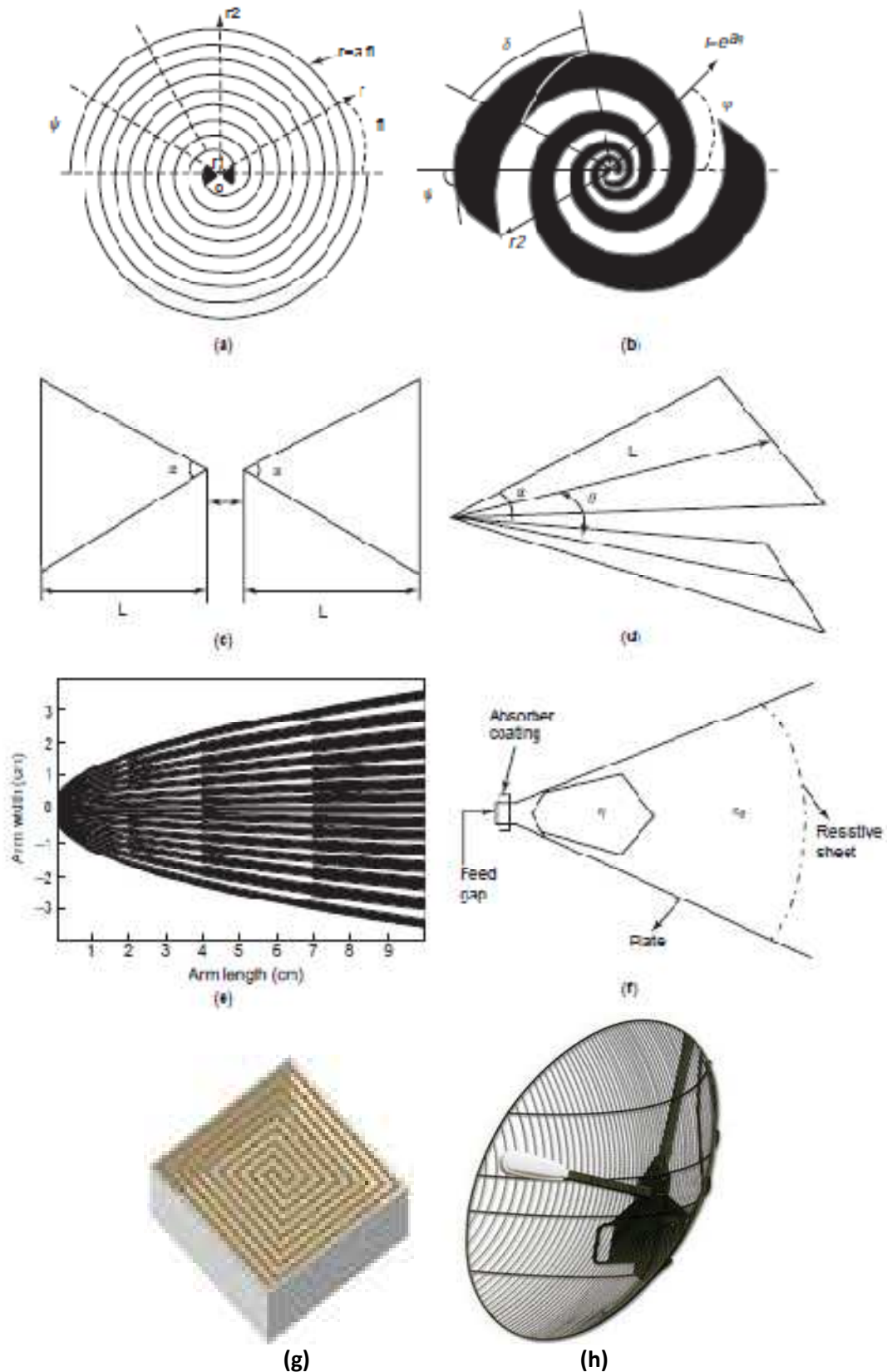


Σχήμα 12. Μπλοκ Διάγραμμα Ραντάρ Σάρωσης Συχνότητας

Και για τα δύο ραντάρ, FMCW και stepped-frequency, είναι προφανές ότι τα επίπεδα θερμικού θορύβου είναι πολύ χαμηλότερα από αυτά του δέκτη των παλμικών ραντάρ στο πεδίο του χρόνου. Παρόλα αυτά, η διάκριση του σκεδαζόμενου σήματος από το στόχο από αυτό από τον περιβάλλοντα χώρο είναι ένα πιο δύσκολο πρόβλημα εξαιτίας των φίλτρων που αποκόβοντας συχνότητες προκαλούν αναπόφευκτη παραμόρφωση. Γι' αυτό το λόγο, κάποιες μέθοδοι ρύθμισης-καλιμπραρίσματος χρησιμοποιούνται για τέτοια συστήματα, όπως η επαναληπτική περιορισμό φάσματος.

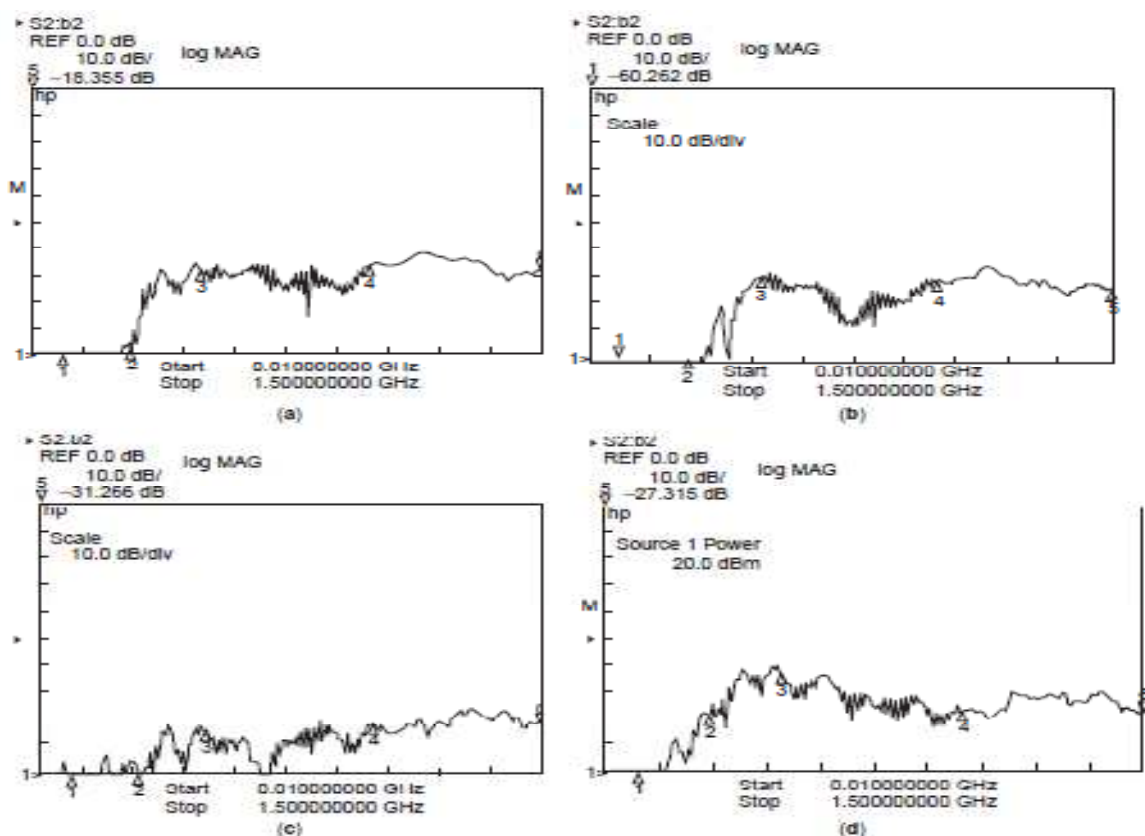
1.3.4 Κεραίες GPR

Η επίδοση του GPR εξαρτάται κατά πολύ από το σωστό σχεδιασμό του ζεύγους κεραιών του πομπού - δέκτη. Στην πράξη, το εκπεμπόμενο σήμα έχει χαρακτηριστικά ευρείας ζώνης, που μπορεί να κυμαίνονται από 10 MHz μέχρι 5 GHz για συστήματα κρουστικής διέγερσης και από 1 μέχρι 8 GHz για συστήματα σάρωσης/βηματικής συχνότητας. Γι' αυτό το λόγο, οι ευρείας ζώνης κεραίες πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να πετυχαίνουν το μέγιστο σηματοθορυβικό λόγο, την καλύτερα εστιασμένη περιοχή φωτισμού, τη μικρότερη παρεμβολή πομπού-δέκτη, τη μικρότερη επιρροή από το clutter και ομοιόμορφη ακτινοβολία των περιοδικών διεγέρσεων. Αυτές οι κεραίες πρέπει να ικανοποιούν τα ακόλουθα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά στη ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας, όπως υψηλό κατευθυντικό κέρδος, χαμηλά επίπεδα ανάκλασης εισόδου, καταπιεσμένους πλευρικούς λοβούς, καλή πόλωση εξαρτώμενη από το σχήμα του στόχου, καλή προσαρμογή του πομπού και του δέκτη και γραμμική απόκριση φάσης για GPR πλάτους. Επιπλέον, μερικοί φυσικοί περιορισμοί, όπως περιορισμοί βάρους για χειροκίνητες κεραίες, μπορεί να περιορίσουν κατά πολύ τους διαθέσιμους τύπους κεραιών. Επιπλέον παράγοντες στην επιλογή του κατάλληλου τύπου κεραίας εξαρτώνται από τον τύπο και το είδος του στόχου και του συστήματος. Από αυτή τη σκοπιά, οι πιο δημοφιλείς κεραίες ευρείας ζώνης, όπως τα δίπολα, οι κεραίες "παπιγιόν"-bowtie, οι σπιράλ κεραίες και κάποιες χοανοκεραίες-TEM horn, προτείνονται για συστήματα GPR πλάτους. Για FMCW και stepped-frequency συστήματα ευρείας ζώνης επιλεκτικές χοανοκεραίες-octave horns, κυματοδηγοί με ανοικτό το ένα άκρο γεμισμένοι με διηλεκτρικό, σπιράλ κεραίες με κοιλότητα και μεγάλες κεραίες πιάτα (μόνο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις), ίσως προτιμούνται εξαιτίας του υψηλότερου κέρδους τους.



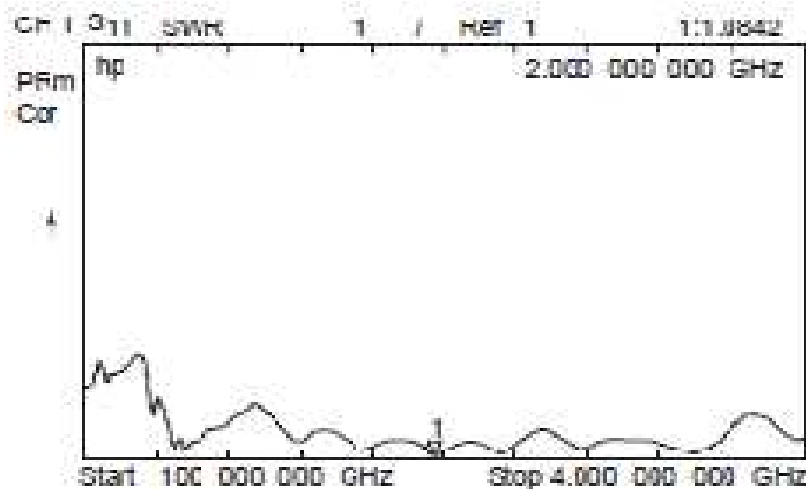
Σχήμα 13. Τύποι Κεραιών GPR Μεγάλου Εύρους Ζώνης : (α) Σπείρα του Αρχιμήδη Δύο Άκρων , (b) Λογαριθμική Σπιδάλ Κεραία Δύο Άκρων , (c) Κεραία "παπιγιόν" Τριγωνικών Πλακών , (d) TEM Horn Τριγωνικών Πλακών , (e) TEM Horn με Μεταλλικούς Βραχίονες (από πάνω) , (f) Γεωμετρία PDTEM Horn (από πλάγια) , (g) Σπιδάλ Κεραία Μέσα σε Κυλότητα , (h) Πιάτο με Συγκεντρωτικό Συλλέκτη.

Η απλούστερη GPR κεραία είναι ένα μικρό ηλεκτρικό δίπολο. Είναι μια γραμμικά πολωμένη κεραία που έχει ένταση μακρινού πεδίου ανάλογη του ηλεκτρικού της μήκους. Γι' αυτό το λόγο, το κέρδος και η απόδοσή της μπορεί να είναι πολύ μικρά στις χαμηλές συχνότητες. Για να αποφύγουμε χειροτέρευση της απόδοσης, τα δίπολα αντήχησης, όπως αυτά μισού μήκους κύματος, προτιμούνται συνήθως για τα GPR πλάτους. Παρόλα αυτά, τα δίπολα έχουν ένα φυσικό πλεονέκτημα, ειδικά για χειροκίνητα συστήματα, εξαιτίας του μικρού μήκους και της ελαφριάς και εύκολης στην κατασκευή δομής τους, στην εξαρτώμενη από τη συχνότητα αντίσταση εισόδου τους και στο κέρδος ακτινοβολίας τους. Μερικές τεχνικές γεμίματος με διηλεκτρικό ή απορροφητικό υλικό χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν το εύρος ζώνης λειτουργίας της κεραίας. Η διάταξη της κεραίας bowtie είναι παρόμοια με αυτή του δίπολου μεγάλου εύρους ζώνης που συχνά χρησιμοποιείται για παλμικά ραντάρ. Η bowtie εμφανίζει μεγαλύτερο κέρδος και καλύτερη απόδοση φάσματος από το απλό δίπολο. Για ένα κυκλικό αντικείμενο η bowtie είναι ο κατάλληλος τύπος κεραίας, αφού παράγει γραμμική πόλωση και έχει σχετικά καλή απόκριση φάσης πάνω στο απαιτούμενο εύρος ζώνης. Αν ο στόχος δεν είναι κυκλικός, από πλευράς σκέδασης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, ίσως προτιμούνται κυκλικά πολωμένες επίπεδες κεραίες, όπως οι σπιδάλ. Οι σπιδάλ αποτελούνται από το λογαριθμικό μοντέλο και από το μοντέλο του Αρχιμήδη και είναι θεωρητικά ανεξάρτητες από τη συχνότητα κεραίες. Αλλά στην πράξη και οι δύο περιορίζονται από την ακτίνα τροφοδοσίας τους, όσον αφορά το πάνω όριο συχνοτήτων, και από το μήκος τους για τις χαμηλές συχνότητες. Οι αποκρίσεις στο πεδίο της συχνότητας των bowtie και spiral κεραίων παρουσιάζονται στο σχήμα 14.

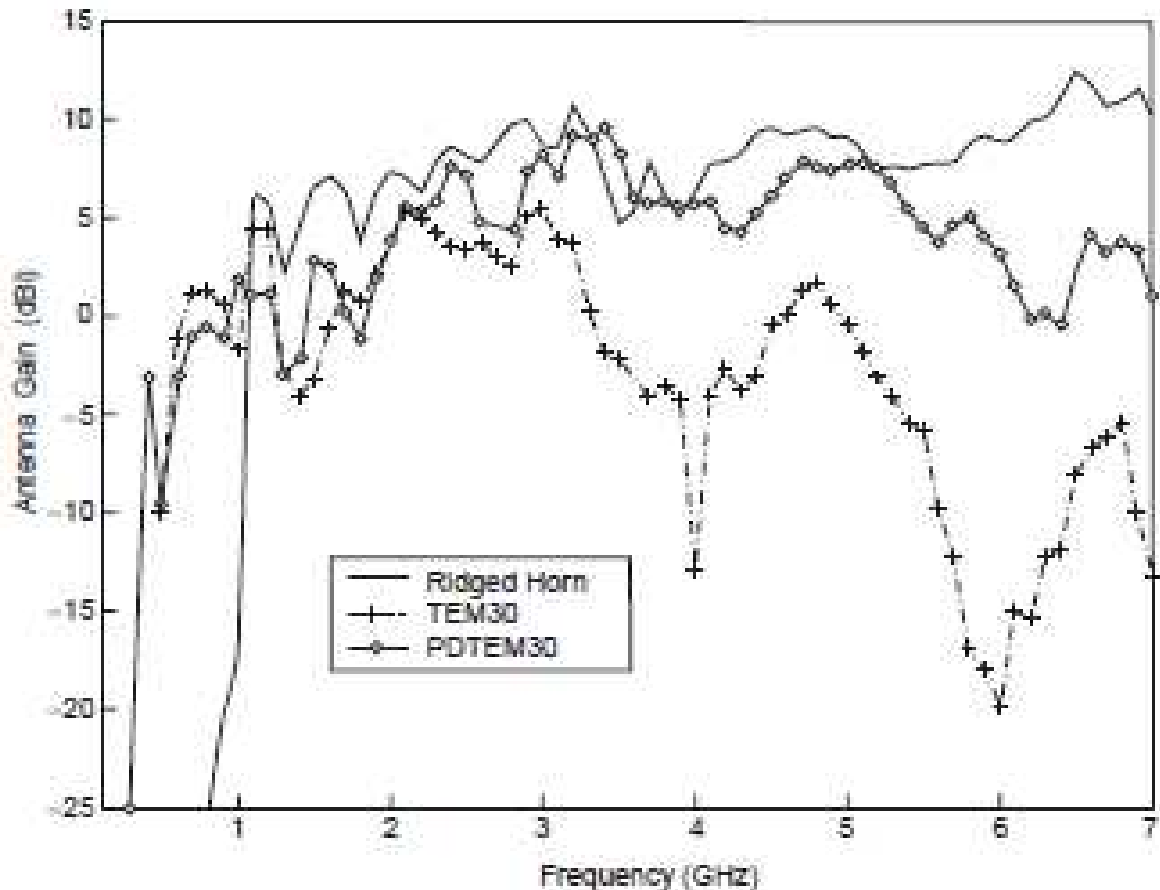


Σχήμα 14. Μετρημένες στο Πεδίο της Συχνότητας S_{21} Αποκρίσεις των Δισδιάστατων Κεραίων για 60 cm Ξηρό Έδαφος : (a) Λογαριθμική Σπιδάλ ($r_1=0.5\text{cm}$, $r_{2h}=5.5\text{cm}$, $r_{2v}=7.3\text{cm}$) , (b) Σπείρα του Αρχιμήδη ($r_1=0.5\text{cm}$, $r_2=8\text{cm}$) , (c) bowtie ($\alpha=60^\circ$, $d=0.5\text{cm}$, $L=7.3\text{cm}$) , (d) bowtie – κοινή πόλωση.

Όταν απαιτούνται μεγαλύτερο εύρος ζώνης, χαμηλότερος λόγος στάσιμου κύματος – voltage standing wave ratio (VSWR), υψηλότερο κέρδος και στενότερος λοβός ακτινοβολίας, η TEM Horn είναι μια κεραία με μεγάλες υποσχέσεις για συστήματα παλμικών ραντάρ. Μια τέτοια δομή αποτελείται από ένα ζευγάρι τριγωνικών ή κυκλικών αγωγών σε μορφή φέτας, οι οποίοι σχηματίζουν μια δομή V-δίπολων. Χαρακτηρίζεται από τις παραμέτρους L , d , a και θ , το μήκος της κεραίας, το κενό στο σημείο τροφοδοσίας, τη γωνία ανοίγματος μιας φέτας και τη γωνία μεταξύ των δύο φύλλων αντίστοιχα, σχήμα 14. Η TEM Horn κεραία γενικά δείχνει ζωνοπερατή συμπεριφορά σε ένα μεγάλο εύρος. Στην πράξη, οι ηλεκτρικές της διαστάσεις περιορίζουν ισχυρά τη λειτουργία της στις χαμηλές συχνότητες. Γι' αυτό, τεχνικές παραγεμίματος με διηλεκτρικό κυρίως χρησιμοποιούνται για να μειώσουν τη χαμηλότερη συχνότητα αποκοπής εξαιτίας συγκεκριμένων φυσικών περιορισμών. Σ' αυτήν την περίπτωση η ζώνη λειτουργίας της κεραίας μπορεί να μεταφερθεί προς τα κάτω στο πεδίο της συχνότητας, αλλά το εύρος ζώνης πιθανόν δε μπορεί να αυξηθεί. Η τμηματικά γεμισμένη με διηλεκτρικό TEM Horn κεραία (partial-dielectric-loaded TEM Horn, PDTEM) έχει προταθεί από τον Turk για να πετύχει χαμηλό λόγο στάσιμου κύματος και υψηλό κατευθυντικό κέρδος με σταθερή απόδοση πάνω στο εύρος ζώνης λειτουργίας. Η PDTEM δομή υλοποιείται σε μικροταινία και η γεωμετρία της είναι σχεδιασμένη για να ταιριάζει την αντίσταση εξόδου της κεραίας με την αντίσταση τροφοδοσίας (κανονικά 50 Ω) μειώνοντας τις χαρακτηριστικές αντιστάσεις των τμημάτων κατά μήκος του γραμμικού τμήματος της κεραίας. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιώντας πολυγωνική διηλεκτρική φόρτιση και ρυθμίζοντας τα πλάτη των τμημάτων των επιπέδων φτερών κατάλληλα, μπορεί κανείς να υλοποιήσει έναν αποδοτικό γεωμετρικά σχεδιασμό της TEM Horn κεραίας (βλέπε σχήμα 10 f). Αυτή η προσέγγιση είναι αρκετά αποδοτική για υψηλότερες συχνότητες όπου το ηλεκτρικό μήκος του γραμμικού τμήματος της κεραίας είναι αρκετά μεγάλο ώστε να μετασχηματίσει την αντίσταση εξόδου. Παρόλα αυτά, η αντίσταση εξόδου της κεραίας περισσότερο καθορίζει την επίδοση της προσαρμογής παρά η χαρακτηριστική αντίσταση. Μια extra ρυθμιζόμενη αντίσταση χρησιμοποιείται για να κρατήσει τα επίπεδα του λόγου στάσιμου κύματος σε λογικές τιμές στις χαμηλές συχνότητες. Τελικά, το κενό τροφοδοσίας καλύπτεται από ένα κομμάτι απορροφητή χαμηλής αγωγιμότητας για να βελτιώσει την ολική απόδοση του λόγου στάσιμου κύματος. Η δομή με μεταλλικούς βραχίονες είναι η έκδοση μειωμένου μετάλλου της PDTEM Horn κεραίας που προτείνεται για πολυαισθητήρια συστήματα (συνδυασμός GPR με ανιχνευτή μετάλλου), βλέπε σχήμα 14 e. Τυπικές ανακλάσεις και κέρδη κεραιών TEM, PDTEM horn και κεραιών horn ραβδώσεων παρουσιάζονται στα σχήματα 15 και 16.



Σχήμα 15. Σχεδιάγραμμα Λόγου Στάσιμου Κύματος PDTEM Horn Κεραίας ($L=10\text{cm}$, $\alpha=30^\circ$, $\theta=80^\circ$).



Σχήμα 16. Κέρδη Κεραίων Μεγάλου Εύρους Ζώνης GPR συστημάτων.

Η προσαρμογή σύνθετης αντίστασης είναι ένα κρίσιμο βήμα για τη βελτίωση του κέρδους της κεραίας και τη μείωση των φαινομένων ηχούς στο πεδίο του χρόνου. Εφόσον τα περισσότερα σήματα των παλμικών ραντάρ παράγονται από transistor με κατάσταση χιονοστιβάδας που παράγουν σχήματα παλμών εξαρτώμενα από την αντίσταση, η μεταβλητότητα της αντίστασης της κεραίας συναρτήσει της συχνότητας πρέπει να σταθεροποιηθεί με ένα κύκλωμα προσαρμογής. Επιπλέον, η δομή της κεραίας πρέπει να εξισορροπηθεί μέσω ενός εξισορροπητικού μετασχηματιστή – balun (balanced to unbalanced) transformer, ο οποίος έχει επαρκώς μικρό χρόνο ανόδου.

Οι κεραίες horn σταθερού κέρδους, οι κυματοδηγοί γεμισμένοι με διηλεκτρικό και τα πιάτα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα GPR συχνότητας. Όλα αυτά τα μοντέλα είναι υψηλού κέρδους, στενού λοβού ακτινοβολίας, επιλεκτικά ως προς τη συχνότητα και χρησιμοποιούνται από την L ως τη X ζώνη (από 1 μέχρι 10 GHz). Το τυπικό κέρδος για την κοινή horn κεραία είναι ~15 dBi πάνω σε μία 2-1 ζώνη συχνοτήτων. Για να αυξήσουμε την κατευθυντικότητα της κεραίας με ένα στενότερο λοβό ακτινοβολίας, είναι διαθέσιμο ένα μοντέλο που περιέχει τα κατάλληλα γεμίσματα με διηλεκτρικό. Για λειτουργίες GPR πολλών ζωνών μπορεί να επιλεγεί η κεραία horn ραβδώσεων που παράγει κέρδος ~10 dBi σε μία 10-1 ζώνη συχνοτήτων (σχήμα 13). Όταν το υψηλότερο δυνατό κέρδος και ο στενότερος λοβός ακτινοβολίας είναι απαραίτητα και το φυσικό μέγεθος της κεραίας δε μας περιορίζει (πχ. όπως στα φορητά συστήματα πάνω σε όχημα), η κεραία πιάτο είναι μια κατάλληλη λύση, με κέρδος ~30 dBi, που ικανοποιεί τις παραπάνω απαιτήσεις. Το ηλεκτρικό μέγεθος του πιάτου, ή παραβολικού κατόπτρου, όπως αλλιώς λέγεται, συνδέεται ευθέως με το κατευθυντικό κέρδος και τη γωνία μισής ισχύος (3dB) του κύριου λοβού (half power beamwidth - HPBW) όπως ακολούθως,

$$G = 20 \log\left(\frac{D}{\lambda}\right) + 9.94 \quad dBi \quad (12)$$

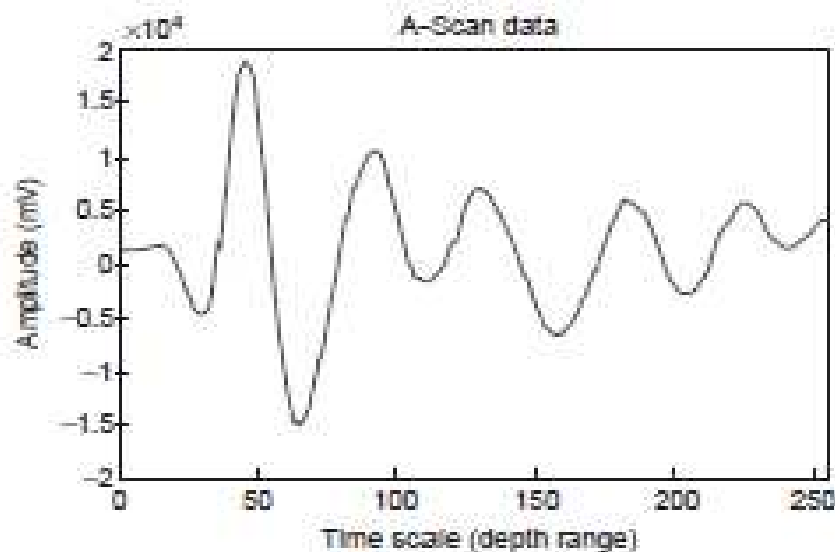
$$HPBW = \frac{180 \lambda}{\pi D} \quad \text{degrees} \quad (13),$$

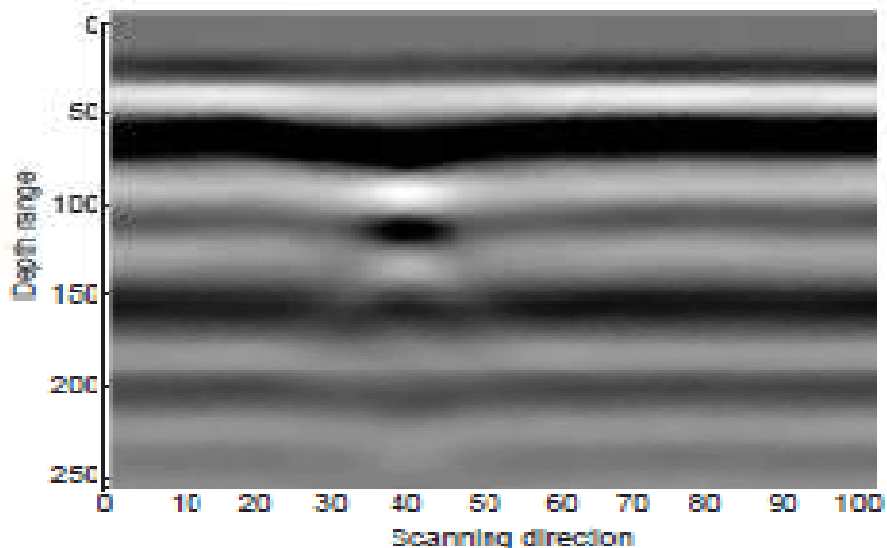
όπου G το κέρδος για 100% βαθμό απόδοσης της κεραίας και D η διάμετρος του κυκλικού πιάτου.

1.3.5 Τεχνικές Επεξεργασίας Σήματος

Η ανάπτυξη προηγμένων αλγορίθμων επεξεργασίας για δεδομένα GPR συστημάτων είναι πολύ σημαντική ώστε να επιτευχθεί υψηλή απόδοση στην ανίχνευση και αναγνώριση αντικειμένων. Οι μέθοδοι επεξεργασίας βασίζονται στη μετάφραση των παραμέτρων του προς τα πίσω σκεδαζόμενου σήματος : αυτές είναι το ύψος και η φάση για συνεχή, σάρωσης συχνότητας GPR και το σχήμα στο πεδίο του χρόνου του σήματος επιστροφής για τα παλμικά GPR. Και στις δύο περιπτώσεις το πλάτος παριστάνει πόση ισχύς επιστρέφει πίσω από το στόχο. Οι στιγμιαίες διακυμάνσεις ή η μεταβολή στη φάση μεταξύ του εκπεμπόμενου και λαμβανόμενου σήματος δείχνει το βάθος του στόχου. Για ραντάρ συνεχούς κύματος η διαφορά στη φάση μεταξύ του εκπεμπόμενου και λαμβανόμενου σήματος είναι αυτή που δείχνει το βάθος του στόχου. Η φάση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος αλλάζει καθώς αυτό διαδίδεται αναλογικά προς το μήκος κύματός του. Κατά συνέπεια κάθε απόσταση μήκους κύματος σημαίνει 360° διαφορά φάσης, αλλά δεν είναι εύκολο να βρεις την απόσταση του στόχου αν το μέσο είναι ανομοιογενές και με πολλές ανωμαλίες. Σ' αυτήν την περίπτωση, προηγμένοι αλγόριθμοι επεξεργασίας χρειάζονται για να υπολογιστούν οι επιθυμητές παράμετροι από τα δεδομένα που αφορούν τις ανομοιογενείς περιοχές.

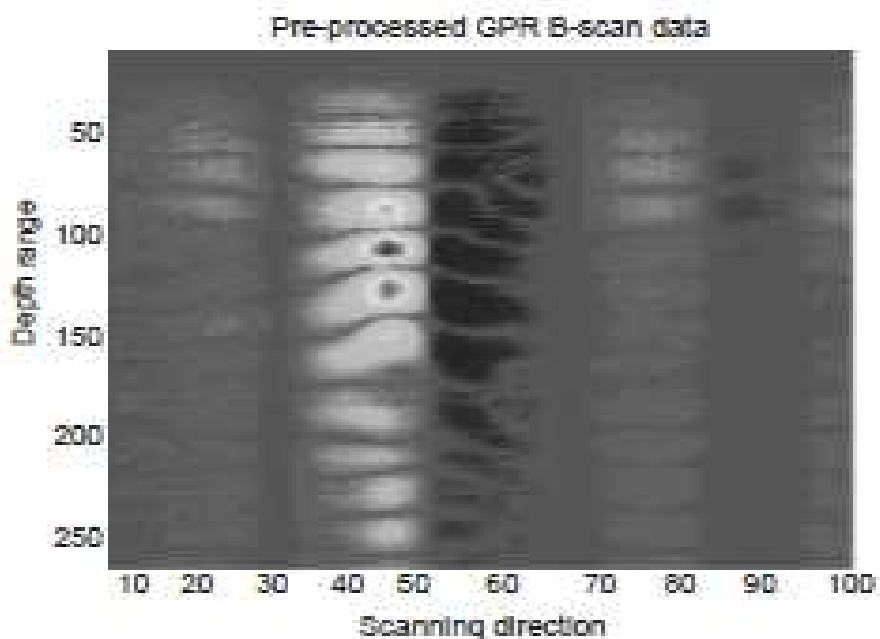
Στην περίπτωση παλμικών ραντάρ τα λαμβανόμενα σήματα συλλέγονται στην κατεύθυνση σάρωσης. Οι σειρές δεδομένων A-σάρωσης και B-σάρωσης αποκτώνται όπως φαίνεται στο σχήμα 17. Τα δεδομένα A-σάρωσης παριστάνουν τα λαμβανόμενα παλμικά σήματα για κάθε βήμα σάρωσης. Το διάγραμμα B-σάρωσης είναι απλά μια δισδιάστατη αναπαράσταση συνεχόμενων A-σαρώσεων στην περιοχή σάρωσης. Εδώ οι άξονες x και y παριστάνουν την κατεύθυνση σάρωσης και το χρόνο διάδοσης αντίστοιχα. Ο χρόνος επίσης αντιστοιχίζεται σε απόσταση, εφόσον το ηλεκτρομαγνητικό κύμα έχει ταχύτητα $u = 3 \times 10^8 / \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}$ (m/sec), όπου ϵ_r και μ_r αντίστοιχα είναι η σχετική διηλεκτρική σταθερά και η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του μέσου διάδοσης. Κατά συνέπεια, αν μια οποιαδήποτε ανωμαλία συμβεί κάτω απ' το έδαφος, το ύψος του σήματος αλλάζει στο πεδίο του χρόνου για να εκφράσει το σχετικό βάθος.

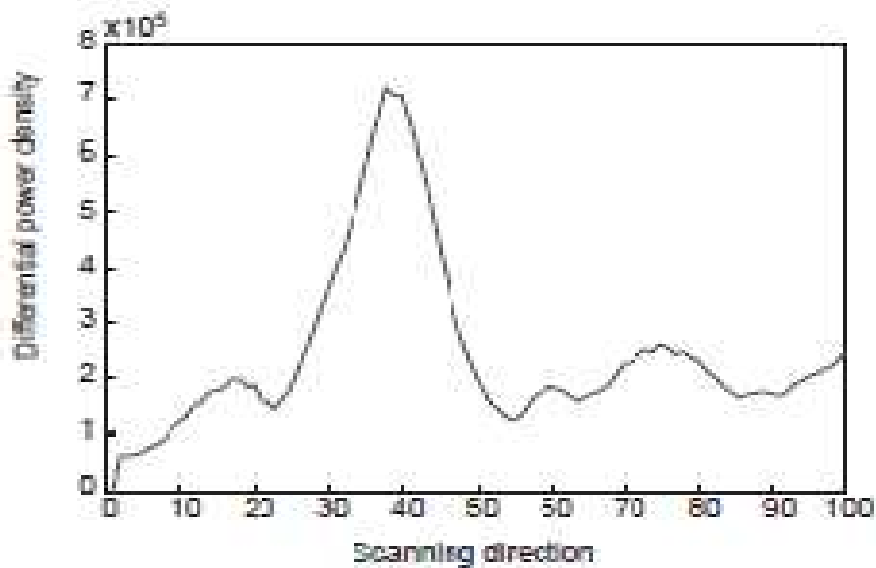




Σχήμα 17. Μετρούμενα Σειριακά Δεδομένα A και B Σάρωσης αντίστοιχα για Σύστημα Παλμικού GPR.

Όταν το έδαφος είναι άγνωστο, ανομοιογενές και υπάρχουν πολλά ανεπιθύμητα αντικείμενα, η ανίχνευση και διάκριση του στόχου θα είναι ένα δύσκολο πρόβλημα. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι βασίζονται στον υπολογισμό του φόντου-περιβάλλοντος χώρου, την ανάλυση έντασης ισχύος και την επεξεργασία των δεδομένων σε διαφορετικές ζώνες συχνότητας. Ο κύριος στόχος είναι να βρεθεί το αντικείμενο τονίζοντας τις ανωμαλίες του υπεδάφους. Για τον υπολογισμό και αφαίρεση του φόντου μια μέση A-σάρωση υπολογίζεται από πολλά δεδομένα που δεν περιέχουν κανένα στόχο και ύστερα αυτή η μέση τιμή λαμβάνεται ως αναφορά. Οι κανονικές σαρώσεις του στόχου υπολογίζονται σε σχέση με την αναφορά. Δηλαδή τα δεδομένα του GPR διατίθενται προς επεξεργασία μετά την αφαίρεση του φόντου, σχήμα 18. Περαιτέρω επεξεργασία μπορεί να γίνει σε διάφορες ζώνες συχνότητας ξεχωριστά. Το πλεονέκτημα της επεξεργασίας σε ζώνες είναι ότι επιτρέπει να λάβουμε υπόψη μας τις διαφορετικές αποκρίσεις στόχων και clutter σε κάθε συχνότητα. Για παράδειγμα, η μέση τιμή των προς ανίχνευση αντικειμένων μπορεί να υπολογιστεί για κάθε ζώνη και μερικοί αλγόριθμοι συσχέτισης μπορούν να διακρίνουν και να ταξινομήσουν τα ανιχνευθέντα αντικείμενα.





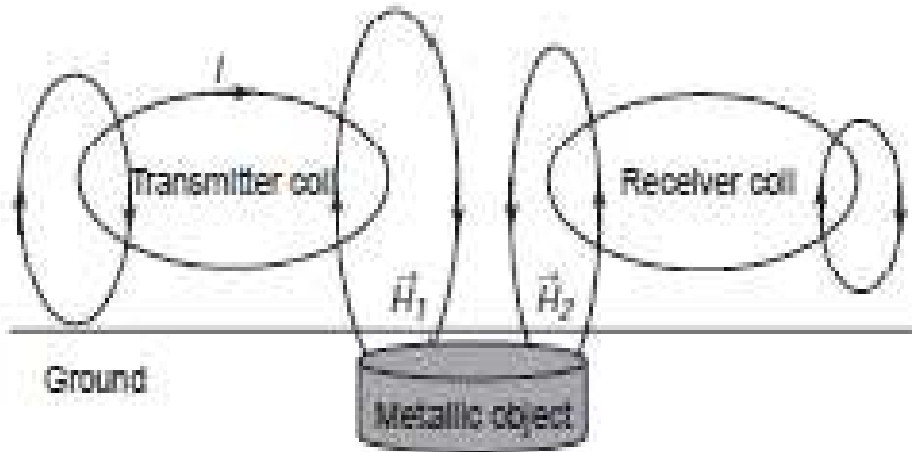
Σχήμα 18. Επεξεργασμένα Δεδομένα Α και Β Σάρωσης Παλμικού Ραντάρ.

1.4 Αισθητήρες Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής – Electromagnetic Induction (EMI) Sensors

1.4.1 Επισκόπηση

Η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, που είναι η βάση για τους ανιχνευτές μετάλλων, είναι μια από τις διάφορες αισθητήριες μεθόδους που χρησιμοποιούνται ευρέως για ανίχνευση και αναγνώριση θαμμένων αντικειμένων στο υπέδαφος. Η βασική τεχνολογία είναι πολύ ώριμη. Οι αισθητήρες EMI έχουν χρησιμοποιηθεί για εξερεύνηση ορυχείων κατά τη διάρκεια του Α΄ Παγκοσμίου Πολέμου και οι ανιχνευτές μετάλλου EMI αναπτύχθηκαν περαιτέρω στον Β΄ Παγκόσμιο. Κατόπιν, η χρήση EMI αισθητήρων προσανατολίστηκε στην ανίχνευση αγώγιμων αντικειμένων σε άλλα πεδία εφαρμογών, όπως εκμετάλλευση μεταλλευμάτων, μεθόδων εξετάσεων του ανθρώπινου σώματος μη καταστρεπτικές για τους ιστούς, διερεύνηση αρχαιολογικών χώρων και ανάπτυξη μεθόδων ασφαλείας.

Η αρχή λειτουργίας των αισθητήρων EMI είναι η εκπομπή ενός μεταβλητού στο πεδίο του χρόνου ηλεκτρομαγνητικού κύματος που επάγει ρεύματα σε οποιοδήποτε μεταλλικό αντικείμενο διαπερνά. Όταν το πεδίο αυτό σταματήσει απότομα, δινορεύματα στο μεταλλικό αντικείμενο παράγουν ένα δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που μετράτε από το δέκτη. Το εύρος των συχνοτήτων λειτουργίας γενικά περιορίζεται σε μερικές δεκάδες kHz. Οι EMI αισθητήρες γενικά αποτελούνται από ένα ζεύγος πηνίων πομπού και δέκτη, βλέπε σχήμα 19. Μία ροή ρεύματος στο πηνίο του πομπού παράγει το κύριο πεδίο και η κυματομορφή που εκπέμπεται είναι συχνά ένα σήμα μεγάλου εύρους ζώνης, είτε μεμονωμένοι παλμοί ή ένα συνεχόμενο σήμα. Το εκπεμπόμενο πεδίο επάγει ένα δευτερεύον ρεύμα στην επιφάνεια της γης, όπως επίσης και σε κάθε θαμμένο αγώγιμο αντικείμενο. Αυτό το δευτερογενές ρεύμα συνήθως ανιχνεύεται από την τάση που επάγεται στο ίδιο ή σε άλλο πηνίο-δέκτη. Στην περίπτωση εκπομπής παλμών, η εκπεμπόμενη κυματομορφή σβήνει γρήγορα και το πηνίο του δέκτη μετράει το φθίνον δευτερογενές πεδίο που έχει δημιουργηθεί από επαγωγή από την επιφάνεια της γης και τα αντικείμενα του υπεδάφους. Στην περίπτωση συνεχούς κυματομορφής το πηνίο του δέκτη τοποθετείται μέσα σε μία μαγνητική κοιλότητα ώστε να ανιχνεύει μόνο το αδύναμο δευτερογενές πεδίο που εκπέμπεται από την επιφάνεια και τους θαμμένους στόχους.



Σχήμα 19. Σύστημα Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής.

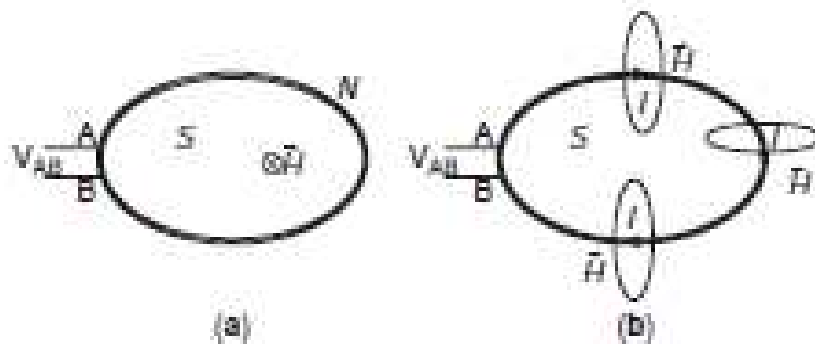
1.4.2 Θεωρία Λειτουργίας

Η επίδοση ανίχνευσης ενός EMI αισθητήρα εξαρτάται κυρίως από τις παραμέτρους του συστήματος, και συγκεκριμένα, από τα επίπεδα του κύριου μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από το πηνίο του πομπού, την απόσταση του στόχου, τη δυνατότητα του στόχου να δημιουργεί δινορεύματα και τα χαρακτηριστικά του πηνίου του δέκτη. Υποθέτοντας ότι τα πεδία είναι εξαρτώμενα από το χρόνο και ότι η θέση των πηνίων είναι σταθερή ($\frac{\partial S}{\partial t}=0$), οι λόγοι ρεύμα προς μαγνητικό πεδίο για τον πομπό και πεδίο προς τάση για τον δέκτη υπολογίζονται από τις σχετικές εξισώσεις του Maxwell που δίνονται στις (15) και (16):

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \Rightarrow \oint_c E dl = -\mu \int_S \frac{\partial H}{\partial t} dS \Rightarrow V_{AB} = i 2 \pi f \mu N H S \cos \varphi \quad (15)$$

$$\nabla \times H = J + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \Rightarrow \oint_c H dl = \int_S J dS + \varepsilon \int_S \frac{\partial E}{\partial t} dS \Rightarrow \oint_c H dl = I \quad (16)$$

, όπου E είναι το ηλεκτρικό πεδίο, H το μαγνητικό πεδίο, f η συχνότητα, N ο αριθμός των ελιγμάτων, S η επιφάνεια του πηνίου, J η χωρική πυκνότητα ρεύματος, I το ρεύμα του πηνίου, φ η γωνία μεταξύ του πεδίου και του διανύσματος που παριστάνει την επιφάνεια του πηνίου, (ε,μ) η διηλεκτρική σταθερά και η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού του πηνίου και V_{AB} η επαγόμενη τάση, βλέπε σχήμα 20:



Σχήμα 20. Σχηματική Αναπαράσταση των Αρχών Λειτουργίας των Πηνίων α) του Πομπού και β) του Δέκτη.

Η σχέση (15) υποδεικνύει ότι η ευαισθησία του πηνίου αυξάνεται με τη συχνότητα λειτουργίας, τον αριθμό των ελιγμάτων του πηνίου, τη μαγνητική διαπερατότητα του φερρίτη του πηνίου και την ενεργό επιφάνεια του πηνίου. Το φυσικό σχήμα των πηνίων είναι επίσης σημαντικό για την ικανότητα ανίχνευσης όσον αφορά την ενεργό επιφάνεια του πηνίου και το σχήμα του πεδίου. Το πλάτος του πεδίου είναι αντιστρόφως ανάλογο της απόστασης. Αφού οι EMI αισθητήρες χρησιμοποιούν πολύ χαμηλές συχνότητες, η ανάκλαση από την επιφάνεια του εδάφους και οι απώλειες του εδάφους είναι πολύ ασθενείς τιμές. Παρόλα αυτά, συγκεκριμένοι τύποι εδάφους που περιέχουν αγωγιμα και μαγνητικά μόρια και σωματίδια μπορούν να προκαλέσουν κάποια εξασθένηση και μπορούν να υπάρξουν υψηλά επίπεδα "ακαταστασίας" από τα σκόρπια ανεπιθύμητα μικροαντικείμενα. Τα διννορεύματα που δημιουργούνται πάνω σε ένα αντικείμενο και κατά συνέπεια το επαγόμενο από αυτά πεδίο εξαρτώνται από το μέγεθος, το σχήμα και τη σύστασή του. Σαν αποτέλεσμα, διαφορετικά αντικείμενα έχουν και διαφορετικές επαγωγικές αποκρίσεις. Τα βασικά ερωτήματα είναι κατά συνέπεια πόση πληροφορία μπορούμε να αντλήσουμε για το αντικείμενο από την επαγωγική του απόκριση και αν αυτή η πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ξεχωρίσουμε το στόχο από το περιβάλλον. Τα αντικείμενα που περιέχουν μεταλλικά στοιχεία σε μεγάλο βαθμό θα παράγουν φυσικά και πιο ισχυρά διννορεύματα και δευτερογενή πεδία στο δέκτη, αλλά η γεωμετρία του στόχου όσον αφορά τη γωνία σε σχέση με το διάνυσμα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου θα είναι επίσης ένας πολύ σημαντικός παράγοντας της ευαισθησίας του συστήματος.

1.4.3 Απόδοση του Συστήματος

Οι δυνατότητες ανίχνευσης του συστήματος είναι ένα γενικά γνωστό παραμετρικό πρόβλημα, όπως επισημάνθηκε στα παραπάνω. Είναι δυνατόν να ανιχνευθεί ένα οσοδήποτε μικρό μεταλλικό (ή περιέχον μεταλλικά στοιχεία) αντικείμενο αν το επιτρέπουν οι περιορισμοί σηματοθορυβικού λόγου του συστήματος. Η εξίσωση της δυνατότητας ανάλυσης δεν είναι τόσο πολύπλοκη όπως στα GPR. Για παράδειγμα, οι παράμετροι της εξασθένησης του εδάφους και των απωλειών ανάκλασης δεν είναι τόσο ισχυρές ώστε να επηρεάσουν την επίδοση του συστήματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις το ποσό του περιεχομένου σε μέταλλο είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας επίδοσης. Τα πειραματικά δεδομένα του σχήματος 4 δείχνουν ότι η μετρούμενη τάση στο δέκτη (αφού την ξεχωρίσουμε από την απευθείας τάση που δημιουργείται από τον πομπό) είναι 3000, 450 και 50 mV για σφαιρικά αλουμινένια αντικείμενα, διαμέτρου 15mm, 8mm και 5mm αντίστοιχα. Οι τιμές αυτών των σχημάτων μειώνονται στο μισό για τις ίδιες διαμέτρους, όταν τα αντικείμενα είναι σιδερένια.

Η επιδίωξη των αισθητήρων επαγωγής δεν αφορά μόνο την ανίχνευση μεταλλικών αντικειμένων αλλά και τη διάκρισή τους από το ανεπιθύμητο περιβάλλον. Η παραδοσιακή τεχνική ανίχνευσης βασίζεται στον υπολογισμό της ενέργειας του δευτερογενούς πεδίου με στόχο την απόφαση αναφορικά με την ύπαρξη ή όχι αντικειμένου. Σε μερικές φυσικές εφαρμογές, αυτή η προσέγγιση μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολικά μεγάλο αριθμό λανθασμένων συναγερμών, εξαιτίας των μεταλλικών μικροαντικειμένων διάσπαρτων στο έδαφος. Αρκετές τροποποιήσεις της κλασικής μεθόδου έχουν προταθεί ούτως ώστε να επιτευχθεί διάκριση και κατηγοριοποίηση του στόχου. Η λειτουργία μεγάλου εύρους ζώνης είναι μια από τις πιο υποσχόμενες μεθόδους. Σ' αυτήν την τεχνική χρησιμοποιείται η εξαρτώμενη από τη συχνότητα απόκριση του επαγόμενου πεδίου από το αγωγιμο αντικείμενο για να διακριθεί ο στόχος από το περιβάλλον. Ένας άλλος τρόπος είναι να χρησιμοποιηθεί ένα απλό φαινομενολογικό (που αναφέρεται στη συστηματική μελέτη των δεδομένων) μοντέλο που περιγράφει τη μετρούμενη κυματομορφή στο πεδίο του χρόνου ως ένα άθροισμα βαρών εξασθενούμενων εκθετικών συναρτήσεων, ούτως ώστε να παρέχει

μια ακριβή τεχνική αισθητήρων επαγωγής. Η μετρούμενη απόκριση μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν ένα άθροισμα εξασθενούμενων εκθετικών σημάτων των οποίων οι χαρακτηριστικοί ρυθμοί εξασθένισης είναι εγγενείς με τα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου στόχου. Αφού οι ρυθμοί εξασθένισης δεν εξαρτώνται από τον προσανατολισμό του στόχου, ο υπολογισμός του ρυθμού εξασθένισης φαίνεται να είναι μια άρτια και αποδοτική μέθοδος διακριτοποίησης. Εν γένει, οι ρυθμοί εξασθένισης που συνδέονται με μεταλλικά αντικείμενα είναι πιο αργοί από αυτούς της επιφάνειας του εδάφους. Έτσι όταν ένα μεταλλικό αντικείμενο είναι παρών κάτω από την επιφάνεια υπάρχει περισσότερη ενέργεια στο λαμβανόμενο σήμα. Αυτή η απλή παρατήρηση επιτρέπει τη χρήση πολύ απλών μεθόδων επεξεργασίας σήματος; για παράδειγμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ή ένας ανιχνευτής ενέργειας ή να μετρηθεί το ολικό πλάτος του σήματος μέσα σε ένα δεδομένο χρονικό παράθυρο. Παρόλα αυτά τέτοια είδους επεξεργασία μπορεί να είναι η πηγή λανθασμένων συναγερωμών σε εδάφη μεγάλης περιεκτικότητας σε διάσπαρτα μεταλλικά στοιχεία.

1.5 Ακουστικοί και Σεισμικοί Αισθητήρες

1.5.1 Επισκόπηση

Οι περισσότερες τεχνολογίες για την ανίχνευση ρηχά θαμμένων αντικειμένων είναι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι. Μετρούν τη διαφορά σε περιεκτικότητα σιδήρου, ηλεκτρική αγωγιμότητα ή διηλεκτρική σταθερά μεταξύ των αντικειμένων και του εδάφους στο οποίο είναι θαμμένα. Τα πλαστικά αντικείμενα παρουσιάζουν λίγες ή καθόλου διαφορές εξαιτίας της μη αγωγίμης σύστασής τους. Έχουν διηλεκτρικές σταθερές που είναι πολύ χαμηλές, πολύ κοντά στη διηλεκτρική σταθερά του ξηρού εδάφους. Αυτό το γεγονός καθιστά αυτά τα αντικείμενα πολύ δύσκολα στην ανίχνευση από τις προηγούμενες τεχνολογίες. Η ηχητική τους επιθετικότητα, από την άλλη, τα καθιστά εύκολα ανιχνεύσιμα από ακουστικές και σεισμικές τεχνολογίες. Αυτές οι μέθοδοι αναζητούν τα θαμμένα αντικείμενα προκαλώντας την ταλάντωσή τους εισάγοντας ακουστικά ή σεισμικά κύματα στο έδαφος. Καθώς υλικά με διαφορετικές ιδιότητες πάλλονται διαφορετικά, η κατηγορία της κίνησης του εδάφους οδηγεί στην ανίχνευση και πιθανόν στην αναγνώριση του θαμμένου αντικειμένου.

Οι σεισμικοί αισθητήρες παρέχουν ένα μέσο αίσθησης από απόσταση των μηχανικών ιδιοτήτων των θαμμένων αντικειμένων. Οι σεισμικές τεχνολογίες συνήθως εφαρμόζονται στην αναζήτηση πετρελαίου. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε τέτοιες εφαρμογές είναι σχεδιασμένος μόνο για να αναγνωρίζει τα διάφορα γεωλογικά στρώματα ή χρησιμοποιεί τεχνικές πεδίου πολύ ακριβές για να εφαρμοστούν. Οι σειсмоγράφοι παρέχουν μία φθηνή λύση για να καταγράψουμε σεισμικά δεδομένα και έτσι να ανιχνεύσουμε θαμμένα αντικείμενα. Η κύρια δυσκολία σε αυτήν την προσέγγιση είναι να δημιουργήσουμε καθαρά Rayleigh κύματα. Επίσης οι σειсмоγράφοι πρέπει να έχουν επαφή με το έδαφος για να πραγματοποιήσουν τις μετρήσεις. Αυτό δεν είναι επιθυμητό για ανίχνευση στόχων που περιέχουν εκρηκτικά.

Η σεισμική κίνηση μπορεί επίσης να δημιουργηθεί από ένα ακουστικό κύμα παραγόμενο στον αέρα. Ένα μεγάφωνο πάνω από το έδαφος μπορεί να χρησιμοποιηθεί γι' αυτό το σκοπό. Ένα φαινόμενο που αποκαλείται ακουστική-σε-σεισμική-μετατροπή συμβαίνει όταν το παραγόμενο στον αέρα κύμα φθάνει στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτός ο όρος αναφέρεται στη μετάδοση της ηχητικής ενέργειας στο έδαφος σα σεισμική κίνηση. Η ακουστική-σε-σεισμική-μετατροπή προκαλεί τα μόρια στην επιφάνεια του εδάφους να πάλλονται. Πιο πρόσφατες τεχνικές χρησιμοποιούν ένα laser Doppler καταγραφέα παλμών - laser Doppler vibrometer (LDV) για να μετρήσουν και να μελετήσουν τη χωρική κατανομή του μεγέθους της ταχύτητας των μορίων στην επιφάνεια. Μία ποικιλία αισθητήρων, όπως

ραντάρ, μικρόφωνα και υπερηχητικές συσκευές έχουν δοκιμαστεί στην ανίχνευση των ταλαντώσεων και του ανακλώμενου ήχου.

Υπάρχουν τρεις κύριες προσεγγίσεις στην ακουστική ανίχνευση θαμμένων αντικειμένων :

1. Η γραμμική ακουστική τεχνική. Αυτή η τεχνική έχει αποδειχθεί εξαιρετικά ακριβής στον εντοπισμό θαμμένων μεταλλείων. Σ' αυτήν την τεχνική, ένα μεγάφωνο ρίχνει ακουστικό θόρυβο μεγάλου εύρους ζώνης πάνω στο έδαφος και ένα laser Doppler ταχύμετρο (LDV) εφοδιασμένο με X-Y κάτοπτρα σάρωσης χρησιμοποιείται για να ανιχνεύσει αυξημένες ταλαντώσεις στην περιοχή μελέτης.

2. Η μη γραμμική ακουστική τεχνική. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί ένα απλό μικρόφωνο για να οδηγήσει δύο ηχοτονικές διεγέρσεις που παρέχουν το κύμα το οποίο θα δημιουργήσει τη μετατροπή αέρα εδάφους. Ένα επιταχυνσίμετρο χρησιμοποιείται για να μετρήσει την επιτάχυνση της επιφάνειας.

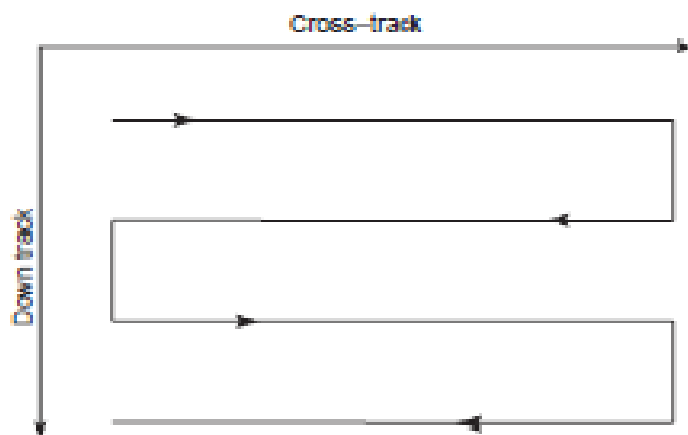
3. διεγέρσεις ελαστικών κυμάτων και μέτρηση επιφανειακής μετακίνησης. Το κύριο αντικείμενο αυτής της προσέγγισης είναι να διεγείρει ελαστικά κύματα στο έδαφος και μετά να μετρήσει τις κινήσεις της επιφάνειας. Χρησιμοποιεί ένα ηλεκτροδυναμικό σείστρο για να δημιουργήσει τα κύματα. Καθώς τα κύματα διαδίδονται διαμέσου μιας περιοχής μελέτης, οι κινήσεις της επιφάνειας μετρούνται με τη χρήση ενός ραντάρ.

1.5.2 Γραμμικές Ακουστικές Τεχνικές

Τα ακουστικά-σεισμικά συστήματα προτάθηκαν από τον Σαμπατιέ και άλλους. Έχουν δώσει μεγάλες υποσχέσεις στην ανίχνευση μεταλλείων με μικρές συγκεντρώσεις σε μέταλλο. Σε αυτά τα συστήματα ένα μεγάφωνο δημιουργεί ακουστικά κύματα σε μια επιφάνεια πάνω από το στόχο. Η ηχητική ενέργεια μεταδίδεται μέσα στο έδαφος προκαλώντας ταλαντώσεις. Η ταχύτητα των ταλαντώσεων της επιφάνειας μετράται με ένα laser Doppler μετρητή ταλαντώσεων (LDV) σε αρκετές θέσεις πάνω σε μια ορθογώνια περιοχή. Η έξοδος του συστήματος για μία μόνο χωρική θέση είναι μια συλλογή ταχυτήτων σε ένα σετ συχνοτήτων, τυπικά από 100 μέχρι 300 Hz για μεγάλα αντικείμενα και από 100 μέχρι 1000 Hz για μικρά αντικείμενα. Τα δεδομένα που συλλέγονται σε μια περιοχή δημιουργούν μια τρισδιάστατη (3D) εικόνα. Αυτή η τρισδιάστατη εικόνα μπορεί να θεωρηθεί ως μια στοίβα από δισδιάστατες εικόνες που αποκαλούνται φασματικές εικόνες. Αυτές τις φασματικές εικόνες μπορούμε να τις δούμε ως την ταλαντούμενη ενέργεια στο έδαφος πάνω από το θαμμένο αντικείμενο σε διάφορες συχνότητες. Η ανάλυση αυτών των εικόνων οδηγεί στην ανίχνευση και προσδιορισμό των θαμμένων στόχων. Υπάρχουν τρεις διαφορετικές εκδόσεις των γραμμικά ακουστικών συστημάτων που προτάθηκαν από το Σαμπατιέ και άλλους :

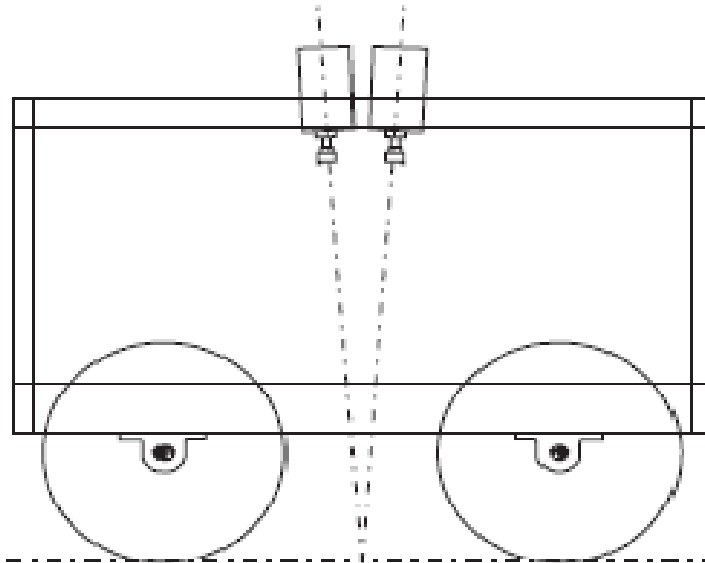
1. Η πρώτη έκδοση χρησιμοποιεί ένα σχήμα συλλογής δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικές θέσεις μελέτης. Ο LDV συλλέγει τα δεδομένα μετρώντας σε μία θέση και στη συνέχεια μετρώντας σε μια διπλανή αυτής. Με αυτή τη διαδικασία σαρώνεται τελικά ολόκληρη η περιοχή ενδιαφέροντος. Τα δεδομένα συλλέγονται με μία προκαθορισμένη χωρική ανάλυση που προφανώς εξαρτάται από το μέγεθος των προς μελέτη αντικειμένων. Σαν κανόνας, η χωρική ανάλυση επιλέγεται έτσι ώστε τρεις κατ'ελάχιστον χωρικές θέσεις να σαρώνονται κατά μήκος του κύριου άξονα του αντικειμένου ούτως ώστε να αυξηθεί ο ρυθμός ανίχνευσης. Ο χρόνος σάρωσης γι' αυτόν τον τύπο συλλογής δεδομένων μπορεί να είναι πολύ αργός για ορισμένες εφαρμογές, όπως ανίχνευση μεταλλείων, όπου απαιτούνται μεγάλες ταχύτητες σάρωσης.

2. Μια γρηγορότερη έκδοση γραμμικού ακουστικού συστήματος σκανάρει μια περιοχή χωρίς να σταματά. Μια ακτίνα laser σαρώνει συνεχώς μια περιοχή κινούμενη πίσω μπρος, όπως φαίνεται στο σχήμα 21. Η κατά πλάτος χωρική ανάλυση ρυθμίζεται λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος του προς αναζήτηση αντικειμένου. Όμως η χωρική ανάλυση κατά την κατεύθυνση της κίνησης εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη τεχνική απεικόνισης και από την ταχύτητα της σάρωσης. Αντίθετα με το προηγούμενο σύστημα, οι φασματικές εικόνες δεν είναι αμέσως διαθέσιμες. Η μετατροπή των δεδομένων από το πεδίο του χρόνου σε φασματικές εικόνες είναι ένα κρίσιμο βήμα σ' αυτήν τη δεύτερη προσέγγιση. Η ταχύτητα σάρωσης στη μέθοδο με την ακτίνα σάρωσης είναι συμπερασματικά μεγαλύτερη από αυτήν της μεθόδου με παύσεις.



Σχήμα 21. Σχέδιο Σάρωσης με Laser – Μέτρηση της Ταχύτητας των Ταλαντώσεων του Εδάφους.

3. Μια ακόμη μεγαλύτερη ταχύτητα σάρωσης επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μια σειρά ανιχνευτών τοποθετημένων πάνω σε μια κινούμενη πλατφόρμα. Η σάρωση της περιοχής πραγματοποιείται με την κίνηση της πλατφόρμας. Οι ανιχνευτές στην πλατφόρμα τοποθετούνται έτσι ώστε ο καθένας να δείχνει σε μια ξεχωριστή θέση κατά μήκος μιας γραμμής σάρωσης και είναι τοποθετημένοι εναλλάξ, όπως φαίνεται στο σχήμα 22. Καθώς η πλατφόρμα κινείται, κάθε ανιχνευτής σκανάρει την περιοχή κατά μήκος του μονοπατιού του. Αφού το σύστημα χρησιμοποιεί περισσότερους από έναν ανιχνευτές, μπορεί να υπάρξει πρόβλημα εξομάλυνσης εξαιτίας της μη μοναδικότητας των ανιχνευτών.



Σχήμα 22. Διάταξη LDV Ανιχνευτών Πάνω σε Κινούμενη Πλατφόρμα.

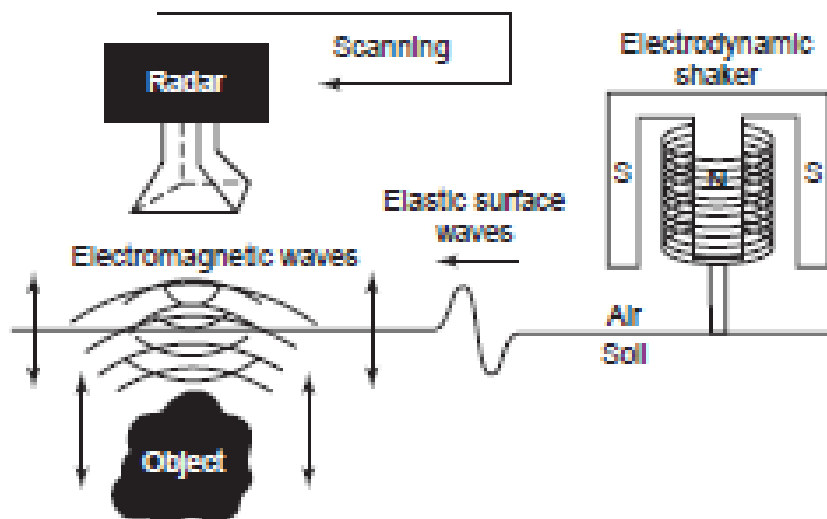
1.5.3 Μη Γραμμικές Ακουστικές Τεχνικές

Η μη γραμμική ακουστική τεχνική, που προτάθηκε από τον Donskoy, χρησιμοποιεί ακουστικό σήμα διπλής συχνότητας (f_1 και f_2) που εκπέμπεται προς το θαμμένο στόχο. Βασίζεται στη λήψη ενός σήματος που παράγεται στην επιφάνεια του στόχου. Αυτό το σήμα λήψης περιέχει συχνότητες διαφορετικές από αυτές του αρχικά εκπεμπόμενου σήματος. Ο ήχος διπλής συχνότητας κάνει το αντικείμενο να εκπέμπει σήμα στις συχνότητες εσωτερικής διαμόρφωσης ($f_1 \pm f_2$). Κατά συνέπεια, η παρουσία διαφορετικής συχνότητας στο σήμα λήψης υποδεικνύει την παρουσία αντικειμένου. Μερικά στερεά αντικείμενα, όπως τούβλα, χαλύβδινοι δίσκοι, ρίζες δένδρων και βράχοι, δεν εκπέμπουν νέο σήμα σε διαφορετικές συχνότητες. Αυτό καθιστά εύκολη τη διαφοροποίηση συγκεκριμένων στόχων από το υπόλοιπο περιβάλλον.

Η δυναμική συμπεριφορά των θαμμένων αντικειμένων εξαρτάται κατά πολύ από τη σκληρότητά τους, αλλά και από αυτή του εδάφους. Η σκληρότητα των στερεών αντικειμένων, όπως βράχοι και σράπνελ, είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από αυτή του χώματος στο οποίο είναι θαμμένα. Το βάθος τους επίσης επηρεάζει τη σκληρότητά τους. Η σκληρότητα αυξάνεται αναλογικά με το βάθος. Όταν η σκληρότητα του αντικειμένου είναι πολύ υψηλότερη από αυτή του χώματος, η μη γραμμική κίνηση δεν είναι παρατηρήσιμη· είναι μάλλον γραμμική κίνηση. Γι' αυτό το λόγο, η μη γραμμική μέθοδος δεν είναι ευαίσθητη σε τέτοια στερεά αντικείμενα και βαθιά θαμμένους στόχους. Ο Donskoy εξηγεί αυτό το φαινόμενο μοντελοποιώντας το θαμμένο αντικείμενο σαν ένα σύστημα μάζας-ελατηρίου. Αυτό το μοντέλο συζητιέται στην ενότητα 5.5.1.

1.5.4 Σύγχρονη Χρήση Ελαστικών και Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων

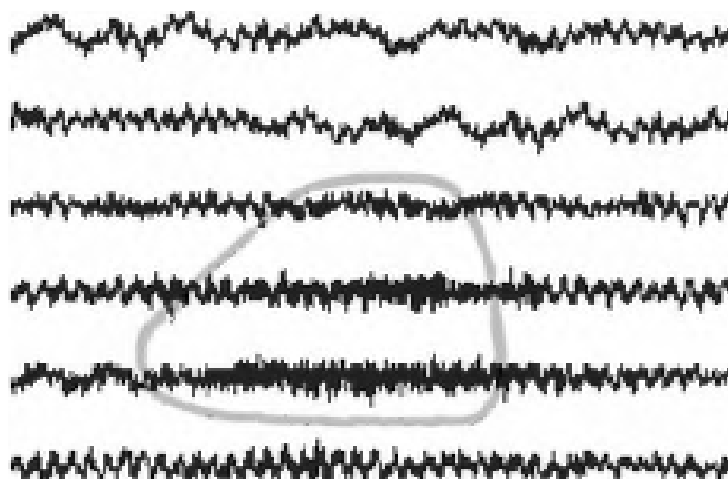
Το σύστημα ανίχνευσης που προτάθηκε από τον Scott και άλλους χρησιμοποιεί συγχρόνως ελαστικά και ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Ελαστικά επιφανειακά κύματα δημιουργούνται χρησιμοποιώντας ένα μετατροπέα ελαστικών κυμάτων που είναι ένα ηλεκτροδυναμικό σειστρο σε άμεση επαφή με το έδαφος, βλέπε σχήμα 23. Το σειστρο διεγείρεται με ένα διαφοροποιημένο Gauss παλμό με κεντρική συχνότητα στα 400 Hz. Τα κύματα διαδίδονται κατά μήκος της περιοχής που εξετάζεται. Ένας αισθητήρας ραντάρ χρησιμοποιείται για να μετρήσει τις επιφανειακές μετατοπίσεις του εδάφους στην περιοχή σάρωσης. Οι μετατοπίσεις της επιφάνειας μετρώνται σε συνάρτηση του χρόνου και της θέσης. Η ευαισθησία του ραντάρ είναι τυπικά γύρω στο 1 nm. Όπως και στις γραμμικές και μη γραμμικές ακουστικές τεχνικές, έτσι και εδώ, η τεχνική βασίζεται στην εύκαμπτη μηχανική δομή του αντικειμένου ώστε αυτό να ανιχνευθεί. Αν το αντικείμενο είναι στέρεο και μη εύκαμπτο, τότε δε θα παρουσιάσει ηχητική απόκριση. Οι ταλαντώσεις της επιφάνειας, σ' αυτήν την περίπτωση, δεν είναι πιθανόν ότι θα προσφέρουν στην ανίχνευση του θαμμένου αντικειμένου. Μ' αυτήν την τεχνική μπορούν να ανιχνευθούν εύκαμπτα αντικείμενα, όπως πλαστικοί σωλήνες. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και όταν η επιφάνεια του εδάφους είναι καλυμμένη με βλάστηση. Έχουν επίσης μελετηθεί πηγές ηλεκτρικού τόξου και ακουστικές πηγές από αέρος προς αντικατάσταση του ηλεκτροδυναμικού σειστρου.



Σχήμα 23. Χρήση Ελαστικών και Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων για Ανίχνευση Αντικειμένου.

1.5.5 Αλγόριθμοι Ανίχνευσης

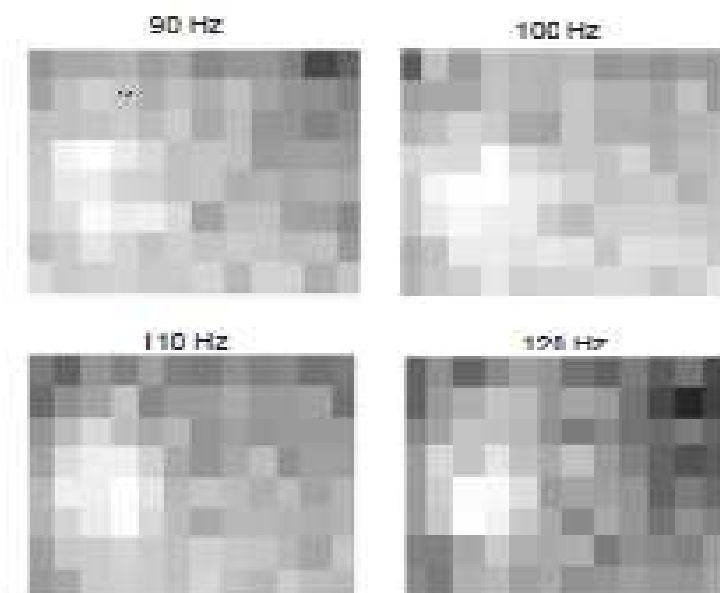
Ένα σημαντικό βήμα στην ανίχνευση αντικειμένου με ακουστικές/σεισμικές τεχνολογίες είναι να επεξεργαστείς τα δεδομένα. Τα σημεία επεξεργασίας για την ανίχνευση εξαρτώνται από τα λαμβανόμενα δεδομένα, τον τύπο του αισθητήρα, τον τύπο του εδάφους, τον τύπο του στόχου και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Για παράδειγμα, τα δεδομένα μπορεί να έχουν ληφθεί είτε στο πεδίο του χρόνου, είτε στο πεδίο της συχνότητας και αυτό μπορεί να απαιτεί την εφαρμογή διαφορετικών επεξεργαστικών βημάτων για την προετοιμασία της περαιτέρω επεξεργασίας. Το σχήμα 24 δείχνει μια έξοδο αισθητήρα στο πεδίο του χρόνου. Κάθε γραμμή παριστάνει τα λαμβανόμενα σήματα κατά μήκος μιας γραμμής σάρωσης.



Σχήμα 24. Παραγόμενα Σήματα στο Πεδίο του Χρόνου από LDV Μετρήσεις Συστήματος Ακουστικής/Σεισμικής Ανίχνευσης.

Η θέση του θαμμένου αντικειμένου παριστάνεται με την αχνή γραμμή στο ίδιο σχήμα. Ένας αριθμός τεχνικών απεικόνισης, όπως ο σύντομος FFT και η μέθοδος Yule-Walker, μπορούν να εφαρμοστούν για να πάρουμε φασματικές εικόνες. Από την άλλη, σε μερικές

περιπτώσεις, μπορούμε απευθείας να πάρουμε εικόνες στην περιοχή της συχνότητας από το δέκτη, όπως φαίνεται στο σχήμα 25. Στα δείγματα των φασματικών εικόνων που φαίνονται στο σχήμα, το θαμμένο αντικείμενο είναι θαμμένο στο κάτω δεξιό μέρος ενός πλέγματος 8cm X 12cm με χωρική ανάλυση 2cm.



Σχήμα 25. Παραγόμενα Σήματα στο Πεδίο της Συχνότητας από LDV Μετρήσεις Συστήματος Ακουστικής/Σεισμικής Ανίχνευσης.

Αν χρησιμοποιούνται πολλαπλοί αισθητήρες για να συλλέξουν τα δεδομένα κάθε γραμμής στα σχήματα 24 και 25, τότε ίσως είναι απαραίτητο ένα επεξεργαστικό βήμα που να αντισταθμίζει τα κανάλια, αν οι δείκτες δεν είναι πανομοιότυποι. Αυτό το βήμα παραλείπεται αν χρησιμοποιείται ένας μόνο δέκτης για να σκανάρει την περιοχή σταματώντας και ξεκινώντας, όπως είδαμε στο σχήμα 21. Είναι κατά συνέπεια απαραίτητο να σχεδιάζονται αλγόριθμοι ανίχνευσης εξειδικευμένοι στη συγκεκριμένη τακτική. Παρακάτω εξετάζονται μερικά παραδείγματα αυτοματοποιημένων μεθόδων ανίχνευσης αντικειμένων και διαφοροποίησή τους από το φόντο.

1.5.5.1 Τεχνικές Ανίχνευσης Βασισμένες σε Μοντέλα

Συχνά χρησιμοποιούνται μαθηματικά μοντέλα για ανίχνευση και αναγνώριση αντικειμένων. Το βάθος και οι φυσικές ιδιότητες των αντικειμένων είναι οι συνήθεις παράμετροι των μοντέλων. Δυστυχώς, μερικές από αυτές τις παραμέτρους, όπως το βάθος, δεν είναι γνωστές ή μερικές φορές ο υπολογισμός τους είναι πολύ χρονοβόρος ή μη πρακτικός. Αυτά τα προβλήματα καθιστούν ακόμα και ένα τέλειο μοντέλο άχρηστο. Επίσης είναι προφανές ότι δε μπορεί να βρεθεί ένα γενικό μοντέλο για οποιοδήποτε είδος θαμμένων αντικειμένων. Επομένως, κάθε μοντέλο πρέπει να ταιριάζει στο συγκεκριμένο πρόβλημα.

Ένα μαθηματικό μοντέλο για θαμμένα μεταλλεία που χρησιμοποιεί συζευγμένους τονισμένους αρμονικούς ταλαντωτές αναπτύχθηκε από τον Donskoy για να ερμηνεύσει τις ακουστικές μετρήσεις που έγιναν στην επιφάνεια του εδάφους. Στη βάση αυτού του μοντέλου μπορεί να δειχθεί ότι η συνάρτηση μεταφοράς ενός θαμμένου μεταλλείου έχει την ακόλουθη μορφή :

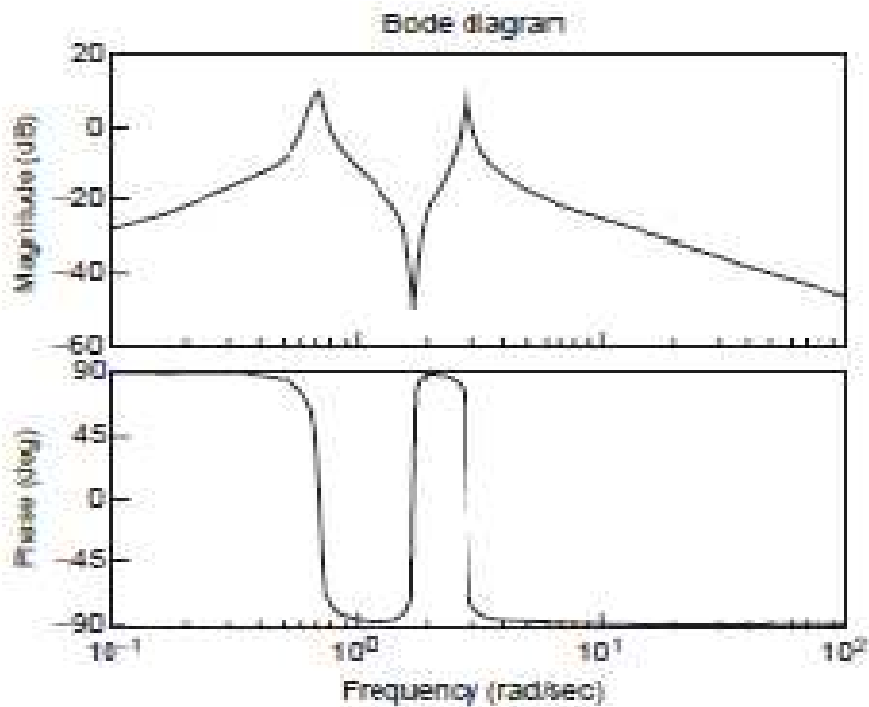
$$H(s) = \frac{V(s)}{F(s)} = K \frac{s^3 + n_1 s^2 + n_2 s}{s^4 + p_1 s^3 + p_2 s^2 + p_3 s + p_4} \quad (17)$$

, όπου V είναι η ταχύτητα ταλάντωσης στην επιφάνεια του εδάφους και F είναι η διαδιδόμενη ακουστική δύναμη στη συγκεκριμένη χωρική θέση. Οι συντελεστές είναι αρκετά πολύπλοκες συναρτήσεις των παραμέτρων του μοντέλου. Είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστούν και δε θα δοθούν εδώ. Υποθέτοντας ότι η $F(s)$ είναι σχεδόν σταθερή σε όλες τις συχνότητες, το φάσμα της ταχύτητας της ταλάντωσης της επιφάνειας του εδάφους είναι ανάλογο του $|H(j\omega)|$ και είναι αυτό που πραγματικά μετράται από τον LDV αισθητήρα :

$$|V(j\omega)| \approx \left| \frac{(j\omega)^3 + n_1(j\omega)^2 + n_2(j\omega)}{(j\omega)^4 + p_1(j\omega)^3 + p_2(j\omega)^2 + p_3(j\omega) + p_4} \right| \quad (18)$$

Ένα δείγμα Bode διαγράμματος της συνάρτησης μεταφοράς της σχέσης (17) φαίνεται στο σχήμα 23. Αυτό το σύστημα έχει 4 πόλους και 3 μηδενικά μεταφοράς. Καθώς το βάθος του ορυχείου αυξάνεται, η αριστερή κορυφή μετακινείται περαιτέρω προς τα αριστερά και η δεξιά προς τα δεξιά.

Μπορεί εύκολα να επαληθευθεί ότι μια διαδικασία αυτοανάδρομου κινούμενου μέσου όρου – autorgressive moving-average (ARMA) progress – τάξης (4,4) έχει την ίδια μορφή με τη (17). Αυτό αποδεικνύει ότι οι ακουστικές μετρήσεις, για παράδειγμα, η ταχύτητα των ταλαντώσεων της επιφάνειας του εδάφους, έχουν φάσμα που μπορεί να μοντελοποιηθεί σε μια ARMA διαδικασία τάξης (4,4). Αυτό οδηγεί σε ανάλυση πόλων για ανίχνευση θαμμένων αντικειμένων.



Σχήμα 26. Δείγμα Bode Διαγράμματος της Συνάρτησης Μεταφοράς στη Σχέση (17).

Παρατηρείστε ότι η αλλαγή στη φάση είναι δραματική στη ίδια συχνότητα για την αριστερή κορυφή του Bode διαγράμματος του σχήματος 26. Μια άλλη προσέγγιση χρησιμοποιεί αυτήν την ιδιότητα για να εξάγει χαρακτηριστικά βασισμένα στην πληροφορία φάσης. Αυτό μειώνει σημαντικά το ρυθμό λανθασμένων συναγερμών για δεδομένη πιθανότητα ανίχνευσης.

1.5.5.2 Ανίχνευση Βασισμένη στο Σχήμα

Μια συνηθισμένη προσέγγιση για ανίχνευση αντικειμένων χρησιμοποιεί πληροφορία σχήματος. Για θαμμένα αντικείμενα, οι φασματικές εικόνες συνήθως παρέχουν καλή πληροφορία σχήματος. Στο σχήμα 24, για παράδειγμα, το σχήμα του αντικειμένου που φαίνεται στις φασματικές εικόνες σε διάφορες συχνότητες είναι περίπου κυκλικό. Κατά συνέπεια, η καμπυλότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σα χαρακτηριστικό.

Οι αλγόριθμοι ανίχνευσης βασισμένοι στο σχήμα συνήθως περιλαμβάνουν ένα βήμα προεπεξεργασίας που μπορεί να περιλαμβάνει αφαίρεση φόντου, κανονικοποίηση και δημιουργία κατωφλιών. Αυτό το βήμα συνήθως ακολουθείται από ανάλυση εξαρτημένων συνιστωσών – connected component analysis (CCA). Χαρακτηριστικά, όπως η εκκεντρότητα, το μήκος του δευτερεύοντα άξονα, το μήκος του κύριου άξονα, το εμβαδό και η πυκνότητα μπορούν να θεωρηθούν χρήσιμα στη διαφοροποίηση διαφορετικών αντικειμένων. Ο Hocaoglu χρησιμοποίησε ανάλυση ανεξάρτητων συνιστωσών – independent component analysis (ICA) για να εξάγει πρόσθετα χαρακτηριστικά και να ενισχύσει το ρυθμό ανίχνευσης. Παρόμοια χαρακτηριστικά μπορούν επίσης να εφαρμοστούν στις εικόνες που παριστάνουν τη βάση των διανυσμάτων των ανεξάρτητων συνιστωσών.

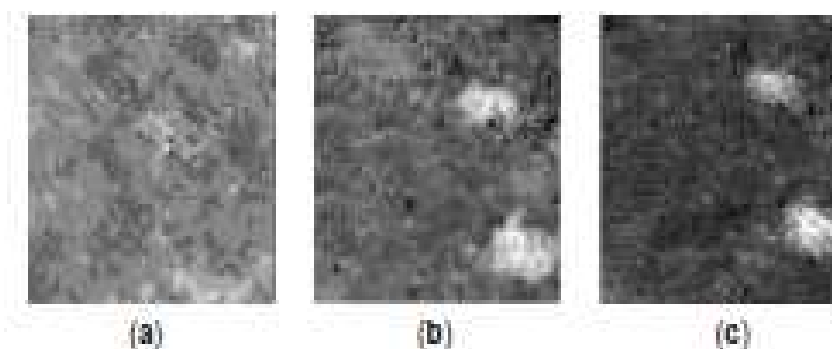
1.6 Οπτικοί Ανιχνευτές

Η ανίχνευση θαμμένων αντικειμένων με οπτικούς αισθητήρες θεωρείται μια από τις πιο υποσχόμενες τεχνικές. Το κύριο πλεονέκτημά της είναι ότι χρησιμοποιεί παθητικούς αισθητήρες, το οποίο είναι πολύ σημαντικό ειδικά για στρατιωτικές εφαρμογές. Μια κοινή πρακτική είναι να χρησιμοποιηθούν διάφοροι αισθητήρες (κάμερες) ευαίσθητοι ο καθένας σε διαφορετικά μήκη κύματος. Το εύρος φάσματος ανάκλασης (από 0.4 ως 2.5 μm) είναι κατάλληλο μόνο για ανίχνευση υπό το φως της ημέρας. Οι τεχνικές ανίχνευσης που χρησιμοποιούν το μέσο υπέρυθρο (3-5 μm) και το μακρινό υπέρυθρο (8-12 μm) συνήθως εφαρμόζονται σε συστήματα ημέρας/νύχτας.

Υπάρχουν δύο κύριες προσεγγίσεις για οπτική ανίχνευση: ο αισθητήρας μπορεί είτε 1) να ανιχνεύσει απευθείας τη θερμική ταυτότητα του θαμμένου αντικειμένου είτε 2) τη διαταραχή της επιφάνειας του εδάφους από τη διαδικασία ταφής ενός αντικειμένου. Η πρώτη προσέγγιση χρησιμοποιεί τη θερμική αντίθεση που εμφανίζεται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας μεταξύ ημέρας και νύχτας και είναι γνωστή ως μέθοδος θερμικής ανίχνευσης. Καθώς τα θαμμένα αντικείμενα ζεσταίνονται με ρυθμό διαφορετικό από αυτόν του εδάφους, μπορεί να παρατηρηθεί η θερμική τους ταυτότητα ώστε να αναγνωριστούν. Η δεύτερη τεχνική αναφέρεται ως μέθοδος μη θερμικής ανίχνευσης. Το κύριο σκεπτικό πίσω από τη μέθοδο αυτή είναι ότι οι φασματικές ιδιότητες της επιφάνειας του εδάφους είναι διαφορετικές από αυτές του υπεδάφους. Η διαδικασία της ταφής ενός αντικειμένου θα φέρει ορισμένα στοιχεία του υπεδάφους, όπως το SiO_2 που περιέχεται στις πέτρες και το χρώμα, στην επιφάνεια. Κατά συνέπεια, οι φασματικές ιδιότητες του εδάφους πάνω από το θαμμένο αντικείμενο θα είναι διαφορετικές από τις φασματικές ιδιότητες της γύρω περιοχής. Αυτή η αντίθεση στις φασματικές ιδιότητες θα οδηγήσει στην ανίχνευση ενός πρόσφατα θαμμένου αντικειμένου, εκμεταλλευόμενη το φαινόμενο Reststrahlen (ολική ανάκλαση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε μια στενή ζώνη συχνοτήτων που εξαρτάται από τη σύσταση του σώματος που ανακλά – σ' αυτήν τη ζώνη συχνοτήτων παρατηρούμε την αλλαγή στην απορρόφηση ενέργειας), το οποίο συμβαίνει στη ζώνη 8-9.4 μm και αναφέρεται στην απορρόφηση ενέργειας ως συνάρτηση της συγκέντρωσης σε πυρίτιο. Η ικανότητα ανάκλασης μειώνεται και επίσης μετακινείται φασματικά καθώς τα μήκη κύματος μεγαλώνουν και η περιεκτικότητα σε πυρίτιο αυξάνεται.

Το έδαφος περιέχει και μικρά και μεγάλα μόρια. Στην πραγματικότητα πολλά από τα μεγάλα μόρια περιβάλλονται από μικρότερα μόρια. Από την άλλη, στην επιφάνεια του εδάφους, τα μικρότερα μόρια έχουν την τάση να παρασύρονται και να διαχωρίζονται από τα μεγάλα μόρια λόγω του ανέμου και της βροχής. Αυτό το φαινόμενο αποσάθρωσης με τον καιρό κάνει τα μεγαλύτερα μόρια να υπερέχουν αριθμητικά στην επιφάνεια του εδάφους και έτσι αλλάζει τις φασματικές ιδιότητες στην περιοχή αυτή. Όταν το έδαφος διαταραχθεί, η χημική σύσταση της επιφάνειας αλλάζει. Με το πέρασμα του χρόνου η διαδικασία θα επαναληφθεί και θα επαναφέρει την επιφάνεια στην αρχική της κατάσταση. Γι' αυτό το λόγο η τεχνική αυτή ίσως δεν είναι κατάλληλη για ανίχνευση αντικειμένων που είναι θαμμένα για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Και οι δυο αυτές μέθοδοι μπορεί να έχουν μεγάλη μεταβλητότητα στην απόδοση. Η απόδοσή τους εξαρτάται κατά πολύ από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η υγρασία και η θερμοκρασία. Το σχήμα 27 περιλαμβάνει εικόνες δύο θαμμένων αντικειμένων στη θερμική ζώνη, που έχουν καταγραφεί από θερμική κάμερα με μήκη κύματος λειτουργίας από 7.5 μέχρι 13 μm . Τα αντικείμενα βρίσκονται σε βάθος 10 εκατοστών και έχουν κυκλικό σχήμα με διάμετρο 15 εκατοστά. Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των σημείων των αντικειμένων και της γύρω περιοχής παρατηρείται την πιο ζεστή ώρα της ημέρας. Όμως, τα αντικείμενα χάνουν θερμότητα πιο γρήγορα τη νύχτα. Έτσι φαίνονται σα μαύρες βούλες στην εικόνα αντί για φωτεινές. Για τη δημιουργία αυτών των διαφορών στο θερμοκρασιακό προφίλ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακτινοβολία από laser ή μικροκυματική ακτινοβολία.



Σχήμα 27. Εικόνα Οπτικής Ανίχνευσης Τραβηγμένη σε Διαφορετικές Ώρες της Ημέρας : (α) 8:00 πμ, (β) 2:00 μμ, (γ) 3:00 μμ.

1.7 Άλλοι Αισθητήρες

Σ' αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστούν συντόμως βοηθητικοί τύποι αισθητήρων, που συνήθως χρησιμοποιούνται σε εξειδικευμένες εφαρμογές ή για να βελτιώσουν την επίδοση ανίχνευσης, μαζί με τις αρχές λειτουργίας τους, τις σύγχρονες δυνατότητές τους, τους περιορισμούς τους και τις δυνατότητες περαιτέρω βελτίωσης. Οι περισσότερες από αυτές τις τεχνολογίες ανίχνευσης, όπως η τομογραφία ηλεκτρικής σύνθετης αντίστασης, η απεικόνιση με ακτίνες Χ και οι ανιχνευτές εκρηκτικών υλών, είναι ακόμα στο στάδιο του σχεδιασμού και της τεχνολογικής έρευνας.

Η τομογραφία ηλεκτρικής σύνθετης αντίστασης (electrical impedance tomography - EIT) είναι μια βασική τεχνική μέτρησης χαμηλού κόστους που χρησιμοποιείται για να καταγράψουμε την κατανομή της αγωγιμότητας της επιφάνειας του εδάφους. Η αρχή ανίχνευσης βασίζεται στην αναγνώριση των ρηχά θαμμένων αντικειμένων που έχουν ηλεκτρική αντίσταση διάφορη από αυτή του εδάφους. Στην επιφάνεια του εδάφους

εγκαθίσταται ένας μεγάλος αριθμός από ηλεκτρόδια χαμηλού πλάτους ρεύματος για να απεικονίσουν την επιφανειακή αντίσταση με την επιθυμητή ανάλυση. Η δυνατότητα ανίχνευσης της μεθόδου περιορίζεται από το βάθος στο οποίο μπορούν να τοποθετηθούν τα ηλεκτρόδια, που είναι συνήθως λιγότερο από 20 cm. Επίσης η μέθοδος είναι κατάλληλη για λειτουργίες γρήγορης σάρωσης μεγάλων περιοχών.

Η μέθοδος σκέδασης ακτινών Χ ανήκει στην κατηγορία των τεχνολογιών ανίχνευσης θαμμένων αντικειμένων με την καλύτερη ανάλυση. Ο στενός λοβός ακτινοβολίας των ακτινών Χ εκπέμπεται στην περιοχή σάρωσης και οι σκεδαζόμενες ακτίνες αναγνωρίζονται απ' τον αισθητήρα. Η απόδοση εξαρτάται ουσιαστικά από τα χαρακτηριστικά απορρόφησης ακτινών Χ του στόχου. Για παράδειγμα, τα οργανικά υλικά, διάφορες στρώσεις στο υπέδαφος και τα εκρηκτικά παρουσιάζουν μικρότερη απορρόφηση και μεγαλύτερη σκέδαση απ' ό,τι τα μέταλλα. Τα στερεά αντικείμενα είναι πιο εύκολα διαχωρίσιμα από το φόντο. Αυτή η τεχνολογία είναι περισσότερο κατάλληλη για ρηχά θαμμένους στόχους, αφού για βαθύτερη διεύθυνση είναι απαραίτητες υψηλής ισχύος πηγές ακτινών Χ.

Η τομογραφία υπεδάφους με μικροκύματα είναι στην πραγματικότητα τύπος ηλεκτρομαγνητικής ανίχνευσης. Η αρχή λειτουργίας και η αρχή λειτουργίας του hardware του συστήματος τομογραφίας διάθλασης είναι παρόμοιες με αυτές του GPR βηματικής συχνότητας. Όμως τέτοια συστήματα γενικά χρησιμοποιούν υψηλότερες συχνότητες (με μήκη κύματος χιλιοστών) και η διαδικασία ανίχνευσης βασίζεται στη λύση ενός προβλήματος αντίστροφης σκέδασης. Το σήμα μικροκυματικής μεταβαλλόμενης συχνότητας εκπέμπεται προς το θαμμένο σώμα και λαμβάνεται πίσω το διαθλώμενο. Συνήθως ως πομπός και δέκτης χρησιμοποιούνται κεραίες μεγάλου εύρους ζώνης, όπως horn με γέμιση διηλεκτρικού. Μετά οι τετραδικά διαμορφωμένες κατά φάση κυματομορφές των δεδομένων λήψης που λειτουργούν σα ταυτότητες για το θαμμένο σώμα επεξεργάζονται χρησιμοποιώντας αλγόριθμους ανακατασκευής εικόνας, όπως η προσέγγιση Born-Kirchhoff. Ο αισθητήρας διάθλασης μπορεί να παράγει υψηλής ανάλυσης χαρτογράφηση του υπεδάφους και απεικόνιση του σώματος. Παρόλα αυτά το βάθος ανίχνευσης περιορίζεται σε λιγότερο από 10 cm, εξαιτίας της σοβαρής εξασθένησης του εδάφους στις υψηλές συχνότητες. Η τεχνική αυτή δεν είναι ακόμα κατάλληλη για ανίχνευση real time, αφού ο χρόνος σάρωσης είναι τις περισσότερες φορές πολύ μεγάλος.

Στους παραπάνω τύπους ανιχνευτών έρχονται να προστεθούν κάποια βιολογικά, ηλεκτροχημικά και πιεζοηλεκτρικά συστήματα αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως ανίχνευση εκρηκτικής ύλης, και μπορεί να είναι πολύ σημαντικά, ειδικά για στρατιωτικές εφαρμογές. Οι βιολογικοί αισθητήρες οσμής μπορούν να ανιχνεύσουν τις εξατμίσεις ή τα αέρια που παράγονται από τις εκρηκτικές ύλες ως συστατικά ορισμένων σωμάτων. Ο ηλεκτροχημικός ανιχνευτής μετρά τις μεταβολές στην ηλεκτρική αντίσταση των αέριων εκρηκτικών υλών. Τέλος, ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας χρησιμοποιεί την ηχητική μετάθεση φάσματος ορισμένων αντικειμένων όταν αυτά εκτίθενται σε αέριες εκρηκτικές ύλες.

Κεφάλαιο 2. Περιγραφή Διάταξης

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις. Παρουσιάζονται οι επιμέρους μονάδες του υλικού μαζί με τη διαδρομή που ακολουθεί το σήμα από την παραγωγή του μέχρι τη λήψη του πίσω στο δέκτη για την επεξεργασία του καθώς και το λογισμικό που είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο του συστήματος και τη συλλογή των δεδομένων.

Η κύρια διαφορά της συγκεκριμένης διάταξης από τα κλασικά GPR συστήματα είναι ότι ο δέκτης διαθέτει πολλαπλές κεραιές σε μια σταθερή δομή έτσι ώστε να αποφεύγεται η σάρωση που απαιτεί μηχανική κίνηση και μεγάλο χρόνο σε σχέση με τις γρήγορες ολοκληρωμένες λειτουργίες της μέτρησης και αποθήκευσης των δεδομένων.



Εικόνα 1. Η Διάταξη στο Χώρο των Μετρήσεων.

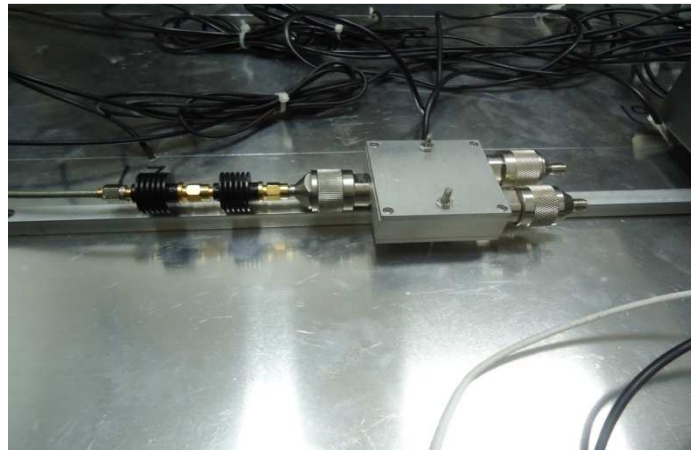
Ο σχεδιασμός του συστήματος είναι σχετικά απλός σε σύλληψη και υλοποίηση. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στη διατήρηση του βάρους της όλης διάταξης σε χαμηλά επίπεδα, ώστε να είναι εύκολο στη μεταφορά. Τα κύρια μέρη είναι ο πομπός με τη γεννήτρια και την κεραία εκπομπής, ο δέκτης με τη διάταξη των κεραιών λήψης και το κύκλωμα απόκτησης των δεδομένων, η κάρτα δειγματοληψίας που μετατρέπει τα αναλογικά δεδομένα σε ψηφιακά για αποθήκευση στον υπολογιστή και ο υπολογιστής με το software για έλεγχο του συστήματος και δυνατότητα επεξεργασίας των λαμβανόμενων δεδομένων real time.

Η συλλογή των δεδομένων γίνεται μέσω ηλεκτρονικής σάρωσης από 32 κεραιές που είναι αριθμημένες και διατεταγμένες σε τέσσερις οκτάδες, όπως φαίνεται στη φωτογραφία. Τα δεδομένα αφορούν ουσιαστικά τη λήψη των κεραιών στο πεδίο του χρόνου του ηλεκτρικού κύματος που ανακλάται από το έδαφος και το θαμμένο στόχο. Να παρατηρήσουμε ότι όλες οι κεραιές πομπού και δέκτη είναι πανομοιότυπες.



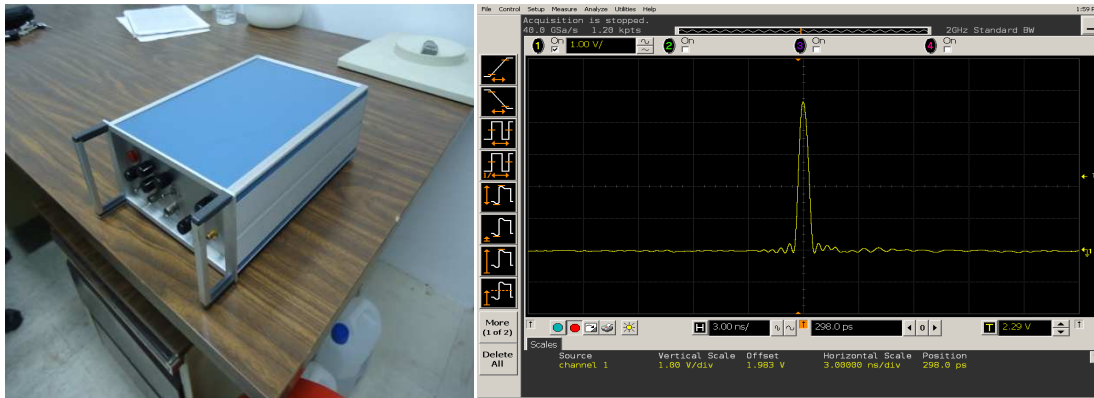
Εικόνα 2. Οι θέσεις και η Αρίθμηση των Κεραιών.

Το σύστημα είναι σχεδιασμένο για να εκπέμπει το σήμα συγχρόνως από δύο πομπούς. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα διαχωριστή σήματος που ακολουθεί την έξοδο της γεννήτριας. Στην περίπτωσή μας όμως για λόγους υλοποίησης του συγκεκριμένου αλγορίθμου θα χρησιμοποιήσουμε μόνο τον ένα πομπό. Ο διαχωριστής συνοδεύεται από εξασθενητές που χρησιμεύουν στην εξάλειψη των ανακλάσεων στον κυματοδηγό από το διαχωριστή μέχρι την κεραία του πομπού, οι οποίες ανακλάσεις πιθανόν να επιδεινώναν την ποιότητα του εκπεμπόμενου παλμού.



Εικόνα 3. Ο Διαχωριστής με τους Εξασθενητές σε Μεγέθυνση.

Το σύστημα περιλαμβάνει γεννήτρια που παράγει το επιθυμητό σήμα το οποίο οδηγείται στον πομπό για εκπομπή. Οι κύριες απαιτήσεις για τη γεννήτρια είναι οι επιδόσεις της σε ισχύ αλλά και τα κατάλληλα χαρακτηριστικά των παραγόμενων παλμών που αφορούν το σχήμα και τη διάρκειά τους, όπως επίσης τη συχνότητα απανάληψής τους. Η γεννήτρια έχει δυνατότητα μέγιστου πλάτους παραγόμενου σήματος 15V, όμως για βέλτιστη σταθερότητα και ρύθμιση με τη μικρότερη δυνατή διάρκεια παλμού στα 0.5 με 1 nsec εκπέμπει σήμα με κορυφή στα 4.5 V περίπου, το οποίο φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 4. Η Γεννήτρια και ο Παραγόμενος Παλμός στο Πεδίο του Χρόνου.

Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τους εξασθενητές έχει ως αποτέλεσμα η ισχύς του σήματος εκπομπής να είναι κατά πολύ μικρότερη από τη μέγιστη δυνατή. Παρόλα αυτά ακόμη και έτσι το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου που εκπέμπεται είναι αρκούντως μεγάλο ώστε να μην αντιμετωπίζουμε πρόβλημα χαμηλού σηματοθορυβικού λόγου. Ο ενισχυτής χαμηλού θορύβου στο δέκτη βοηθά σημαντικά προς αυτήν την κατεύθυνση.

Περισσότερες Πληροφορίες για τη Γεννήτρια :

Το μοντέλο AVM-2-C παρέχει πλάτη μέχρι και 15V, με διάρκειες παλμών που κυμαίνονται από 0.25 μέχρι 2 nsec. Ο χρόνος ανόδου είναι μικρότερος από 100ps και ο χρόνος καθόδου μικρότερος από 250 ps. Η συχνότητα επανάληψης παλμών μπορεί να ρυθμιστεί στο εύρος από 3KHz μέχρι 25MHz χρησιμοποιώντας έναν εσωτερικό ταλαντωτή, ο οποίος ρυθμίζεται από τους κέρσορες μεγάλης (έξι θέσεων) και μικρής ακρίβειας στην πρόσοψη της γεννήτριας.

Ένας ρυθμιστής καθυστέρησης και η έξοδος του trigger παρέχονται για τον κατάλληλο συγχρονισμό της λειτουργίας της γεννήτρια με το υπόλοιπο κύκλωμα. Η γεννήτρια μπορεί να δεχτεί και εξωτερικό triggering με TTL (transistor-transistor logic) παλμούς. Η καθυστέρηση διάδοσης στη ρύθμιση από εξωτερικό trigger είναι 30nsec, ενώ παρέχεται και επιπρόσθετη σχετική καθυστέρηση 0-5 nsec.

Η γεννήτρια μπορεί να παρέχει την έξοδο με θετική, αρνητική ή διπλή πολικότητα (dual output polarity), που επιτυγχάνεται με ένα μετασχηματιστή αντιστροφής στην κύρια έξοδο. Επίσης, από το πίσω μέρος, όπως φαίνεται στο σχήμα, είναι δυνατή η τροφοδοσία με DC συνιστώσα για την κατάλληλη υπέρθεση της AC εξόδου. Τέλος, είναι διαθέσιμη μια εναλλακτική πρόσθετη έξοδος εξασθενημένη κατά 20 dB. Η μονάδα χρειάζεται τροφοδοσία 100-240V AC και 50-60Hz για να λειτουργήσει.

Η γεννήτρια είναι σχεδιασμένη για περιοδικές κυματομορφές. Δεν είναι κατάλληλη για διέγερση από απεριοδικό εξωτερικό trigger. Ακόμη να αναφερθεί ότι το πλάτος και η διάρκεια του παλμού εξόδου αλληλοεξαρτώνται. Για παράδειγμα, για δεδομένη διάρκεια παλμού, μειώνοντας το πλάτος μειώνεται και η διάρκεια. Απαιτείται απλά λίγη προσοχή κατά τη ρύθμισή της.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι προδιαγραφές της.

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά Γεννήτριας :

Μοντέλο	AVM-2-C
Πλάτος (σε 50Ω τερματισμό)	μέχρι 15V
Διάρκεια Παλμού (FWHM)	0.25 με 2 nsec
PRF	3 kHz to 25 MHz περιοδικό triggering (0 to 25 MHz για εξωτερικό trigger)
Rise time (20% - 80%)	≤ 100 ps
Fall time (80% - 20%)	≤ 250 ps
Πολικότητα Καθυστέρηση Διάδοσης Επιλογή Μεταβλητής Καθυστέρησης Διάδοσης	Θετική ή Αρνητική ή και τα δύο ≤ 30 ns (To Trigger στο INT) 0 to 5 ns
Jitter	15 ps (To Trigger στο INT)
DC offset	Εφαρμόζεται στα Τερματικά στο Πίσω Μέρος (50 Volts, 250 mA max) TTL-level8 (Low: 0V, High: +3V to +5V), 10 ns ή Περισσότερο
Εξωτερικό Trigger	50Ω Σύνθετη Αντίσταση
Καθυστέρηση Συγχρονισμού	Εύρος 0 με 85 ns (To Trigger στο EXT) Περίπου 0.5V, 20 ns Διάρκεια
Sync output	Υλοποιημένη Λογικά (π.χ. LOW ≈ +0.5V, HIGH ≈ 0V) Θα οδηγήσει 50Ω
Εξασθενημένη Έξοδος	Παρέχει ένα 20 dB Εξασθενημένο Αντίγραφο της Κύριας Εξόδου
Connectors:	Έξοδοι: SMA Trig, Sync: BNC
Dimensions (H x W x D)	100 x 215 x 375 mm
Power requirement	100 - 240 V, 50 - 60 Hz, +24V DC
Υλικό Περιβλήματος	Ανοξείδωτο Αλουμίνιο με Μπλε Πλαστική Ταπετσαρία
Εύρος Θερμοκρασιών	+5°C to +40°C

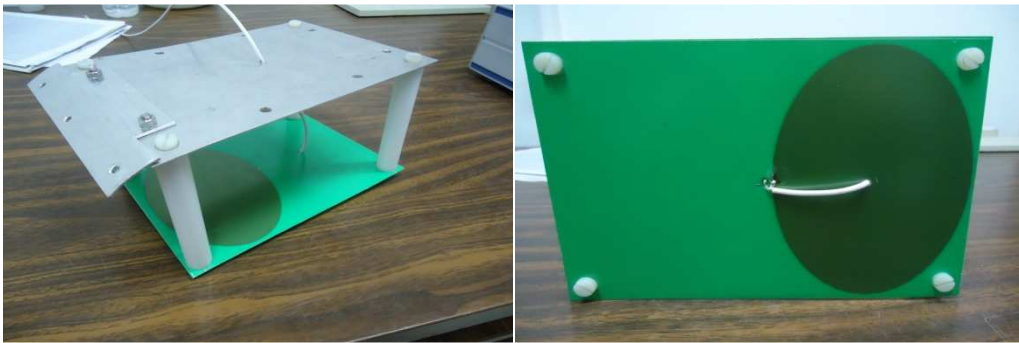


Εικόνα 5. Στην εικόνα φαίνονται οι επιλογές στην πρόσοψη της γεννήτριας. ON/OFF και ένδειξη λειτουργίας, τρεις κέρσορες για τη ρύθμιση του PRF (pulse repetition frequency), delay για ρύθμιση της σχετικής καθυστέρησης μεταξύ της αναφοράς του trigger και της κύριας εξόδου (η καθυστέρηση κυμαίνεται στην περιοχή 0-100nsec), είσοδος για εξωτερικό trigger (η επιλογή πρέπει να βρίσκεται στο EXT), synchronization – έξοδος του trigger, AM και PM (amplitude και pulse width)- ρύθμιση του πλάτους και της διάρκειας του παλμού εξόδου και τέλος OUT - έξοδος του παραγόμενου σήματος.



Εικόνα 6. Τροφοδοσία και επιπλέον επιλογές της γεννήτριας (OS – DC offset, Ground – γείωση και M δεύτερη έξοδος του σήματος της γεννήτριας εξασθενημένη κατά 20 dB).

Τη γεννήτρια, όπως είπαμε, ακολουθεί ο διαχωριστής και στη συνέχεια το σήμα κατευθύνεται προς την κεραία εκπομπής.



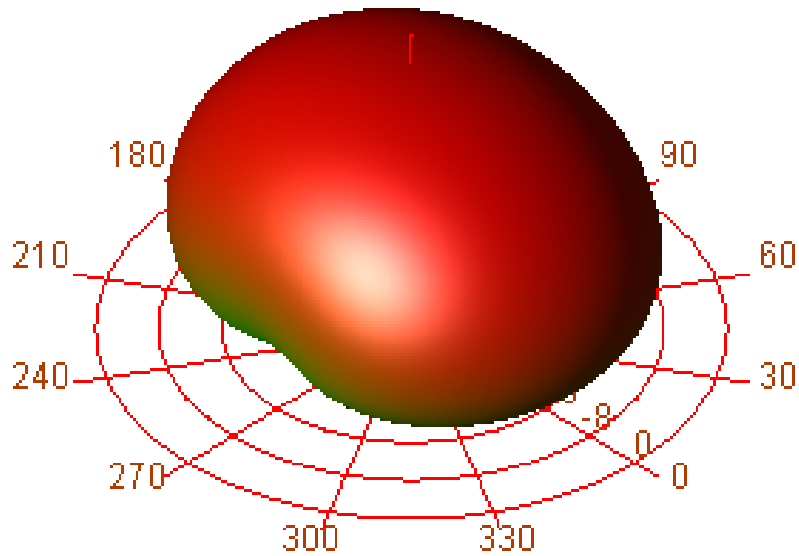
Εικόνα 7. Η Κεραία Εκπομπής.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά της κεραίας.

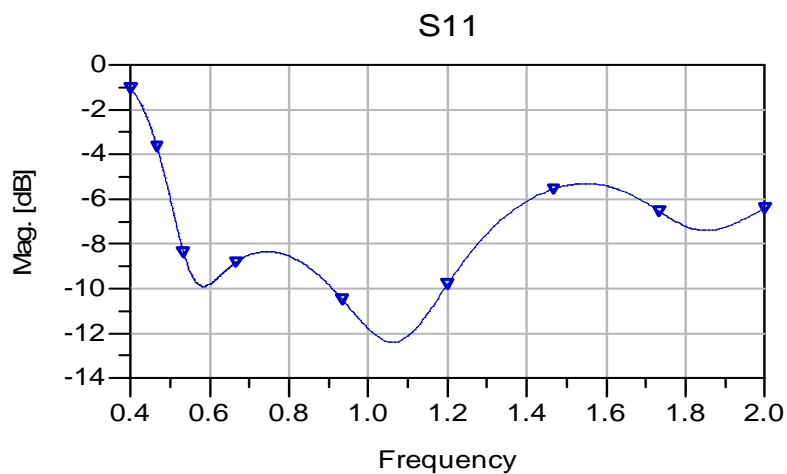
Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά Κεραίας Εκπομπής :

Μέγιστη Ένταση Ακτινοβολίας (Watts)		0.002269
Ενεργή Γωνία (Στερεά Ακτίνια)		2.543
Κατευθυντικότητα (dB)		6.940
Κέρδος (dB)		6.925
Μέγιστη Ένταση (Watts/Στερεό Ακτίνιο)		0.00089
Γωνία Μέγιστης Έντασης (θ, ϕ – Σε Μοίρες)	28	359
$E(\theta)$ max (πλάτος, φάση)	0.0113	-101.565
$E(\phi)$ max (πλάτος, φάση)	0.8199	18.6687
$E(x)$ max (πλάτος, φάση)	0.0127	-24.247
$E(y)$ max (πλάτος, φάση)	0.8199	18.679
$E(z)$ max (πλάτος, φάση)	0.0053	78.4352

Δίνονται επίσης το διάγραμμα ακτινοβολίας καθώς επίσης και το διάγραμμα πλάτους του συντελεστή ανάκλασης της κεραίας.



Σχήμα 28. Κανονικοποιημένο Διάγραμμα Ακτινοβολίας της Κεραίας. Ο Άξονας που φαίνεται είναι ο z Μοναδιαίος Άξονας Ορθογώνιων Συντεταγμένων. Οι Μοίρες που αναγράφονται μετρούν τη Γωνία φ. Η θ ξεκινά να μετρά από τον Άξονα z και προς τα κάτω.



Σχήμα 29. Διάγραμμα Πλάτους του Συντελεστή Ανάκλασης της Κεραίας.

Οι παλμοί κατευθύνονται προς το έδαφος και τα ανακλώμενα κύματα λαμβάνονται από τη διάταξη του δέκτη. Ενισχύονται από έναν ενισχυτή χαμηλού θορύβου LNA και φιλτράρονται.

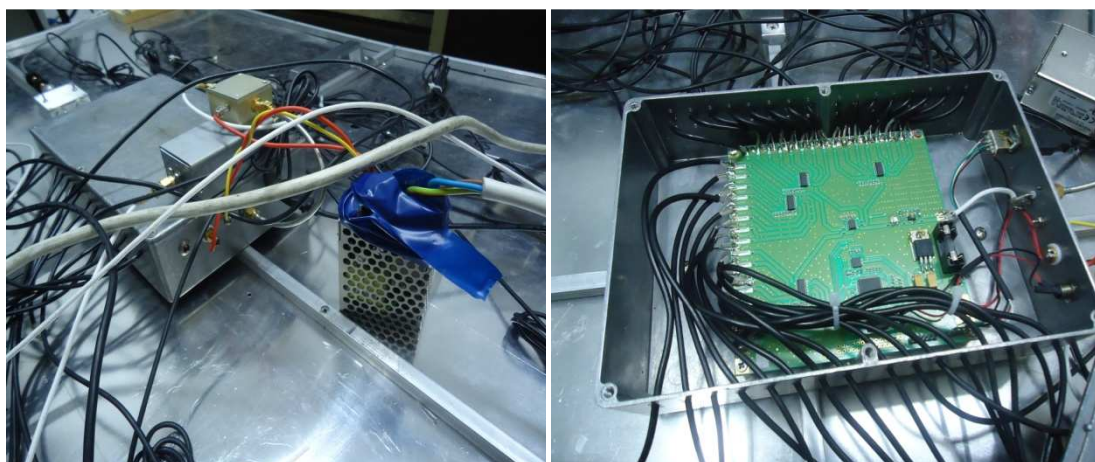
Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά βασικά χαρακτηριστικά της συνολικής λειτουργίας της διάταξης του δέκτη.

Πίνακας 5. Χαρακτηριστικά Διάταξης του Δέκτη :

Κέρδος	38+/-1	dB
Συχνότητα	500-1000	MHz
Επίπεδα Θορύβου	4.5	dB
VSWR IN,OUT	1.5:1	-
Σημείο Συμπίεσης 1 dB	-30	dBm
Απομόνωση Μεταξύ Καναλιών (Ελάχιστη)	45	dB
Κατανάλωση Ισχύος	+5V/100mA	-
Έλεγχος	USB 2.0 control	-

Ο ευρυζωνικός χαρακτήρας των κεραιών τις καθιστά ευάλωτες σε σήματα από άλλες πηγές, όπως τηλεόραση, ραδιοφωνία κτλ. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με πολλαπλές μετρήσεις για κάθε κεραία και μετά λήψη του μέσου όρου των μετρήσεων, γεγονός που καταπιέζει σημαντικά το πλάτος των τυχαίων περιστασιακών παρεμβολών. Θεωρητικά, αν για παράδειγμα χρησιμοποιήσουμε ένα μέσο όρο 100 σημάτων για μια κεραία, θα πετύχουμε μια $20 \log 100 = 40$ dB καταπίεση των παρεμβάλλοντων σημάτων.

Τα σήματα από τις κεραιές οδηγούνται σε έναν αναλογικό πίνακα διακοπών που λειτουργεί ως πολυπλέκτης. Για να απομονώσουμε το σήμα μιας κεραιάς χρησιμοποιείται ένας πίνακας διακοπών. Κάθε φορά ένας διακόπτης που αντιστοιχεί σε μια κεραία συνδέεται με τη μονάδα αποθήκευσης των δεδομένων. Έτσι οι 32 κεραιές επισκέπτονται διαδοχικά. Ο πολυπλέκτης είναι 8X1 και μετά 4X1. Το trigger για την έναρξη των μετρήσεων λαμβάνεται από τη γεννήτρια.



Εικόνα 8. Ο πολυπλέκτης.

Μερικές πληροφορίες για τον ενισχυτή :



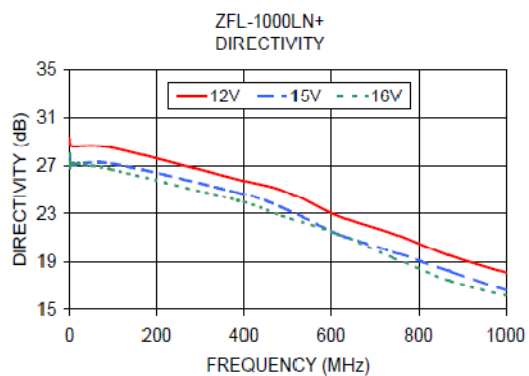
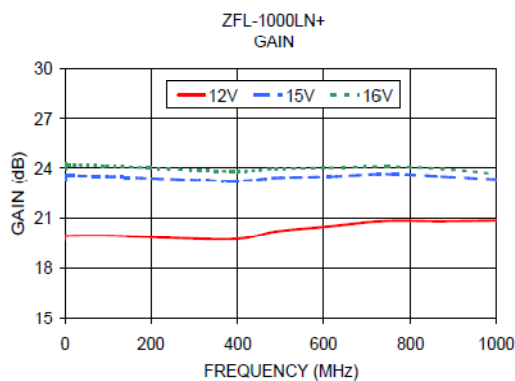
Εικόνα 9. Ενισχυτής.

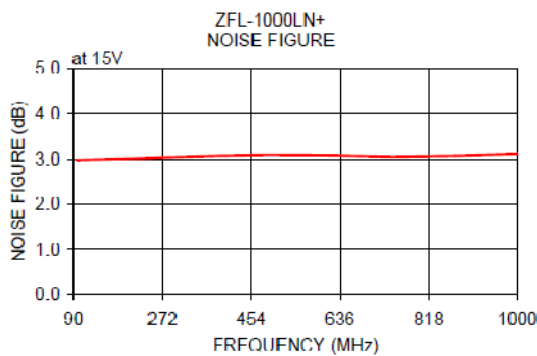
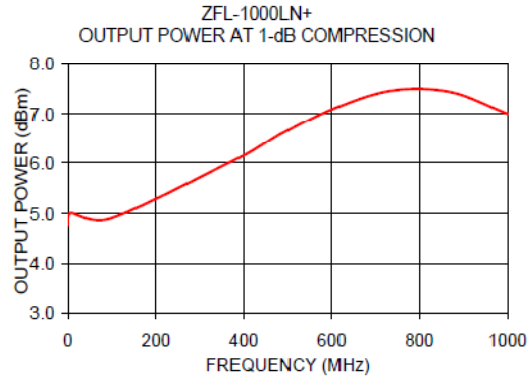
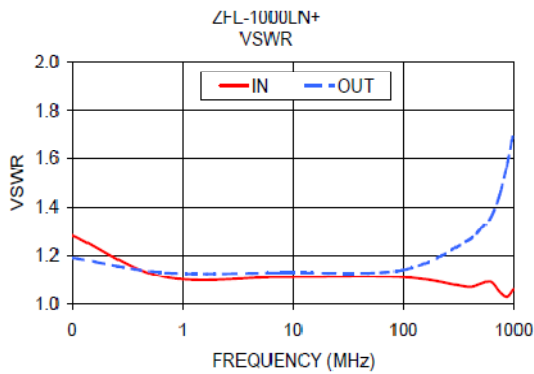
Το μοντέλο του ενισχυτή είναι το ZFL-1000 LN της Mini Circuits. Τερματίζεται σε 50 Ω σύνθετη αντίσταση. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά του.

Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά Ενισχυτή :

Παράμετροι	Συχνότητα(MHz)	Ελάχιστη	Τυπική	Μέγιστη	Μονάδες
Frequency Range		0.1		1000	MHz
Noise Figure	0.1-1000	—	2.9	—	dB
Gain	0.1-1000	20	—	—	dB
Gain Flatness	0.1-1000	—	—	±0.5	dB
Output Power at 1dB compression	0.1-1000	—	+3	—	dBm
Output third order intercept point	0.1-1000	—	+14	—	dBm
Input VSWR	0.1-1000	—	1.5	—	:1
Output VSWR	0.1-1000	—	2.0	—	:1
DC Supply Voltage		—	15	—	V
Supply Current		—	—	60	mA
Θερμοκρασίες Λειτουργίας		-20		71	°C
Θερμοκρασίες Διατήρησης		-55		100	°C
DC Είσοδος			17		V
Μέγιστη Ισχύς Σήματος Εισόδου Χωρίς Φόβο Καταστροφής			+5		dBm

Επίσης δίνονται οι γραφικές παραστάσεις των κυριότερων χαρακτηριστικών του ενισχυτή.





Σχήμα 30. Χαρακτηριστικές του Κέρδους, της Κατευθυντικότητας, του Λόγου Στάσιμου Κύματος, της Ισχύος Εξόδου για 1 dB Συμπίεση και της Φασματικής Ισχύος του Θορύβου.



Ο πολυπλέκτης και ο ενισχυτής παίρνουν ρεύμα από ένα τροφοδοτικό +12 V, 2.1 A. Το μοντέλο του τροφοδοτικού είναι το RS-25-12 της Mean Well και παίρνει είσοδο 100-240 V AC, 0.7 A, 50/60 Hz.

Εικόνα 10. Το τροφοδοτικό.

Για το φίλτρο δεν υπάρχουν περισσότερες πληροφορίες. Πρέπει να εξεταστεί η ζώνη λειτουργίας και η χαρακτηριστική του, ώστε να εξακριβωθεί ότι δεν εισάγει διασπορά και παραμορφώνει ανεπανόρθωτα τα δεδομένα που κατευθύνονται προς αποθήκευση.

Στη συνέχεια, τα δεδομένα περνούν από την κάρτα δειγματοληψίας όπου κβαντίζονται και κωδικοποιούνται σε μεταβλητές των 8 bit. Τέλος, τα διαδοχικά σήματα από κάθε κεραία αποθηκεύονται στη RAM ενός lap top και είναι διαθέσιμα για την επεξεργασία από το λογισμικό.

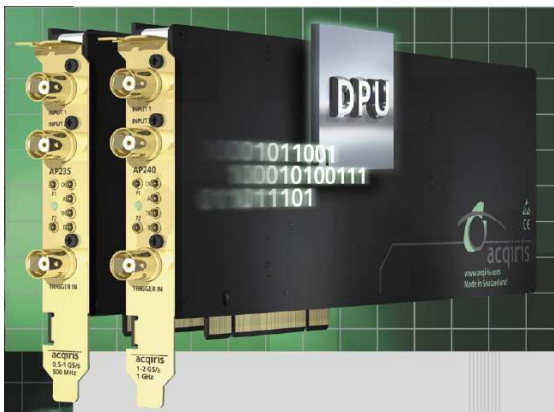
Είναι πολύ σημαντικό να επιλεγεί ένα ψηφιακό σύστημα σταθερό, γρήγορο και επεκτάσιμο, χωρίς να ξεχνάμε την ανάγκη για εύκολη και γρήγορη μεταφορά. Έτσι τα ζητήματα της μετακίνησης και της έλλειψης τροφοδοσίας μεγάλης ισχύος στον τόπο των μετρήσεων οδηγούν στο σχεδιασμό και την υλοποίηση μιας έξυπνης αρχιτεκτονικής ενός ψηφιακού συστήματος αφενός μεν με χαμηλή κατανάλωση λειτουργίας, αφετέρου δε έτοιμο να ικανοποιήσει όλες τις μελλοντικές ανάγκες του project.

Το ψηφιακό κομμάτι της διάταξης, όπως προαναφέρθηκε, αποτελείται από δύο μέρη, την κάρτα δειγματοληψίας και τον επεξεργαστή.

Κάρτα Δειγματοληψίας

AP 240 Acqiris™ PCI πλατφόρμα ανάλυσης σήματος
2 κανάλια x 1Gsps, 8bits ανάλυση
1 κανάλι x 2 Gsps, 8bits ανάλυση (interleaved)
Είσοδος από εξωτερικό trigger.

XP 102 Firmware υπολογισμού μέσου όρου
Δειγματοληψία πραγματικού χρόνου δύο καναλιών και υπολογισμός μέσου όρου με ταχύτητα 2G δείγματα ανά δευτερόλεπτο, συγχρόνως.
12 bits dynamic range σε SuperRes mode.
Δειγματοληψία και άθροιση με επίσκεψη των κεραιών κυκλικά.



Εικόνα 11. Η Κάρτα Δειγματοληψίας.

Η κάρτα περιέχεται σε ένα πλαίσιο επέκτασης PCI της Mobility Electronics με τα εξής χαρακτηριστικά:

Δύο υποδοχές επέκτασης PCI, CB264
Κάρτα PCMCIA για σύνδεση με το laptop
Καλώδιο 68 διευθύνσεων από την κάρτα δειγματοληψίας στην κάρτα PCMCIA (Cardbus)



Εικόνα 12. Το πλαίσιο PCI με την κάρτα δειγματοληψίας.

Οι υπολογισμένοι μέσοι όροι των δειγμάτων αποθηκεύονται στη μνήμη της κάρτας δειγματοληψίας.

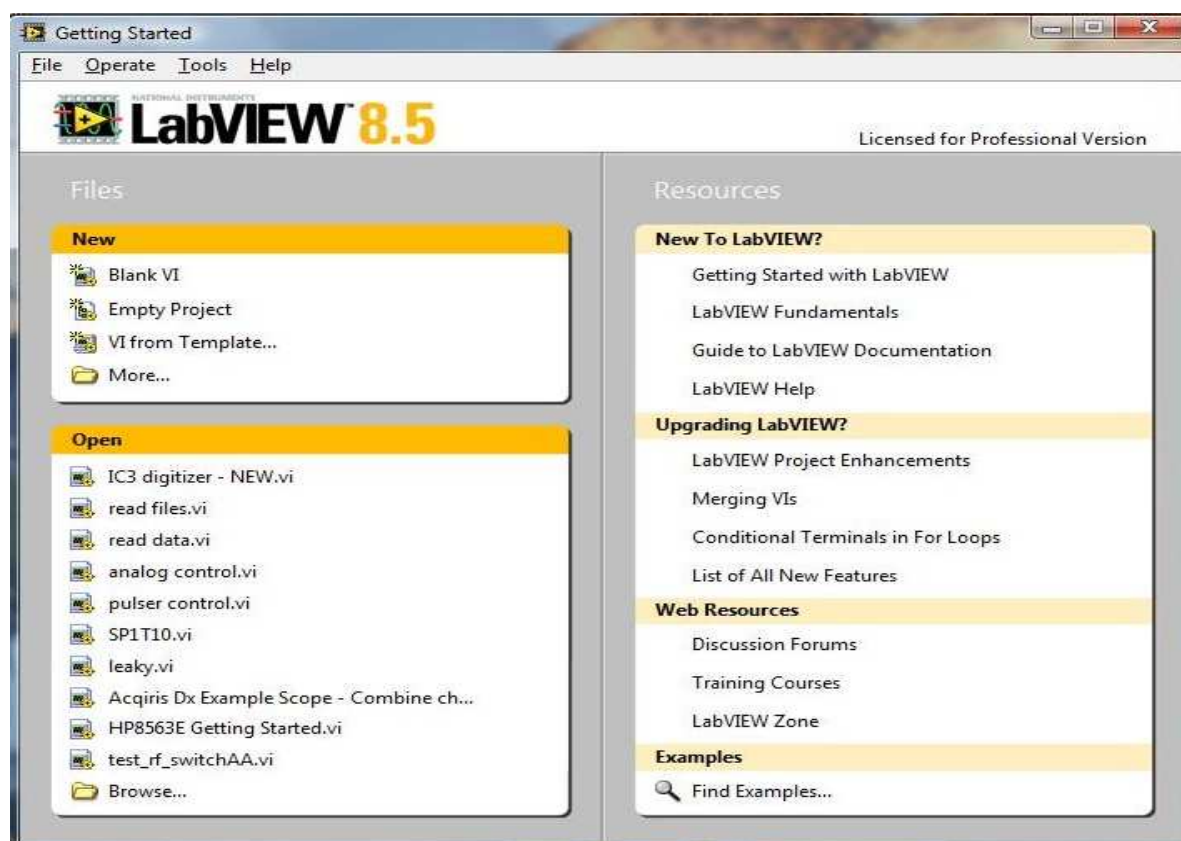
Χαρακτηριστικά του Laptop

LG electronics
Επεξεργαστής Intel Core 2 Duo, 1.8GHz
2GB RAM
120 GB Hard Disk Drive
4 USB
CardBus interface

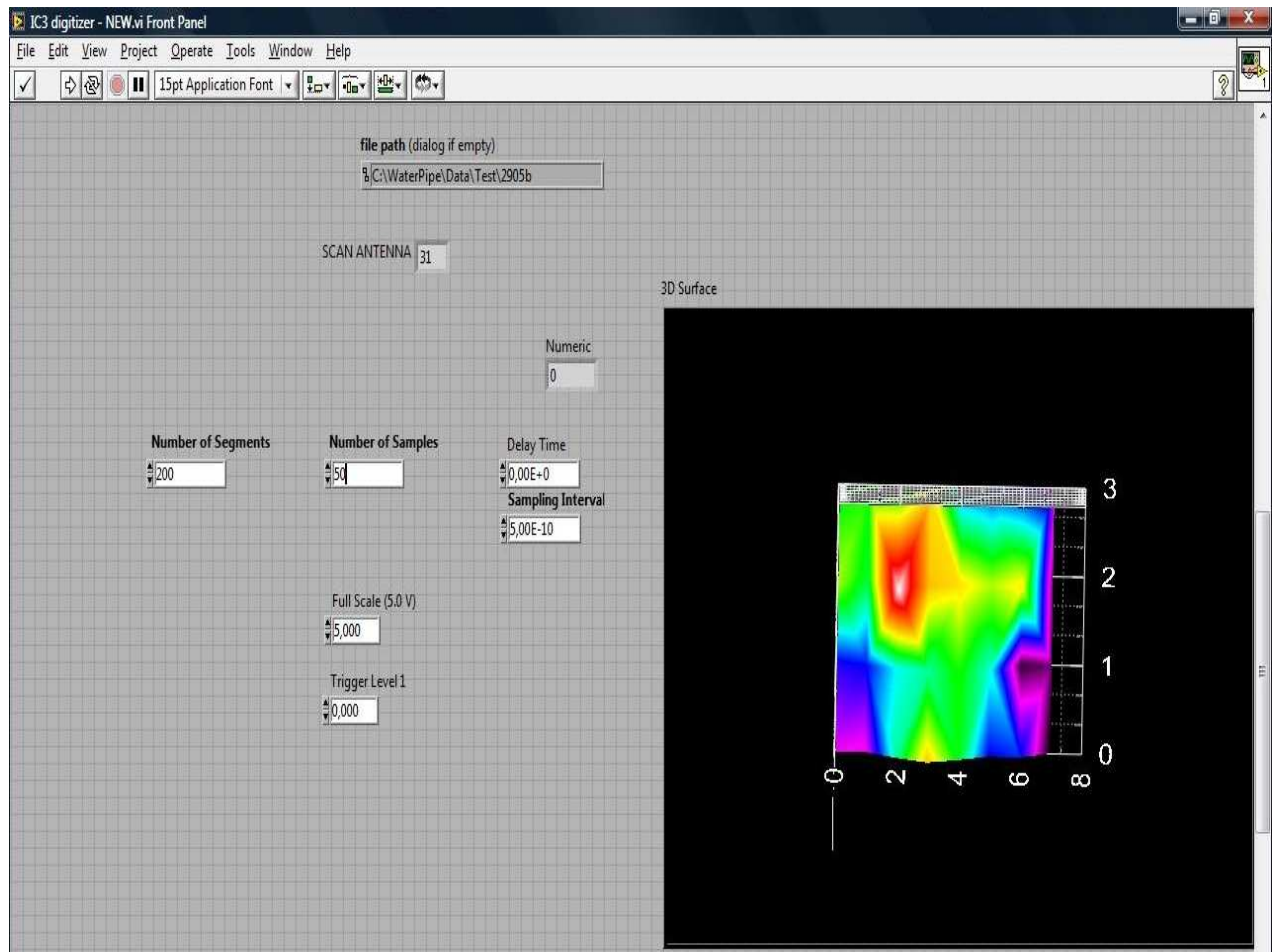
Το laptop είναι κεντρικό σημείο του συστήματος, αφού τρέχει το λογισμικό αποθήκευσης και ελέγχου, καθώς και το λογισμικό για την τρισδιάστατη απεικόνιση των δεδομένων.

Λογισμικό Αποθήκευσης Δεδομένων και Ελέγχου της Διάταξης

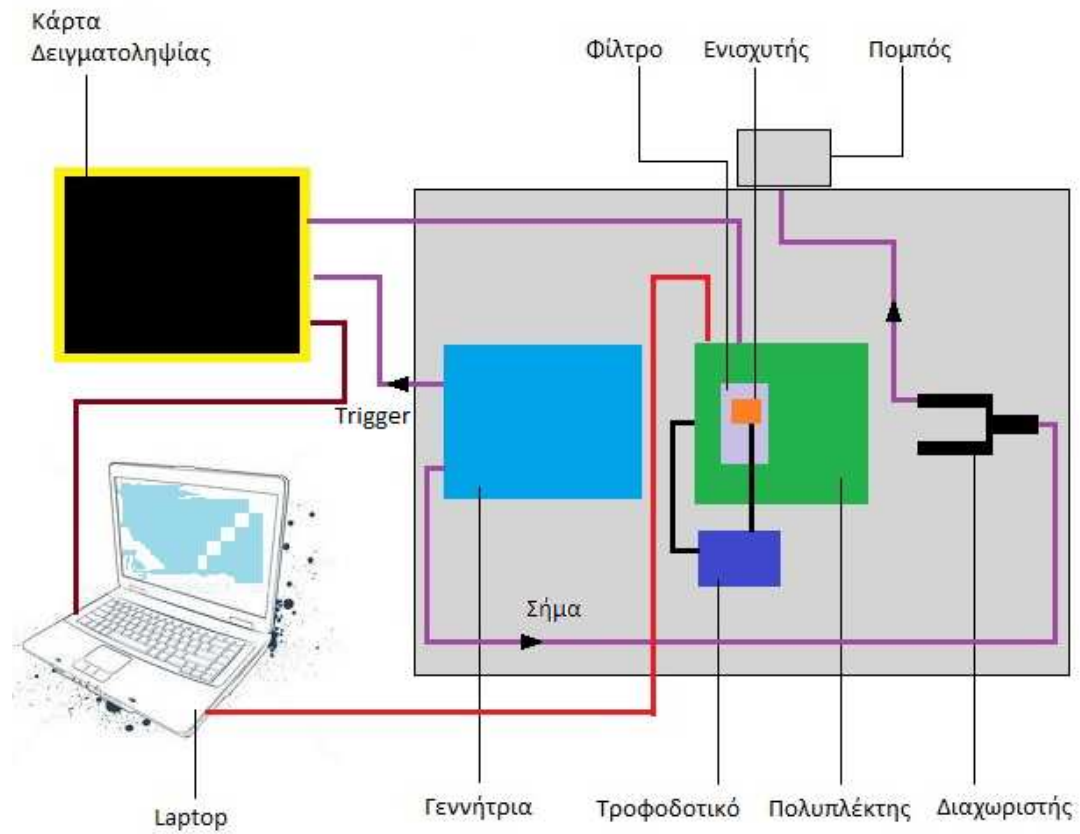
Το λογισμικό είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο του υλικού ολόκληρης της διάταξης. Για παράδειγμα ελέγχει τον πολυπλέκτη της διάταξης του δέκτη και το κέρδος του ενισχυτή. Επίσης επιβλέπει τη λειτουργία της κάρτας δειγματοληψίας και της αποθήκευσης των δεδομένων καθώς και τον συγχρονισμό μεταξύ πομπού και δέκτη. Το πρόγραμμα αυτό αναπτύχθηκε σε Labview και περιλαμβάνει οδηγούς για όλες τις συνδεδεμένες συσκευές. Αναπτύχθηκε σε γραφική γλώσσα G ,που υλοποιεί εικονικά εργαλεία και αλγορίθμους ελέγχου, με στόχο τη δημιουργία μιας ανεξάρτητης εφαρμογής.



Εικόνα 13. Το λογισμικό ελέγχου IC3 digitizer- NEW με τα συνοδευτικά προγράμματα που φαίνονται στη λίστα.



Εικόνα 14. Το interface του προγράμματος όπου ρυθμίζουμε τον αριθμό των δειγμάτων στο πεδίο του χρόνου, των αριθμό επανάληψης κάθε μέτρησης, την καθυστέρηση έναρξης των μετρήσεων σε σχέση με το trigger, την περίοδο δειγματοληψίας και το επίπεδο της ενίσχυσης με μέγιστη τιμή τα 5 V.



Σχήμα 31. Η συνδεσμολογία της διάταξης. Με μωβ συμβολίζονται τα καλώδια SMA, με κόκκινο τα USB και με σκούρο κόκκινο τα PCMCIA.

Κεφάλαιο 3. Περιγραφή του Αλγορίθμου

Ως γνωστόν τα μεταλλικά αντικείμενα ανακλούν σε μεγάλο βαθμό τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που προσπίπτουν πάνω τους. Σ' αυτήν την ιδιότητά τους βασίζεται ο συγκεκριμένος αλγόριθμος που προσπαθεί να τα διαχωρίσει από τον υπόλοιπο χώρο τον οποίο το ηλεκτρομαγνητικό κύμα απλά διαπερνά χωρίς πρακτικά να αλλοιώνεται για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Έτσι αν σε κάποιο σημείο βρίσκεται ένα μεταλλικό αντικείμενο, αυτό θα εκπέμψει προς τα πίσω κύμα στο δέκτη. Έτσι ξέρουμε πως εκεί κάτι υπάρχει. Μετρώντας τη χρονική διάρκεια που έκανε το σήμα για να επιστρέψει μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσταση του σημείου και να προσδιορίσουμε τη θέση του.

Αυτή είναι και η κλασική θεωρία γύρω από τα ραντάρ. Η διαφορά των κλασικών ραντάρ με τα ραντάρ απεικόνισης υπεδάφους είναι ότι στη δεύτερη περίπτωση θέλουμε συνολική εικόνα του χώρου και κατά συνέπεια σάρωση της επιφάνειας. Αυτό απαιτεί μηχανική κίνηση και μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία για κάθε θέση του χώρου. Η καινοτομία της συγκεκριμένης διάταξης είναι ότι δεν κάνει σάρωση αλλά αντί γι' αυτό έχει πολλές κεραιές τοποθετημένες σε συγκεκριμένες θέσεις. Με μια μόνο μέτρηση προσπαθούμε να αποφανθούμε για τη συνολική εικόνα του χώρου. Αυτό φυσικά εξοικονομεί χρόνο και δίνει μια νέα ιδέα και δυνατότητα στο πεδίο της απεικόνισης με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικών μέσων. Το μειονέκτημα είναι ότι οι κεραιές του δέκτη, ο οποίος είναι ουσιαστικά μια στοιχειοκεραία, αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με σύνθετο τρόπο και δυσχεραίνουν την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Ο αλγόριθμος είναι πολύ απλός. **Ο χώρος διακριτοποιείται και θεωρείται σύνολο υλικών σημείων.** Η απόσταση των σημείων αποτελεί και την επιθυμητή ανάλυση και είναι μια μεταβλητή που μπορεί να ρυθμιστεί κατά βούληση. Ο χώρος είναι τρισδιάστατος και παριστάνεται από τα καρτεσιανά διανύσματα x , y , z με κάποιο σημείο να θεωρείται ως η αρχή του, συνήθως μια γωνία της ορθογωνικής διάταξης. Η κεραία είναι μια επίπεδη επιφάνεια και αντιστοιχεί σε ένα επίπεδο z_0 . Κατά συνέπεια η μεταβλητή z μετράει το βάθος με την επιφάνεια του εδάφους αντιστοιχεί στο επίπεδο $z=0$. Οι κεραιές του δέκτη επίσης θεωρούνται σημειακές και παριστάνονται από τις συντεταγμένες τους.

Υπολογίζονται με τη σειρά οι αποστάσεις όλων των κεραιών του δέκτη από τον πομπό για να βρεθεί πόσο χρόνο κάνει το απευθείας κύμα να φθάσει. Η ταχύτητα διάδοσης στον αέρα και το έδαφος είναι σταθερή και γνωστή. Μετά υπολογίζονται οι αποστάσεις όλων των σημείων του υπεδάφους από τον πομπό καθώς και από όλες τις κεραιές του δέκτη. Έτσι βρίσκουμε εύκολα και τους χρόνους που κάνει το κύμα για να διανύσει αυτές τις αποστάσεις, δηλαδή να πάει σε κάθε σημείο και να γυρίσει σε κάθε κεραία από τη διάταξη του δέκτη.

Ο χώρος όπως είπαμε είναι τρισδιάστατος και έτσι οι συντεταγμένες κάθε σημείου μπορούν να παρασταθούν με ένα πίνακα τριών διαστάσεων. Οι διαστάσεις της συνολικής διάταξης είναι 120 cm x 80 cm. Απεικονίζουμε την περιοχή που βρίσκεται μέσα σε αυτά τα όρια. Όσον αφορά το βάθος δεν υπάρχει όριο. Αυτό εξαρτάται από τη διαθέσιμη ισχύ του πομπού και τις δυνατότητες ανάλυσης του αλγορίθμου και της διάταξης. Αυτή λοιπόν είναι και η περιοχή μιας μέτρησης. Αν θέλουμε μεγαλύτερη περιοχή μετακινούμε την κεραία και έχουμε άλλη μια περιοχή επιφάνειας 120 x 80 cm². Αν θέλουμε μια ανάλυση 10 εκατοστών θα είχαμε 120/10 + 1 = 13 σημεία στον άξονα x επί 80/10 + 1 = 9 σημεία στον άξονα y . Κάθε στοιχείο του πίνακα περιέχει μία τιμή, τη μεταβλητή x ή τη μεταβλητή y ή τη μεταβλητή z . Επομένως χρειαζόμαστε τρεις πίνακες 3D για περιγράψουμε το χώρο. Αυτό γίνεται για να απλοποιηθεί ο κώδικας σε matlab που ειδάλλως θα περιείχε σύνθετες δομές με δείκτες χωρίς να προσφέρει ουσιαστικά κάτι περισσότερο.

Επίσης υπάρχουν πίνακες που περιέχουν τις αποστάσεις των σημείων από τον πομπό που είναι και αυτοί 3 διαστάσεων. Ο δέκτης όμως περιέχει 32 κεραιές και έτσι θέλουμε έναν

πίνακα 4 διαστάσεων, δηλαδή κάθε ένα σημείο του χώρου (3D) για κάθε μία από τις κεραίες του δέκτη (4D).

Στη συνέχεια στέλνουμε έναν παλμό και καταγράφουμε τη μέτρηση κάθε κεραίας ξεχωριστά στο πεδίο του χρόνου για 200 nsec, όση δηλαδή είναι και η συχνότητα επανάληψης παλμών της γεννήτριας. Οι μετρήσεις κάθε κεραίας είναι διακριτές και γίνονται κάθε 0.5 nsec, όπως προαναφέρθηκε. Για μία κεραία υπό μελέτη έχουμε υπολογίσει το χρόνο που κάνει το κύμα για να φτάσει σε όλα τα σημεία και να επιστρέψει. Έτσι με μια μέθοδο διακριτής παρεμβολής στη συγκεκριμένη μέτρηση βρίσκουμε το ποσό του πλάτους που συνεισέφερε το κάθε σημείο στο λαμβανόμενο σήμα, ανάλογα με το χρόνο άφιξης.

Με γνωστό το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου του κάθε σημείου και την απόσταση που διένυσε το σήμα από την αναχώρησή του μέχρι τη λήψη του μπορούμε να αφαιρέσουμε τον παράγοντα της απόστασης και να βρούμε το συντελεστή ανάκλασης του συγκεκριμένου σημείου. Μετά αυτοί οι συντελεστές ανάκλασης θα παρασταθούν γραφικά και θα προκύψει η τελική εικόνα. Για να το κατανοήσουμε αυτό καλύτερα ας υποθέσουμε ότι φεύγει από τον πομπό ένα κύμα $A(t)$. Στο σημείο στο χώρο που θα ανακλαστεί θα φθάσει ένα σήμα $B(t)=A(t-t_1)/d_1$, αφού για το ηλεκτρικό πεδίο το σήμα φθίνει αναλογικά με την απόσταση. **Θεωρήσαμε για απλούστευση ότι δεν υπάρχουν άλλου τύπου παραμόρφωση ή απώλειες, το οποίο πρακτικά δε δημιουργεί πρόβλημα.** Από το σημείο ανάκλασης προς τα πίσω θα φύγει ένα σήμα $C(t)=\rho B(t)$, όπου ρ ο συντελεστής ανάκλασης του συγκεκριμένου σημείου. Τέλος, στο δέκτη θα φθάσει το σήμα $D(t)=C(t-t_2)/d_2$. Συνολικά λοιπόν $D(t)=\rho A(t+t)/d_1 d_2$. Παίρνοντας μέτρα, αφού αυτό ουσιαστικά μετράει η κεραία, και λύνοντας ως προς το συντελεστή ανάκλασης, έχουμε $\rho = \lambda \psi \cdot d_1 \cdot d_2$. Στο τέλος λοιπόν κάθε μέτρηση θα την πολλαπλασιάσουμε με τις αποστάσεις διάδοσης και θα προκύψει ο τελικός πίνακας συντελεστών ανάκλασης.

Το πρόβλημα με τον αλγόριθμο βέβαια είναι ότι πολλά σημεία του διακριτού χώρου, των οποίων ο αριθμός εξαρτάται από την ανάλυση που έχουμε θεωρήσει, φθάνουν στο δέκτη συγχρόνως ανάμεσα στα 0.5 nsec που κρατά η δειγματοληψία της κάρτας. Αυτό είναι και το σφάλμα που εισάγει η δειγματοληψία του λαμβανόμενου σήματος, εκτός από τα κλασικά σφάλματα που οφείλονται στη κβάντιση για τη μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό. Ιδανικά θα θέλαμε να λάβουμε μια αναλογική κυματομορφή που να περιέχει όλη την πληροφορία με κάθε λεπτομέρεια. Αυτό φυσικά δεν είναι δυνατόν αφού θέλουμε ένα τρόπο να αποθηκεύσουμε τα αποτελέσματα ψηφιακά στον υπολογιστή. Η μέτρηση με την κάρτα γίνεται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο που παρέχει η υπάρχουσα τεχνολογία. Αυτά τα σημεία λοιπόν που φθάνουν μαζί αθροίζονται και έτσι δε μπορούν να διακριθούν και η πληροφορία χάνεται. **Το πρόβλημα αυτό λύνεται με τη διάταξη των πολλών κεραιών. Κάθε κεραία λαμβάνει ένα χρονικά μετατοπισμένο σήμα της προηγούμενης αφού απέχει μικρή απόσταση από αυτή.** Με πολλές μετρήσεις διαθέσιμες και την κάθε μία να περιέχει διαφορετικά σημεία των οποίων το πεδίο αθροίστηκε στο συνολικό αποτέλεσμα γίνεται μια προσπάθεια να απομονώσουμε την συνεισφορά του κάθε επιμέρους σημείου. **Αυτή είναι και η καρδιά του αλγορίθμου, η κύρια ιδέα, γύρω από την οποία αναπτύχθηκαν ολόκληρη η διάταξη.**

Θεωρώ ότι η ακρίβεια του αλγορίθμου, αν ξεχάσουμε προς στιγμήν τα σφάλματα του hardware, εξαρτάται ακριβώς από το πόσο καλά μπορούμε να απομονώσουμε τις επιμέρους συνεισφορές. Ο αριθμός των κεραιών που απαιτούνται συναρτηθεί της επιθυμητής ανάλυσης και οι θέσεις στις οποίες αυτές θα είναι τοποθετημένες είναι ένα σύνθετο ζήτημα και σίγουρα χρειάζεται περαιτέρω ανάλυση. Το αντικείμενο αυτό μάλλον ξεφεύγει από τα όρια της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας. Πάντως για μια χοντρική ανάλυση, 30 εκατοστών για παράδειγμα, δεν έχουμε πολύ καλή αντίληψη για το τι υπάρχει και πού στο υπέδαφος, όμως έχουμε σύνολο περίπου 100 σημείων στο χώρο, υποθέτοντας ότι το μέγιστο βάθος φθάνει τα 50 εκατοστά. Αυτό θα το δούμε πιο αναλυτικά στη

συνέχεια. Ας υποθέσουμε επίσης ότι η μέτρηση ολοκληρώνεται μετά από 10 nsec, δηλαδή διαρκεί για 20 μετρήσεις. Για μισό μέτρο βάθος ο χρόνος διάδοσης μετ' επιστροφής για τη μεγαλύτερη απόσταση δεν ξεπερνάει το όριο αυτό. Εμείς φυσικά μετρούμε για περισσότερο χρόνο για λόγους μελέτης αλλά μετά τα 10 nsec θα έπρεπε λογικά να μετράμε πολύ χαμηλά σήματα, σχεδόν θόρυβο. Σε αυτήν την περίπτωση στο περίπου $100/20=5$ σημεία φθάνουν στο δέκτη κάθε μισό nanosecond. 5 σημεία με 32 κεραίες είναι ένα πολύ λογικό νούμερο για καλή ξεκαθάριση των επιμέρους αθροισμάτων. Αν δούμε την ανάλυση σαν ένα σύστημα με 32 εξισώσεις θα μπορούσε κάποιος να υποστηρίξει ότι μπορούμε να λύσουμε και εξισώσεις-αθροίσματα 32 μεταβλητών. Όμως τα σημεία είναι χωρικά εντοπιζόμενα και έτσι κάθε εξίσωση περιέχει παρόμοια σύνολα σημείων και κατά συνέπεια είναι γραμμικά εξαρτημένα από τις υπόλοιπες. Η πράξη μπορεί έντονα να αποφανθεί για την εγκυρότητα ή όχι αυτών των ισχυρισμών.

Άλλες προσεγγίσεις που έχουμε πάρει αφορούν το διάγραμμα ακτινοβολίας της διάταξης του δέκτη. Αφού υπάρχουν πολλές κεραίες σε κοντινές αποστάσεις που λαμβάνουν συγχρόνως, μπορούμε να υποθέσουμε ότι έχουμε να κάνουμε με μια στοιχειοκεραία και γι' αυτό πρέπει να βρούμε τον παράγοντα διάταξης της. Εντούτοις για ευκολία θεωρούμε ότι τα διαγράμματα ακτινοβολίας και του πομπού και του δέκτη είναι σφαιρικά, ή καλύτερα ημισφαιρικά. **Δηλαδή πρακτικά θεωρούμε ομοικατευθυντικές κεραίες και δεν λαμβάνουμε υπόψη λεπτομέρειες για τις γωνίες πρόσπτωσης.**

Επίσης δε λαμβάνουμε υπόψη τη φάση του παλμού λήψης αλλά μόνο το πλάτος. Ιδανικά το πλάτος του σήματος λήψης θα έπρεπε να εξαρτάται και από τη μορφή και τη φάση του, όμως στην πράξη, όπως θα δούμε αμέσως μετά, ο παλμός που δημιουργεί η γεννήτρια διασπείρεται χρονικά, λόγω της χαρακτηριστικής της κεραίας και έτσι υπάρχει υπερβολικά μεγάλη αβεβαιότητα για να έχει νόημα να δούμε με λεπτομέρεια το σχήμα του παλμού επιστροφής.

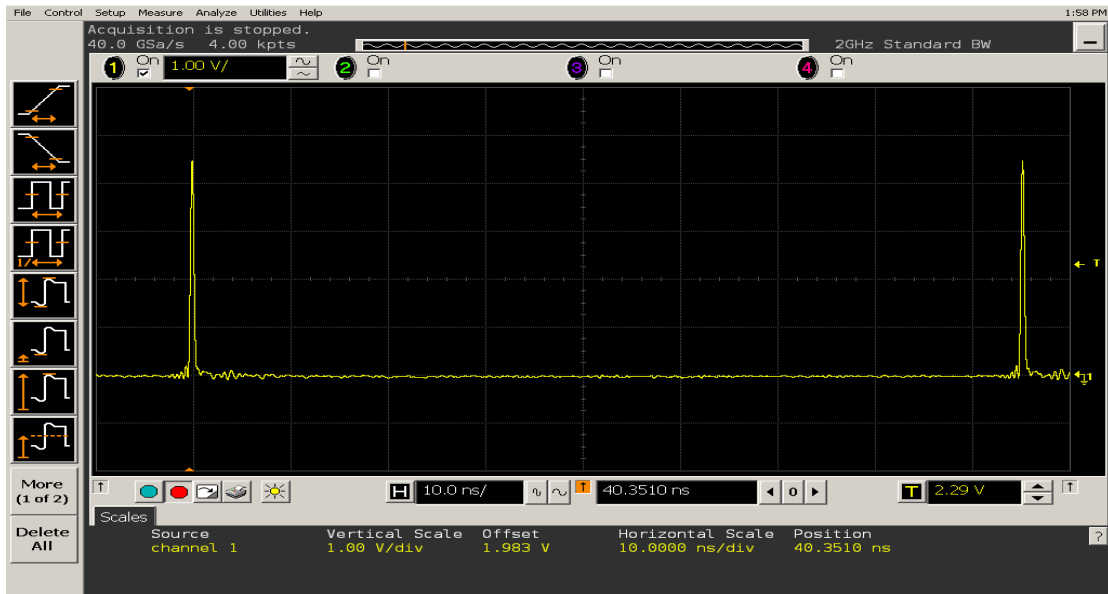
Τέλος να αναφερθεί ότι και η παρεμβολή που χρησιμοποιείται εισάγει σφάλμα. Ιδανικά και πάλι θα έπρεπε να χρησιμοποιήσουμε παρεμβολή με βαθμό ίδιο με τον αριθμό των σημείων της μέτρησης στο πεδίο του χρόνου. Όμως αυτό δεν είναι φυσικά εφικτό και έτσι χρησιμοποιούμε γραμμική παρεμβολή, η οποία πάντως δε δίνει σχεδόν καμία πρακτική διαφορά από κάποιες άλλες μεθόδους παρεμβολής που χρησιμοποιήθηκαν, όπως η spline (τριών σημείων) ή η πολυωνυμική παρεμβολή μέχρι και έκτου, έβδομου και όγδοου βαθμού (συνάρτηση polyfit στο matlab).

Πάντως όλες οι παραπάνω παραδοχές δεν αλλοιώνουν σημαντικά τα αποτελέσματα. Γι' αυτό το λόγο δε λαμβάνονται και υπόψη και αναφέρονται και ως προσεγγίσεις. Ο αλγόριθμος υλοποιημένος σε matlab, μαζί με τα απαραίτητα σχόλια, δίνεται σε παράρτημα στο τέλος. Ο κώδικας αυτός αφορά διάδοση στον αέρα, όμως εφαρμόζεται και για το υπέδαφος με μικρές αλλαγές.

Κεφάλαιο 4. Παρουσίαση των Μετρήσεων

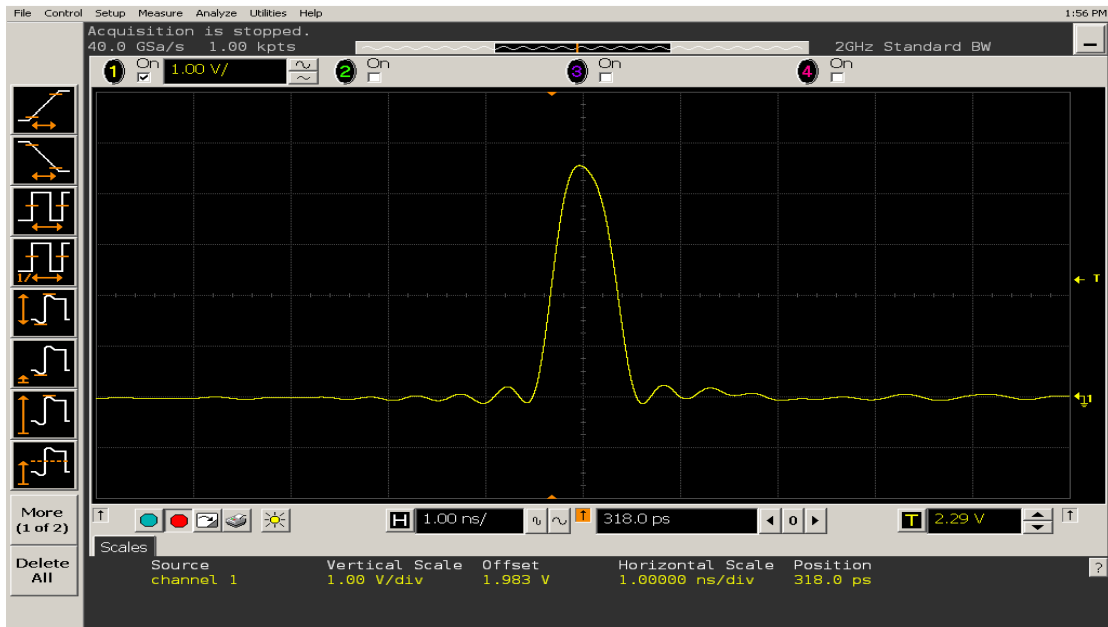
Ας δούμε τώρα βήμα βήμα το σήμα που λαμβάνουμε σε διαδοχικά σημεία της διάταξης για να προσπαθήσουμε να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα για τη λειτουργία της.

Εδώ βλέπουμε τον παλμό που δημιουργεί η γεννήτρια. Το PRF είναι ρυθμισμένο στα 85 nsec, αλλά αν το μεταβάλλουμε δεν αλλάζει κάτι στο σχήμα.



Σχήμα 32. Ο Παλμός που Δημιουργεί η Γεννήτρια – PRF = 85 nsec.

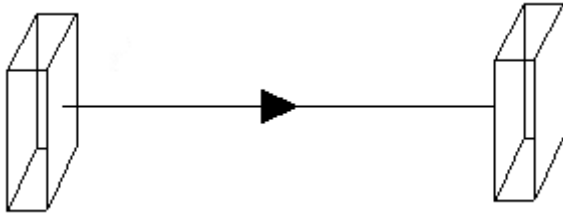
Παρακάτω φαίνεται το ίδιο σχήμα με άλλη ανάλυση για να το παρατηρήσουμε καλύτερα.



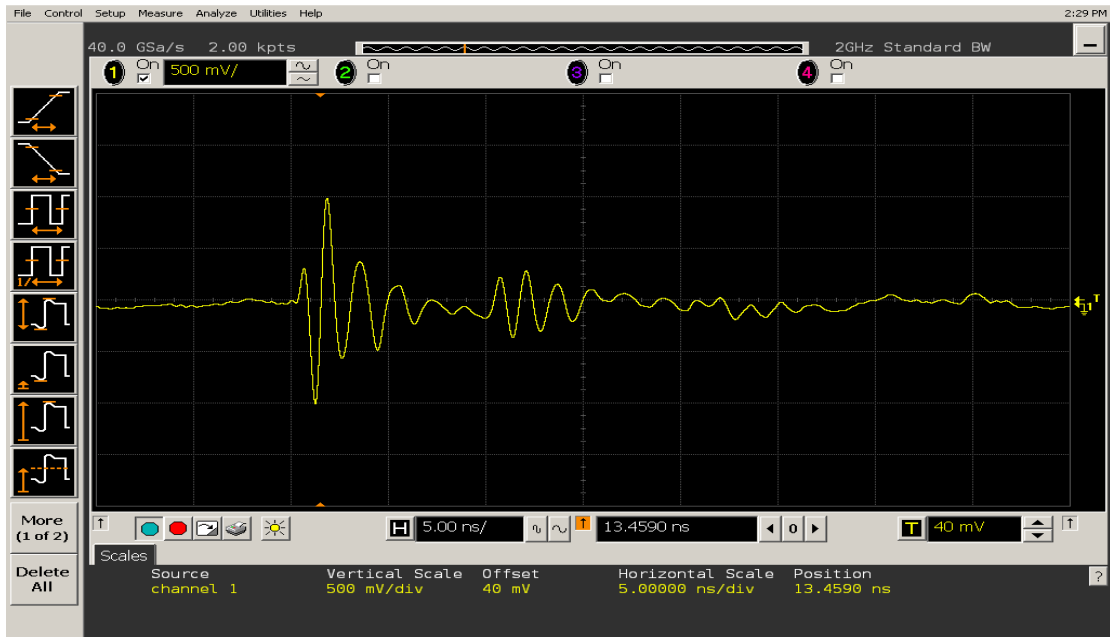
Σχήμα 33. Ο Παλμός της Γεννήτριας – 4.5 V Πλάτος, 1 nsec Διάρκεια.

Είναι πολύ ικανοποιητικό σήμα. Το μέγιστο πλάτος φθάνει τα 4.5 V. Κάτω φαίνεται το time/div. Η διάρκεια του παλμού είναι 1 nsec. Το σήμα έχει κάποιες μικρές διαταραχές από παλμό σε παλμό αλλά είναι ανεπαίσθητες για να στρεβλώσουν το τελικό αποτέλεσμα.

Παρακάτω φαίνεται το σήμα που παίρνει μια κεραία του δέκτη τοποθετημένη απέναντι από την κεραία του πομπού και με τη βέλτιστη πόλωση, όπως στο σχήμα. Στο ένα άκρο είναι συνδεδεμένη η γεννήτρια και στο άλλο ο παλμογράφος για την καταγραφή.

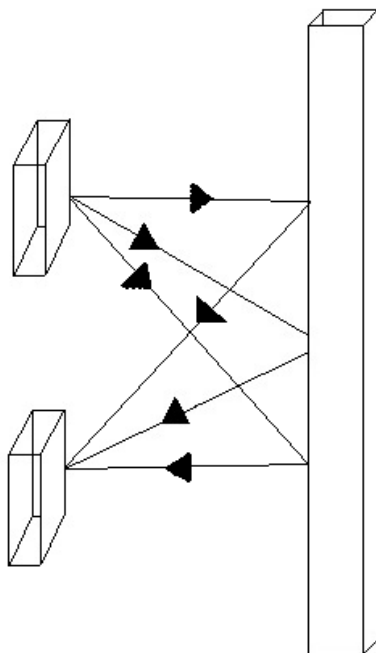


Σχήμα 34. Συνδεσμολογία Μέτρησης με τις Κεραίες Πρόσωπο με Πρόσωπο.

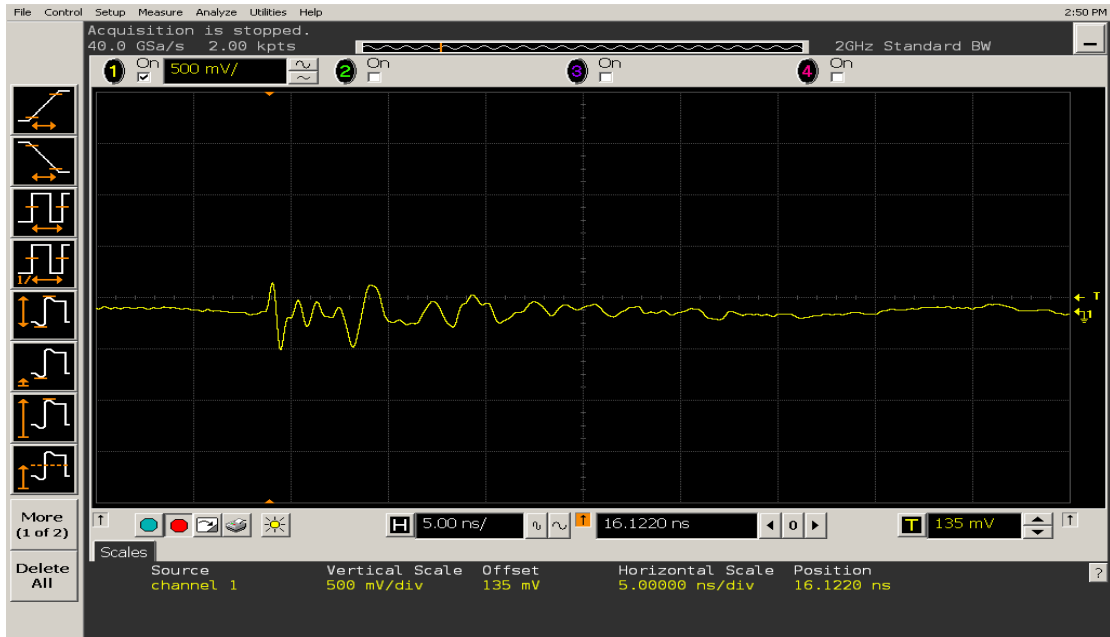


Σχήμα 35. Σήμα Λήψης δύο Κεραίων Πρόσωπο με Πρόσωπο.

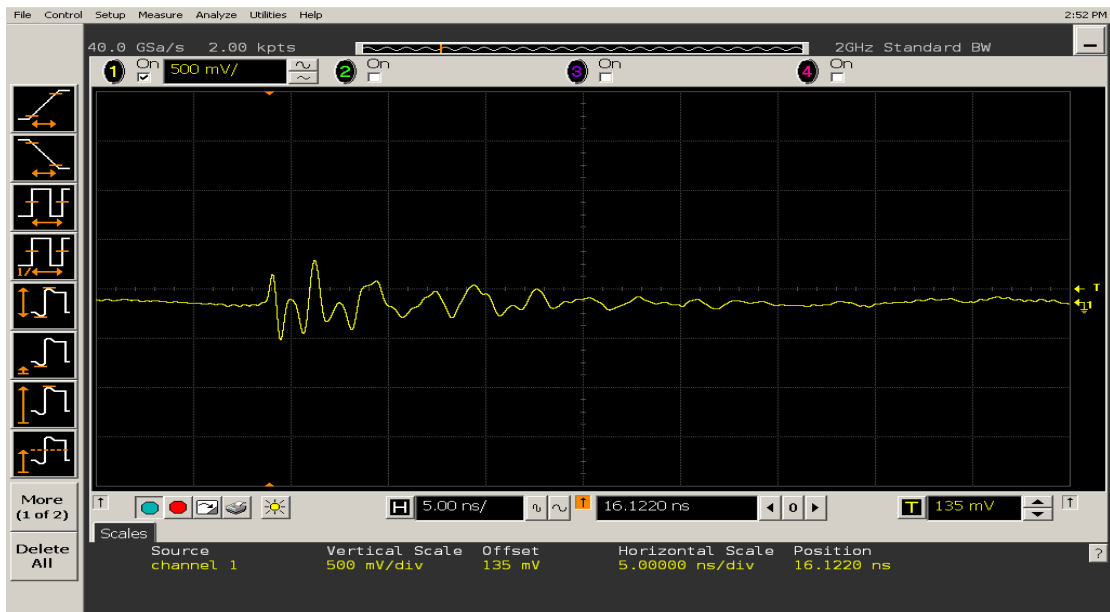
Παρατηρούμε μεγάλη διασπορά του παλμού. Η διασπορά αυτή είναι ανεπιθύμητη γιατί αφενός μεν δεν μας επιτρέπει να έχουμε μια ξεκάθαρη εικόνα για το πότε ακριβώς φθάνει ο παλμός, αφετέρου δε μας δυσκολεύει στο να διακρίνουμε και να απομονώσουμε το απευθείας σήμα από το ανακλώμενο. Δίνεται και ένα σήμα από ανάκλαση σε μεταλλικό αντικείμενο για να φανεί η συμβολή των δύο σημάτων καλύτερα. Το μεταλλικό αντικείμενο είναι ένας σωλήνας ορθογωνικής διατομής τοποθετημένος όπως φαίνεται στο σχήμα. Η πρώτη γραφική παράσταση αναφέρεται σε απόσταση 60 cm από την κεραία ως το σωλήνα, ενώ η δεύτερη σε 30 cm. Βλέπουμε τις κορυφές των δύο σημάτων που συμβάλλουν. Καθώς φέρνουμε το σωλήνα πιο κοντά η απόσταση των κορυφών μειώνεται από 5 nsec στην πρώτη περίπτωση σε 2.5 περίπου στη δεύτερη. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ανηχοϊκό θάλαμο.



Σχήμα 36. Συνδεσμολογία Μέτρησης του Ανακλώμενου Σήματος από δύο Κεραίες.



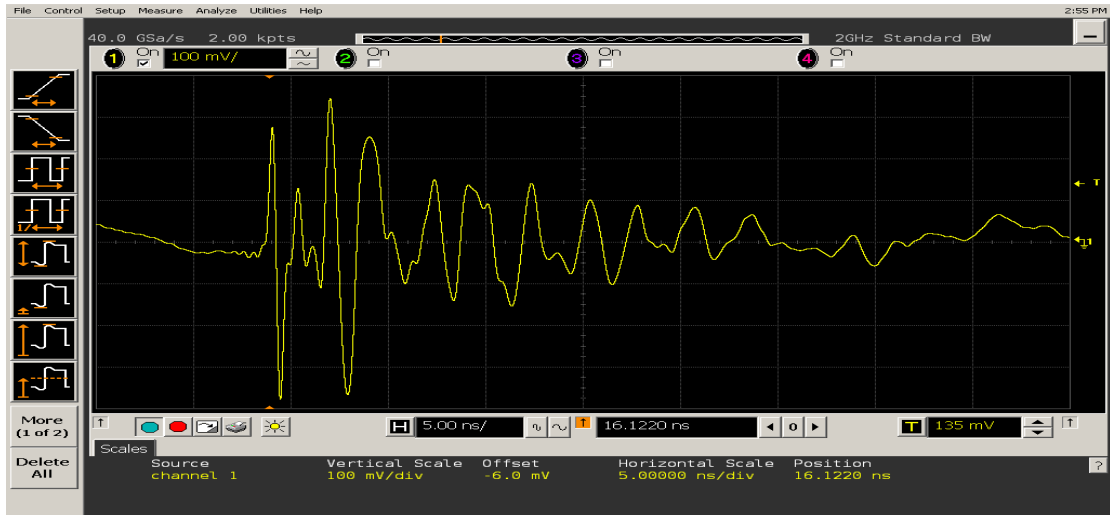
Σχήμα 37. Σήμα από Ανάκλαση με τον Σωλήνα στα 60 εκατοστά.



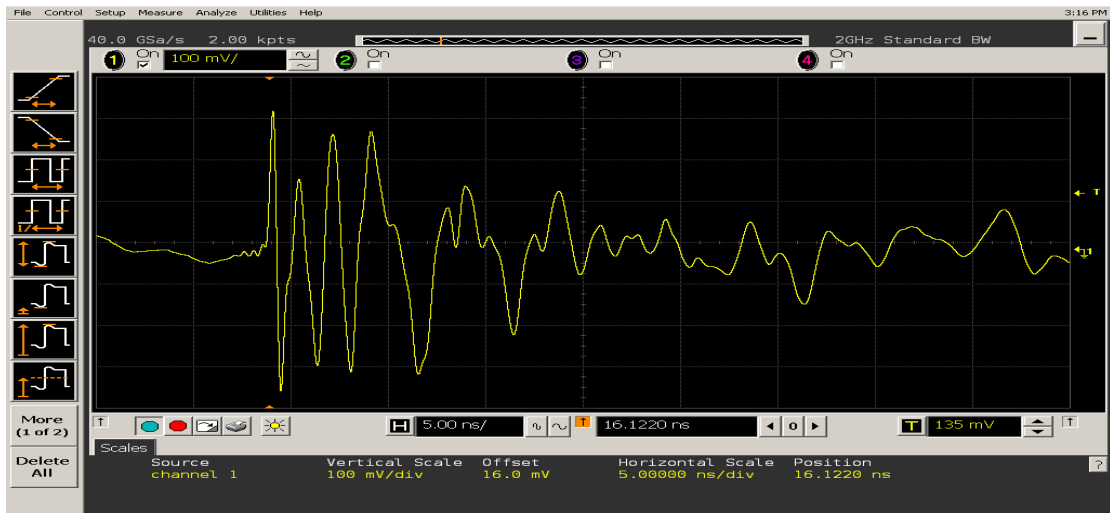
Σχήμα 38. Σήμα από Ανάκλαση με τον Σωλήνα στα 30 εκατοστά.

Όταν υπάρχουν και άλλα αντικείμενα στο γύρω περιβάλλον τα δύο σήματα δε διακρίνονται καθόλου εύκολα με αποτέλεσμα να είναι πολύ δύσκολο να εφαρμοστεί αλγόριθμος που να τα διαχωρίζει.

Στην επόμενη σελίδα παρουσιάζονται δύο σχήματα σε μεγέθυνση προς σύγκριση. Το ένα αφορά ανάκλαση στους 40 πόντους, δηλαδή χρονική διαφορά 3 nsec περίπου ανάμεσα στις κορυφές, και το άλλο είναι η ίδια διάταξη με ένα μεταλλικό αντικείμενο στο εγγύς περιβάλλον. Το αντικείμενο ήταν μια κεραία TEM Horn σε απόσταση μισού μέτρου στο πλάι. Με μόλις ένα αντικείμενο κοντά στη μέτρηση βλέπουμε πως αλλοιώνονται τα αποτελέσματα. Αυτά τα σχήματα δίνονται για να καταλάβουμε πως στο φυσικό χώρο των μετρήσεων, με το αντικείμενο θαμμένο, ανάκλαση στην επιφάνεια του εδάφους, μεγαλύτερες απώλειες, περισσότερο θόρυβο και πιθανές παρεμβολές το σχήμα ίσως να ήταν πολύ χειρότερο. Επομένως γίνεται αντιληπτή η ανάγκη για κεραίες με μικρότερη διασπορά ή ένα τρόπο να εξαλείψουμε αυτή τη διασπορά.

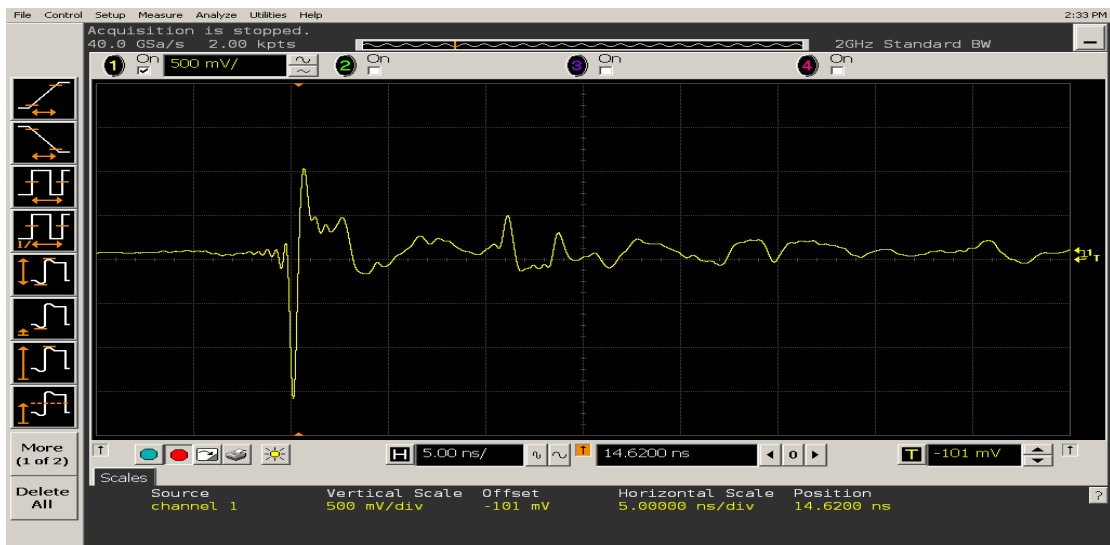


Σχήμα 39. Ανακλώμενο από το Σωλήνα Σήμα σε Περιβάλλον χωρίς Ανακλάσεις.



Σχήμα 40. Ανακλώμενο από το Σωλήνα Σήμα σε Περιβάλλον με Παρεμβολές.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το αντίστοιχο πείραμα με τις κεραίες face to face για TEM Horns. Βλέπουμε πως οι κεραίες αυτές παρουσιάζουν μικρότερη διασπορά.



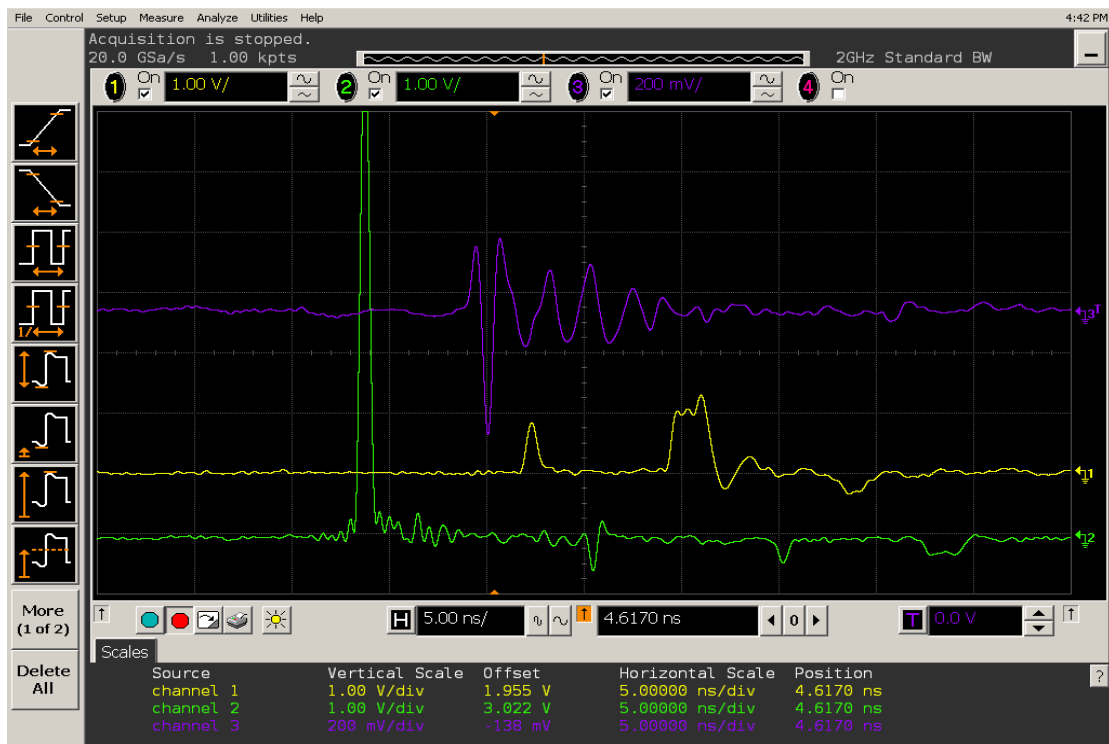
Σχήμα 41. TEM Horns face to face. Σύγκριση με σχήμα 48.

Για να ολοκληρώσουμε τη μελέτη της διάταξης του πομπού πραγματοποιήσαμε μια συνδεσμολογία ώστε να δούμε τις ανακλάσεις στο κύκλωμα από τη γεννήτρια μέχρι την κεραία εκπομπής. Χρησιμοποιήσαμε ένα splitter-combiner της mini circuits, το μοντέλο ZFSC-2-2500.



Εικόνα 15. Ο Combiner ZFSC-2-2500 της Mini Circuits που Χρησιμοποιήθηκε στο Πείραμα.

Το σήμα από τη γεννήτρια χωρίστηκε στα δύο από το διαχωριστή της διάταξης. Το ένα μέρος πήγε κατευθείαν στον παλμογράφο και φαίνεται στο σχήμα με πράσινο χρώμα. Το άλλο έφτασε στη θύρα 1 του combiner. Η θύρα 2 συνδέθηκε με τον πομπό και η θύρα S με το δεύτερο κανάλι του παλμογράφου, αυτό με το κίτρινο χρώμα. Η κεραία λήψης στο τρίτο κανάλι του παλμογράφου. Ένα μικρό μέρος του σήματος της θύρας 1 πέρασε στη θύρα 2 λόγω της μη ιδανικής απομόνωσης και φαίνεται με μια μικρή κορυφή παρόμοια με τον παλμό εκπομπής αλλά αρκετά εξασθενημένη. Το μεγαλύτερο μέρος πήγε στη θύρα S, δηλαδή στην κεραία εκπομπής. Ακτινοβολήθηκε και το σήμα λήψης φαίνεται με μωβ χρώμα. Είναι παρόμοιο με αυτό που παρατηρήσαμε στις προηγούμενες γραφικές παραστάσεις. Ένα μέρος όμως ανακλάστηκε και επέστρεψε στο splitter, θύρα S, είχαμε δηλαδή ανάκλαση από την κεραία και μάλιστα σημαντική. Η ανάκλαση χωρίστηκε στην 1 και τη 2 εξίσου. Αυτό που μπορεί να παρατηρηθεί είναι το κομμάτι προς τη 2 και τον παλμογράφο. Φαίνεται μια πλατιά κορυφή. Το πλάτος του σχήματος είναι το μισό από το πραγματικό. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και δημιουργούνται διαδοχικές ανακλάσεις. Τη δεύτερη φορά ξαναβλέπουμε το ίδιο σήμα πολύ πιο εξασθενημένο και αντεστραμμένο, στο τέλος της κίτρινης κυματομορφής. Μετά φθίνει πολύ και δεν ξαναπαρατηρείται.



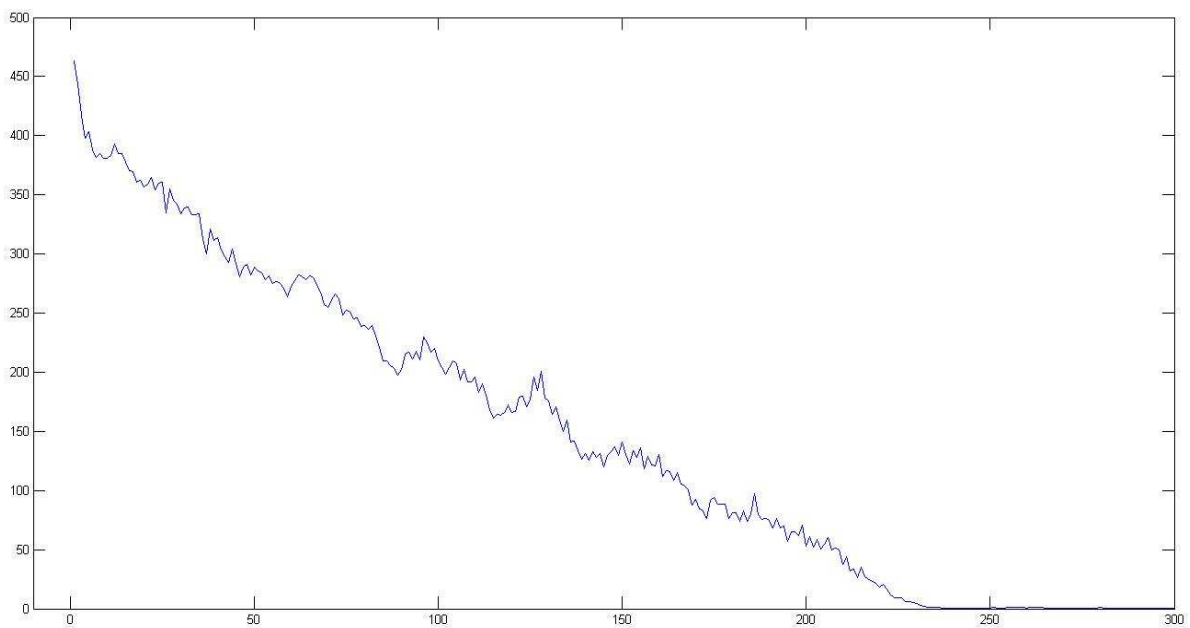
Σχήμα 42. Οι ανακλάσεις στο Κύκλωμα του Πομπού.

Για να είμαστε σίγουροι ότι η ανάκλαση αυτή δεν ευθύνεται για το άσχημο σήμα του πομπού βάζουμε τους εξασθενητές πριν και μετά το διαχωριστή της διάταξης και ξαναβλέπουμε το σχήμα.



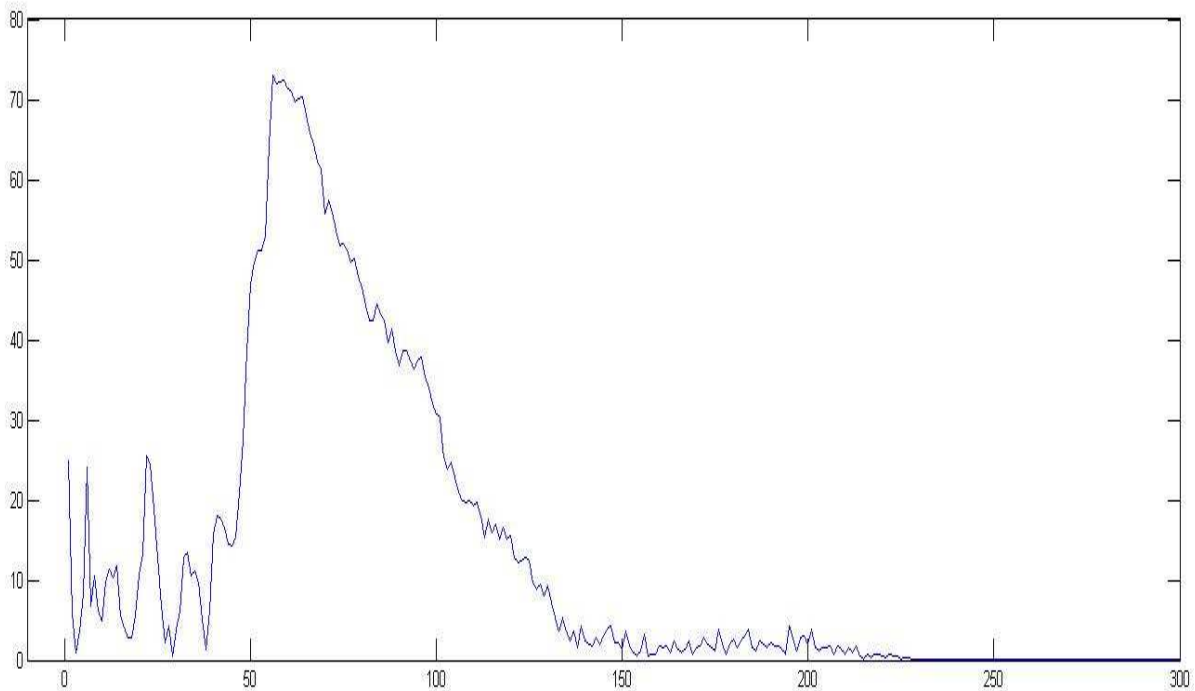
Σχήμα 43. Εξάλειψη των Ανακλάσεων από τους Εξασθηνητές.

Τώρα δεν υπάρχει το ανακλώμενο γιατί απορροφήθηκε από τους εξασθηνητές. Στο ίδιο σημείο φαίνεται ένα αχνό υπόλειμμα. Επομένως συμπεραίνουμε ότι για τη διασπορά δεν ευθύνονται ανακλάσεις στο κύκλωμα του πομπού αλλά η ίδια η κεραία και μόνο, η οποία φιλτράρει το φάσμα του παλμού της γεννήτριας και το πλαταίνει στο πεδίο του χρόνου. Υπολογίζοντας τους μετασχηματισμούς Fourier του παλμού της γεννήτριας και του σήματος λήψης επαληθεύουμε την παραπάνω σκέψη.



Σχήμα 44. Πλάτος Μετασχηματισμού Fourier του Παλμού της Γεννήτριας.

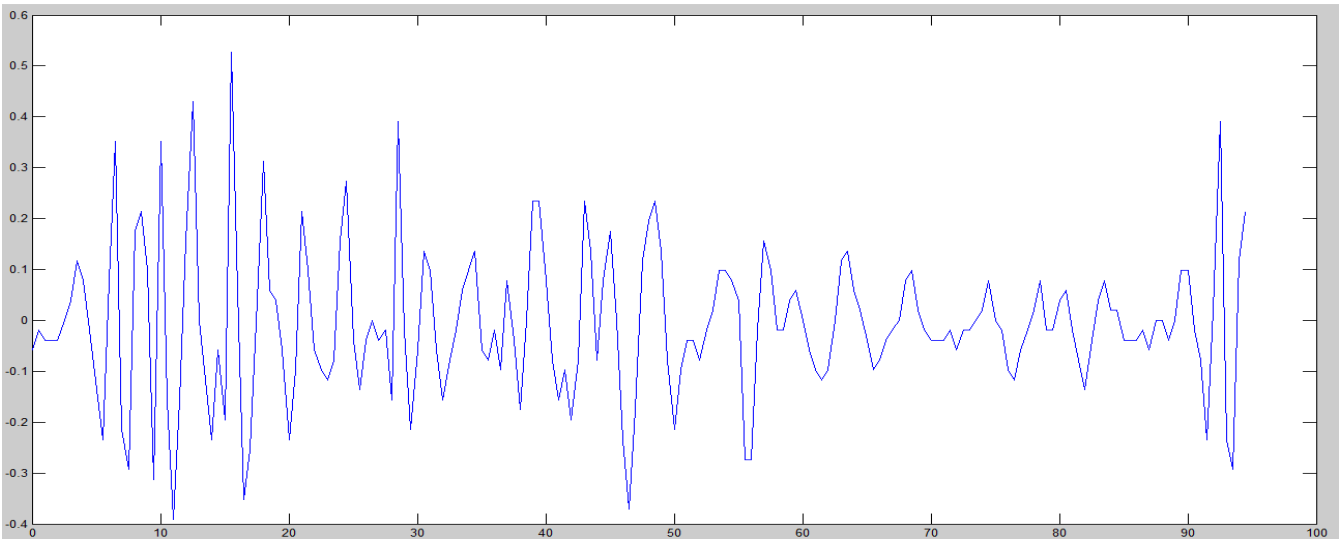
Τα φάσματα υπολογίστηκαν με τον αλγόριθμο γρήγορου μετασχηματισμού Fourier – Fast Fourier Transform (FFT). Για το συγκεκριμένο σχήμα χρησιμοποιήθηκαν 1000 σημεία. Ο άξονας επομένως δεν έχει φυσικό νόημα, όμως μπορούμε να υπολογίσουμε εύκολα το εύρος του φάσματος. Το χρονικό διάστημα που μετρήθηκε είναι 100 nsec, όσο το PRF της γεννήτριας, και αναπαρίσταται από 1000 σημεία. Δηλαδή το Δt είναι 0.1 nsec. Το βήμα στη συχνότητα είναι επομένως $\Delta B = \frac{1}{N \cdot \Delta t} = \frac{1}{1000 \cdot 0.5 \cdot 10^{-9}} = 10^7$ Hz ή 10 MHz. Έχω 1000 σημεία, άρα $B = 1000 \cdot 10 \text{ MHz} = 10 \text{ GHz}$. Το σήμα φθάνει μέχρι τον αριθμό 200, δηλαδή έχει φάσμα που εκτείνεται μέχρι κάτι περισσότερο από 2 GHz. Στο επόμενο σχήμα η κλίμακα είναι η ίδια.



Σχήμα 45. Πλάτος Μετασχηματισμού Fourier του Σήματος Λήψης.

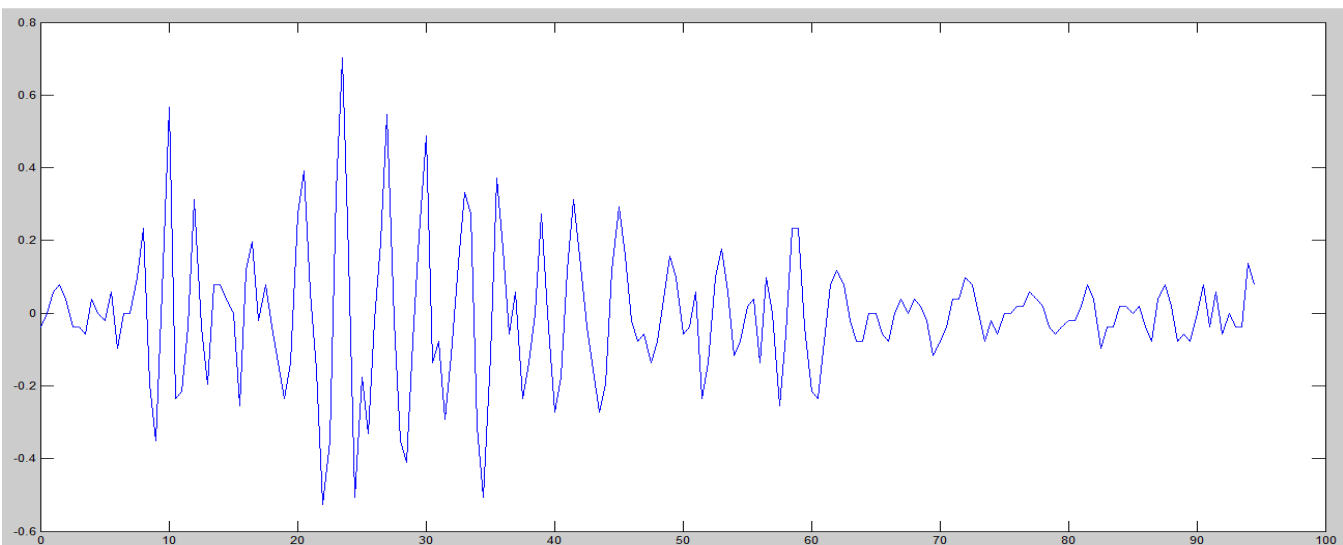
Βλέπουμε πώς ο διάυλος, δηλαδή οι δύο κεραίες και το μεταξύ τους διάστημα, έχουν παραμορφώσει το σήμα. Έχουν κοπεί οι χαμηλές συχνότητες και επίσης οι συχνότητες πάνω από 1 με 1.3 GHz.

Τα μεγάλα προβλήματα ξεκινούν όταν δούμε τις μετρήσεις των κεραιών του δέκτη με τη συνολική διάταξη σε λειτουργία. Παρουσιάζουμε ένα σχήμα από μια τυχαία κεραία και μετά θα προσπαθήσουμε να το εξηγήσουμε.



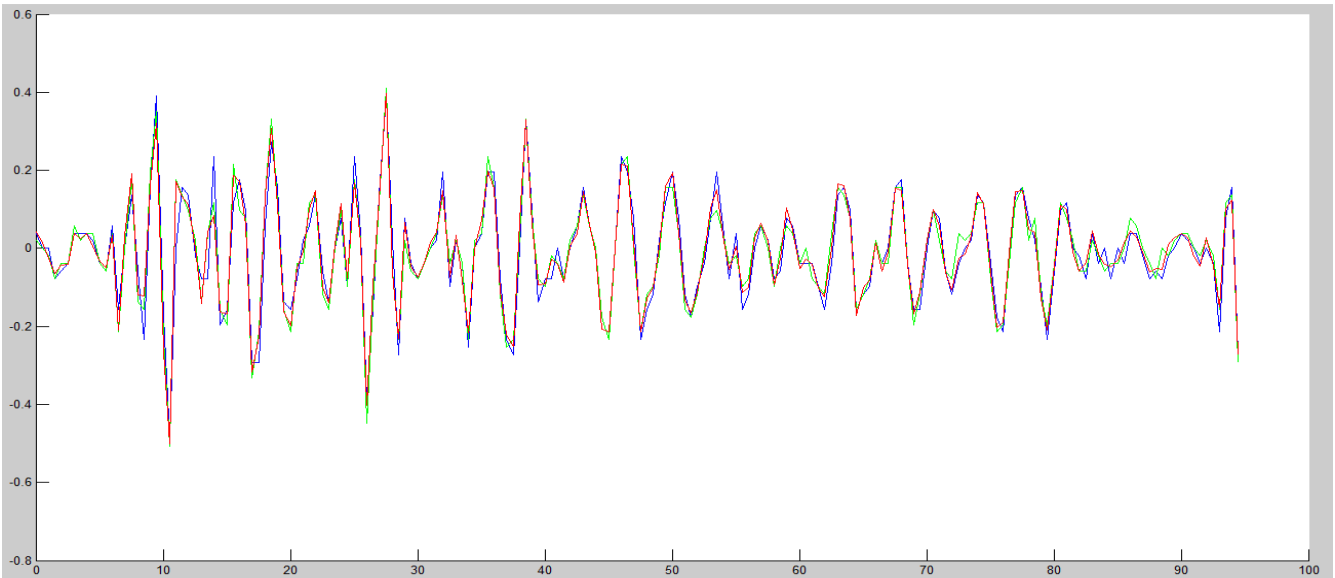
Σχήμα 46. Τυχαίο Δείγμα Μέτρησης από μια Κεραία της Διάταξης με Κενό Φόντο.

Αυτή είναι η λήψη της κεραίας 12 (τυχαία η επιλογή) στον ανηχοϊκό στο κενό, δηλαδή με λαμβανόμενο σήμα μόνο το απευθείας από τον πομπό. Ο άξονας είναι σε nanosecond. Βλέπουμε πως το σήμα αργεί λίγο να αυξηθεί. Αυτό οφείλεται στο χρόνο που χρειάζεται το trigger να μεταδοθεί από τη γεννήτρια και στο χρόνο που διαδίδεται στον αέρα το απευθείας σήμα ανάλογα την κεραία στην οποία αναφερόμαστε. Το σήμα διαρκεί υπερβολικά πολύ και σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα φθάνει και τα 40-50 nsec. Η περίοδος δε των μηδενισμών έχει αυξηθεί σε σχέση με την απλή λήψη από μία κεραία.



Σχήμα 47. Δείγμα Μέτρησης με Μεταλλική Πλάκα σε Απόσταση 20 εκατοστών.

Αυτή είναι η λήψη με μια μεταλλική πλάκα στους 20 πόντους από τη διάταξη των κεραίων. Θα έπρεπε να παρατηρήσουμε την ανάκλαση με διαφορά περίπου 1.5 nsec. Παρόλα αυτά δεν βλέπουμε κάτι τέτοιο. Μάλιστα μετά τα 20 nsec το σήμα αυξάνεται, ίσως επειδή εκείνες τις χρονικές στιγμές οι κεραίες συμβάλλουν ενισχυτικά. Να σημειωθεί και το γεγονός ότι οι μετρήσεις παρουσιάζουν μεγάλη σταθερότητα η μία συγκριτικά με την άλλη. Παρακάτω βλέπουμε δύο δείγματα καθώς και το μέσο όρο όλων των δειγμάτων για τη συγκεκριμένη κεραία, με κόκκινο χρώμα. Παρατηρούμε μόνο ελάχιστες μικροδιαφορές. Αυτό ισχύει για όλες τις κεραίες.



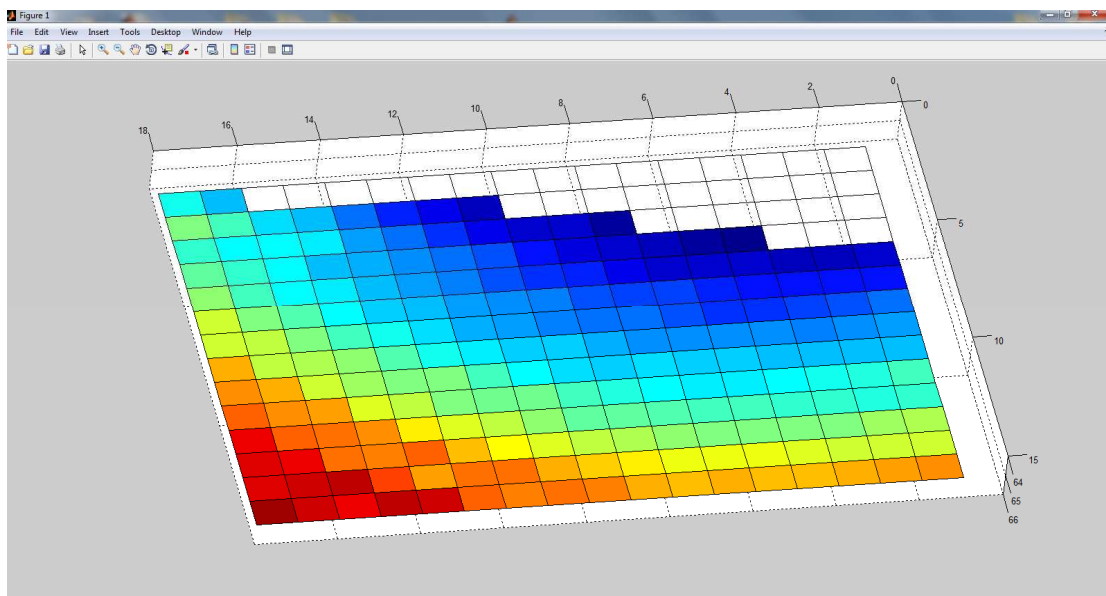
Σχήμα 48. Σύγκριση δειγμάτων με το Μέσο Όρο της Μέτρησης.

Σίγουρα αυτά δεν είναι σήματα που μπορούμε να επεξεργαστούμε. Ο πιθανότερος λόγος για τον οποίο αυτό συμβαίνει είναι ότι οι κεραίες του δέκτη επανεκπέμπουν. Ίσως βλέπουν διαφορετική σύνθετη αντίσταση προς τις δύο κατευθύνσεις, δηλαδή προς τον αέρα και προς το κύκλωμα του πολυπλέκτη, στο οποίο είναι τερματισμένες με αντίσταση 50 Ohm. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα το σήμα να ανακλάται, να δημιουργείται ένα στάσιμο στον κυματοδηγό κάθε κεραίας του δέκτη και η ακτινοβολήση να φθίνει πολύ αργά. Έτσι κάθε κεραία λαμβάνει ξανά και ξανά σήμα από τις γειτονικές της και καταγράφεται μια υπέρθεση όλων αυτών των σημάτων με μεγάλη τυχαιότητα.

Ίσως ένας άλλος λόγος να είναι περαιτέρω διασπορά από τις χαρακτηριστικές του φίλτρου και του ενισχυτή. Αυτό όμως δεν είναι πολύ πιθανό αφού θα έπρεπε μεν να βλέπουμε αυξημένη διάρκεια αλλά το σήμα θα έπρεπε επίσης να φθίνει, πράγμα που δε συμβαίνει.

Βέβαια ας μην ξεχνάμε ότι η διάταξη βρίσκεται ακόμη σε εργαστηριακό στάδιο και γίνονται δοκιμές για την καλύτερη λειτουργία της. Ένας τρόπος να απομονώσουμε τις κεραίες θα διορθώσει αρκετά το πρόβλημα.

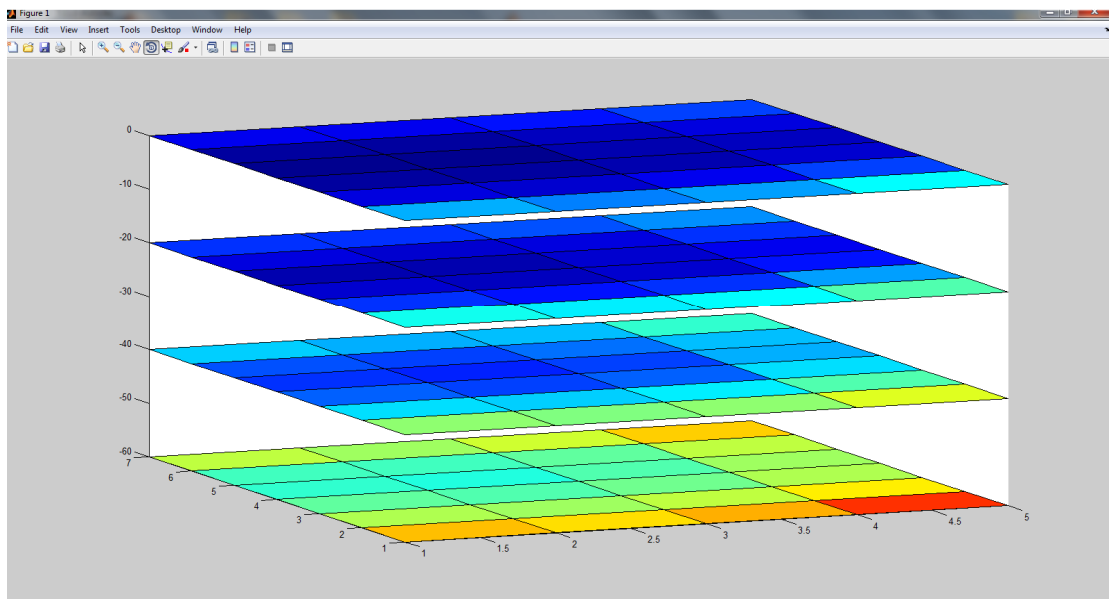
Πάντως για πληρότητα θα παρουσιαστεί η τελική μορφή που θα έχει η απεικόνιση.



Σχήμα 49. Απεικόνιση με τη μία Μεταβλητή Σταθερή.

Αυτή είναι μία φέτα στο επίπεδο $x=x_0$. Δηλαδή βλέπουμε τη μεταβολή για y και z . Ο πομπός είναι τοποθετημένος πάνω δεξιά. Όπως είδαμε οι μετρήσεις έχουν μεγάλη τυχαιότητα. Έτσι δεν περιμένουμε κάποιο σχήμα. Όμως καθώς απομακρυνόμαστε από τον πομπό παρατηρούμε πιο έντονα χρώματα. Αυτά οφείλονται στον παράγοντα της απόστασης. Δηλαδή ένα τυχαίο σήμα πολλαπλασιασμένο με το γινόμενο των διαδρομών διάδοσης.

Η τρισδιάστατη απεικόνιση θα έχει την παρακάτω μορφή. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να απεικονίσουμε ένα σχήμα με matlab. Ας πάρουμε αυτόν τώρα. Ο πομπός βρίσκεται στο βάθος της εικόνας. Όσο αυξάνεται το βάθος βλέπουμε και εδώ μεγαλύτερες τιμές. Επίσης όσο ερχόμαστε προς το μπροστά μέρος της εικόνας, αφού και έτσι αυξάνεται η συνολική απόσταση που διένυσε το σήμα. Στο μέσα άκρο επίσης έχουμε λίγο πιο έντονο χρώμα. Ο πομπός βρίσκεται πιο κοντά σ' αυτά τα σημεία.

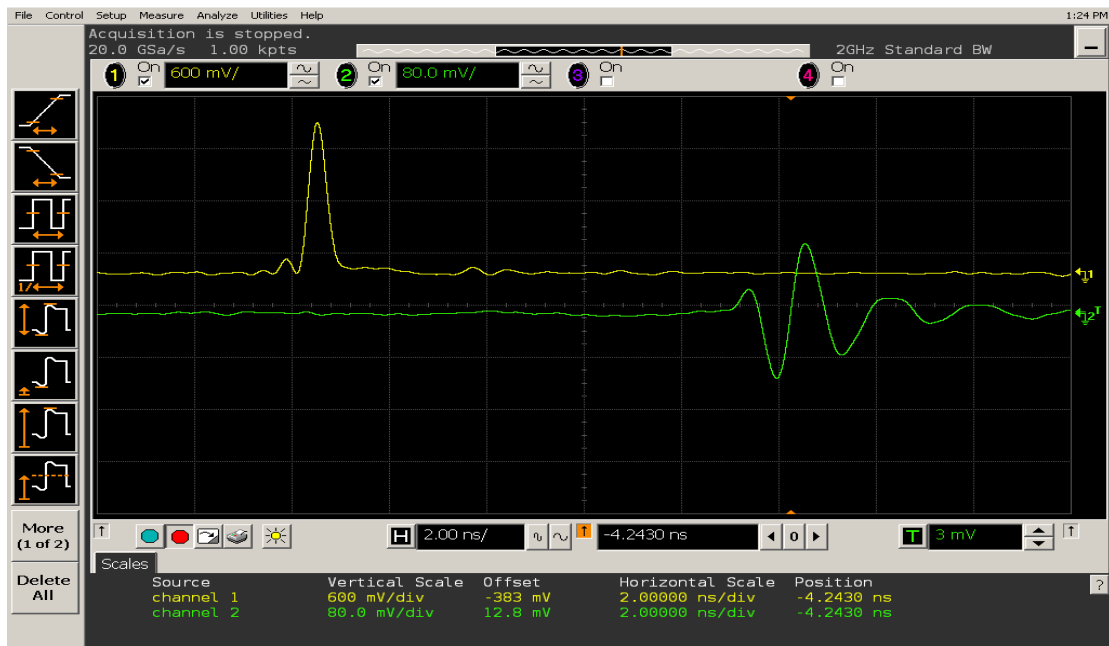


Σχήμα 50. Τρισδιάστατη Απεικόνιση.

Κεφάλαιο 5. Δοκιμή μιας Μεθόδου για Εξάλειψη της Διασποράς

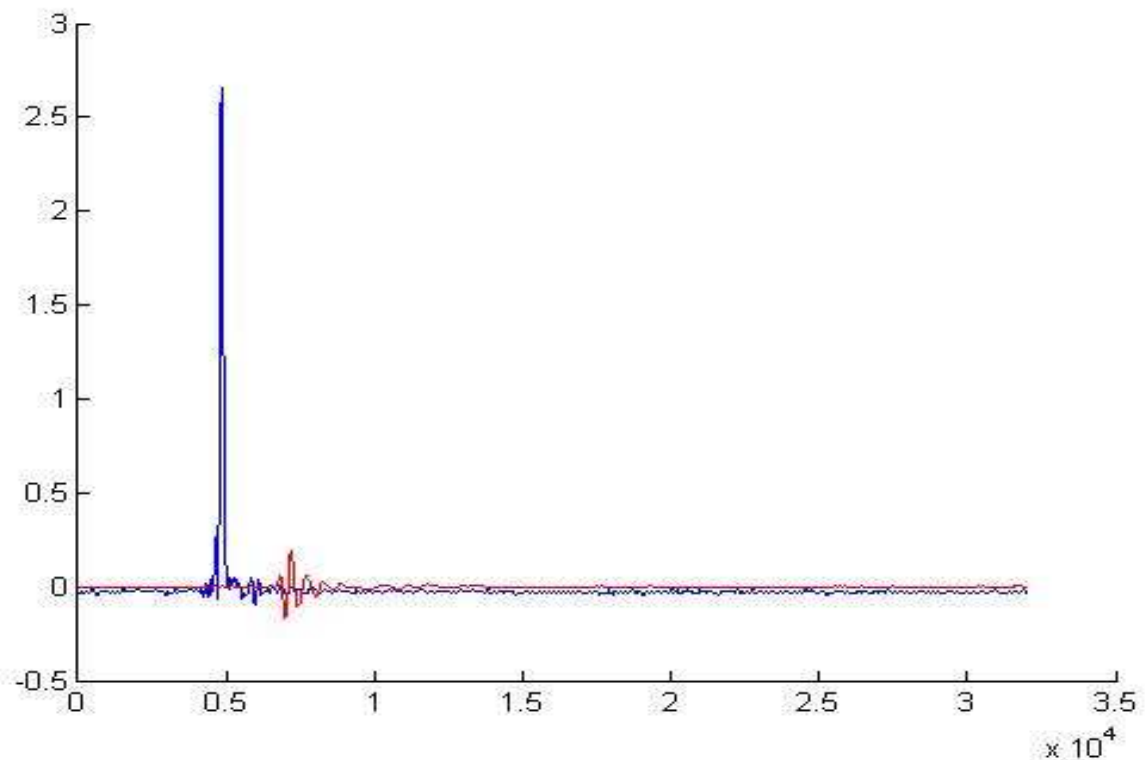
Αν μετρήσουμε με τον παλμογράφο στο πεδίο του χρόνου την έξοδο της γεννήτριας και το σήμα λήψης όταν έχουμε στον αέρα δύο κεραίες face to face, τότε ίσως μπορέσουμε να εξαλείψουμε τη διασπορά που εισάγουν οι κεραίες. Θεωρούμε ως δίαυλο τις δύο κεραίες καθώς και το κενό αναμεταξύ τους. Συμβολίζουμε με $h(t)$ τη συνάρτηση μεταφοράς αυτού του διαύλου και με $H(f)$ αντίστοιχα στο πεδίο της συχνότητας. Αν θεωρήσουμε γνωστά και πρότυπα τα σήματα εισόδου και εξόδου του διαύλου, υπολογίζοντας το μετασχηματισμό Fourier τους, μπορούμε να βρούμε τη χαρακτηριστική του διαύλου που εισάγει τη διασπορά. Αν τώρα έχουμε ένα σήμα που λαμβάνει μια από τις κεραίες λήψης και υπολογίσουμε τη συνέλιξη στο πεδίο του χρόνου του σήματος αυτού με την αντίστροφη της χαρακτηριστικής του διαύλου τότε θα πάρουμε ένα σήμα χωρίς διασπορά.

Ας δούμε βήμα βήμα τις δοκιμές που έγιναν. Έχουμε δύο μετρημένα σήματα που διαρκούν 100 nsec. Ο παλμογράφος έχει τη δυνατότητα να τα δειγματοληπτήσει με ρυθμό 320 Gsamples/sec. Για την ακρίβεια σε 100 nsec παίρνουμε 32017 δείγματα. Τα σήματα στο πεδίο του χρόνου φαίνονται στο επόμενο σχήμα.



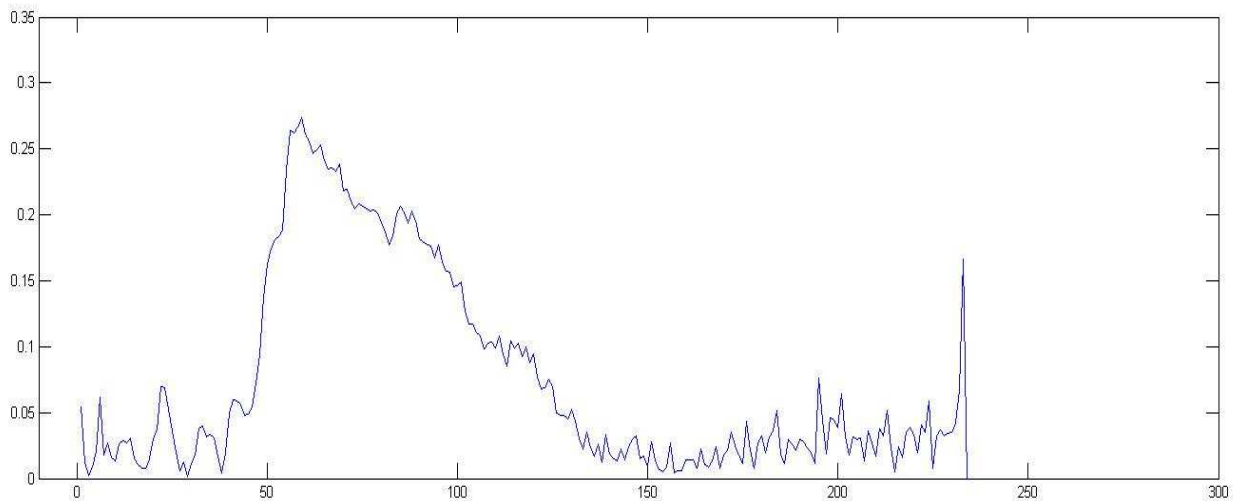
Σχήμα 51. Είσοδος και Έξοδος στο Δίαυλο των δύο Κεραίων.

Παρατηρούμε ότι οι κλίμακες των Volts για τα δύο σήματα διαφέρουν. Επίσης παρατηρούμε τη χρονική διαφορά των δύο σημάτων που είναι 4.5 div, δηλαδή 9 nsec, αφού το time/div είναι 2 nsec. Τα δεδομένα εισάγονται στο matlab και παρουσιάζονται ξανά στο σχήμα 67.

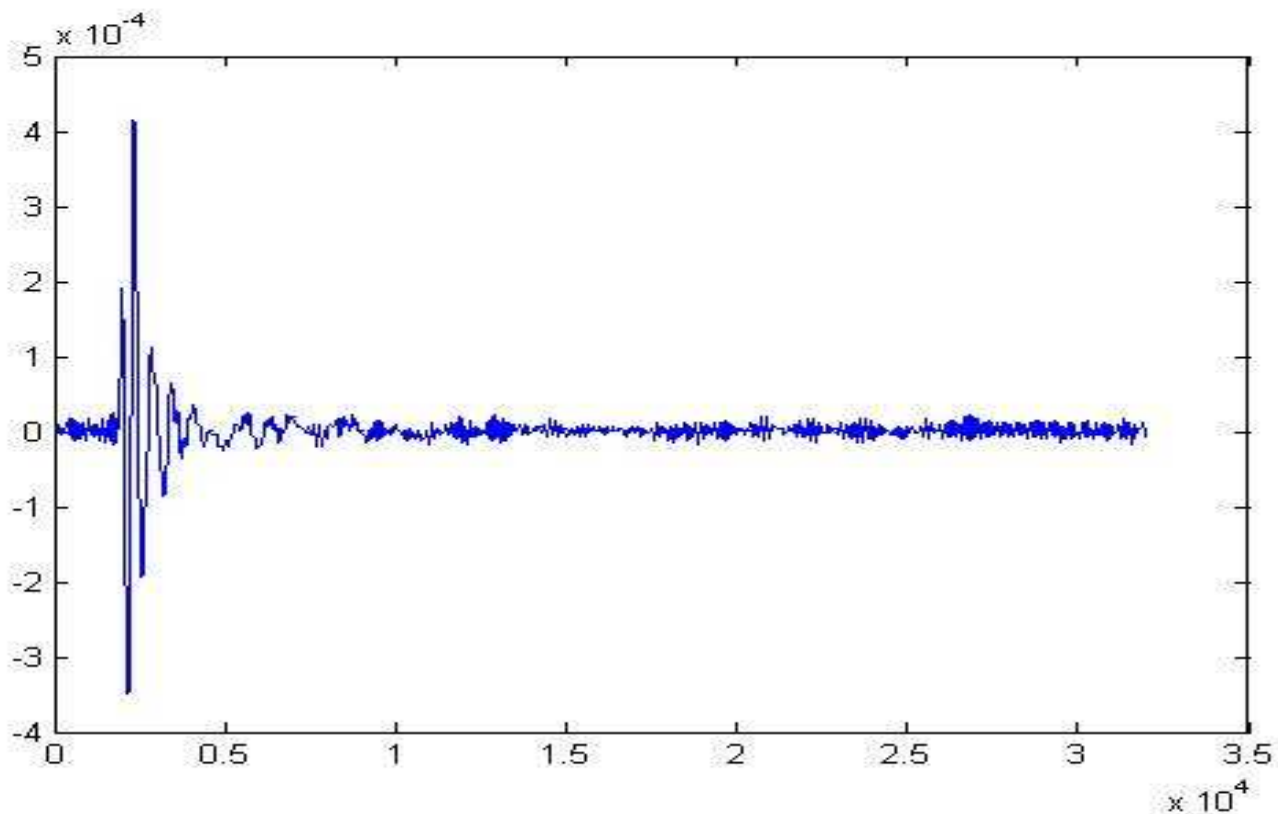


Σχήμα 52. Είσοδος και Έξοδος στο Δίαυλο των δύο Κεραιών-άξονας t , 32017 σημείων.

Οι μετασχηματισμοί Fourier των σημάτων αυτών έχουν δοθεί στα σχήματα 58, 59. Από το λόγο των φασμάτων τους βρίσκουμε τη συνάρτηση μεταφοράς $H(j\omega)$ και κατά συνέπεια τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier αυτής $h(t)$.

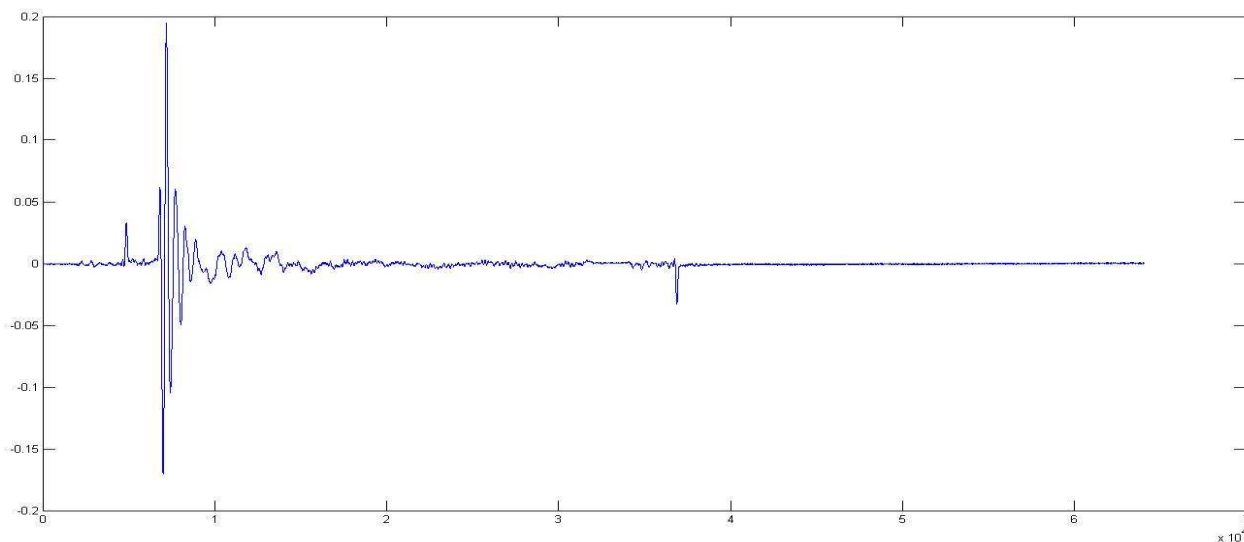


Σχήμα 53. Η $H(j\omega)$ σε Φάσμα που Εκτείνεται ως τα 2.33 GHz, μετά Κόβεται αφού είναι εκτός Εύρους Συχνοτήτων του Κύριου Σήματος.



Σχήμα 54. Χαρακτηριστική του Διαύλου $h(t)$ για το Διάστημα των 100 nsec. Αποτελεί το Πραγματικό Μέρος του $F^{-1}\{ H(j\omega) \}$.

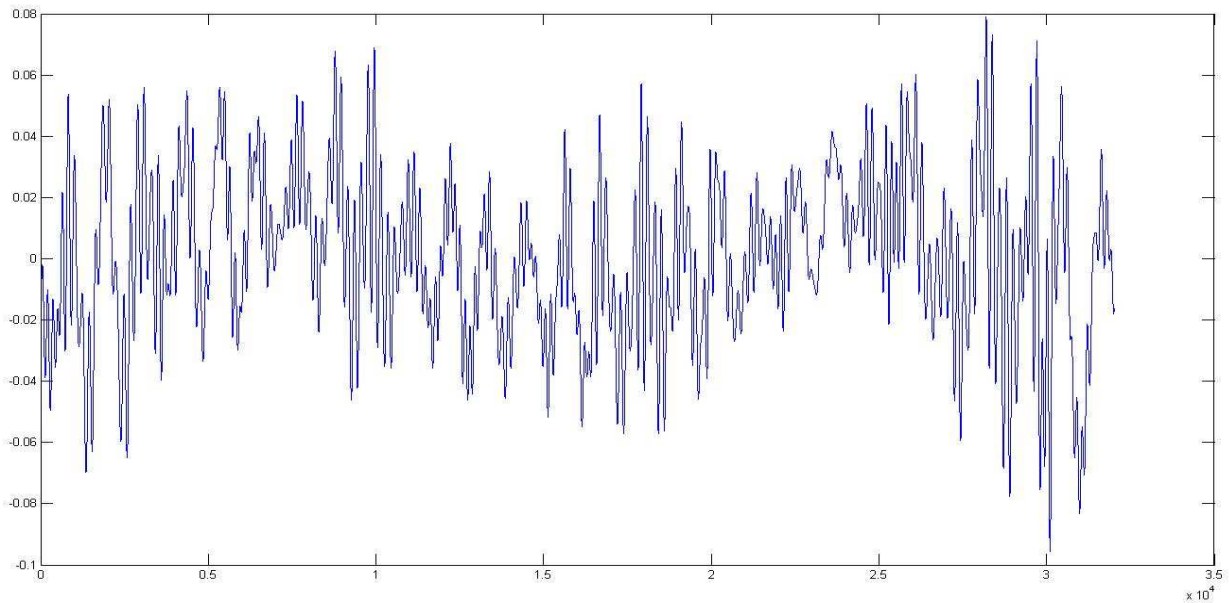
Πραγματοποιούμε δύο δοκιμές. Συνελίσσουμε στο πεδίο του χρόνου το σήμα εισόδου με τη συνάρτηση $h(t)$ για να πάρουμε το σήμα λήψης της κεραίας.



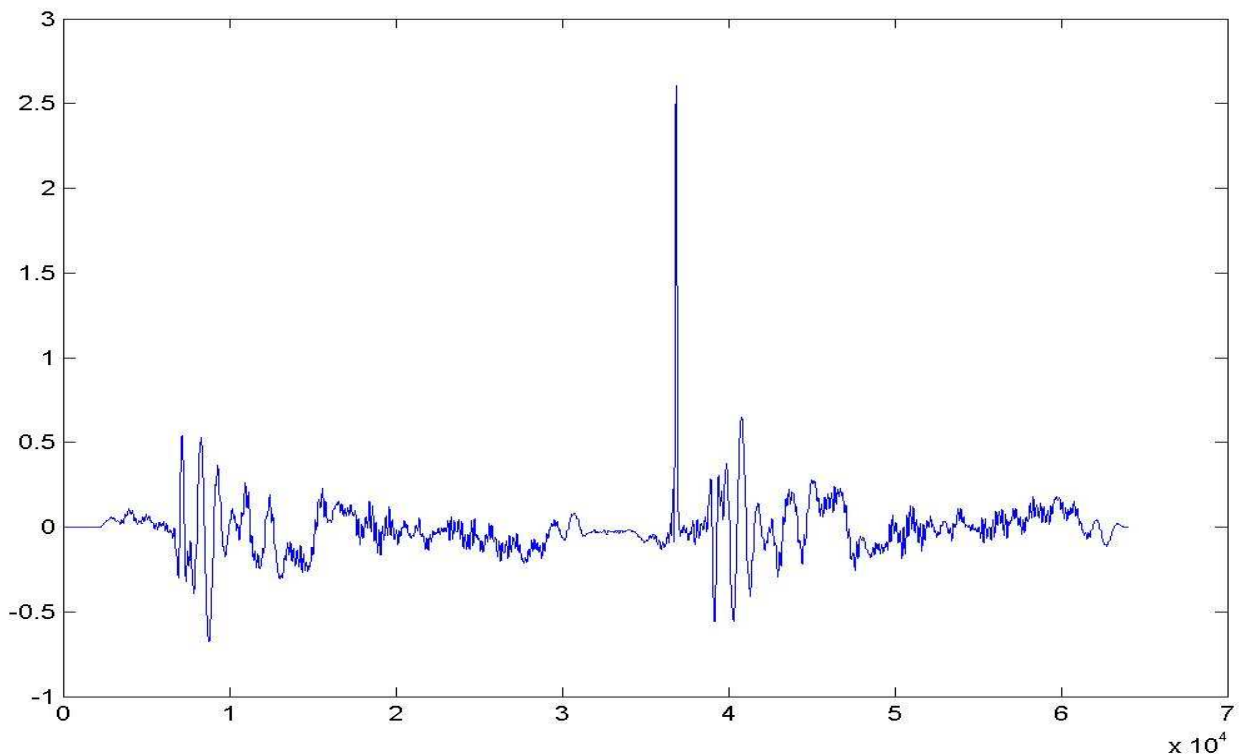
Σχήμα 55. Η Συνάρτηση $h(t)$ που Υπολογίσαμε Πράγματι Περιγράφει το Δίαυλο.

Εμφανίζεται και το σήμα εισόδου σε δύο σημεία. Σφάλματα συμβαίνουν λόγω της διακριτής μορφής των δεδομένων και του πεπερασμένου αριθμού σημείων που χρησιμοποιήθηκαν στον FFT.

Στη συνέχεια συνελίσουμε στο πεδίο του χρόνου το σήμα λήψης της κεραίας με την $h^{-1}(t)$ για να πάρουμε πάλι την είσοδο. Η $h^{-1}(t)$ υπολογίζεται ως $F^{-1}\{1 / H(j\omega)\}$.



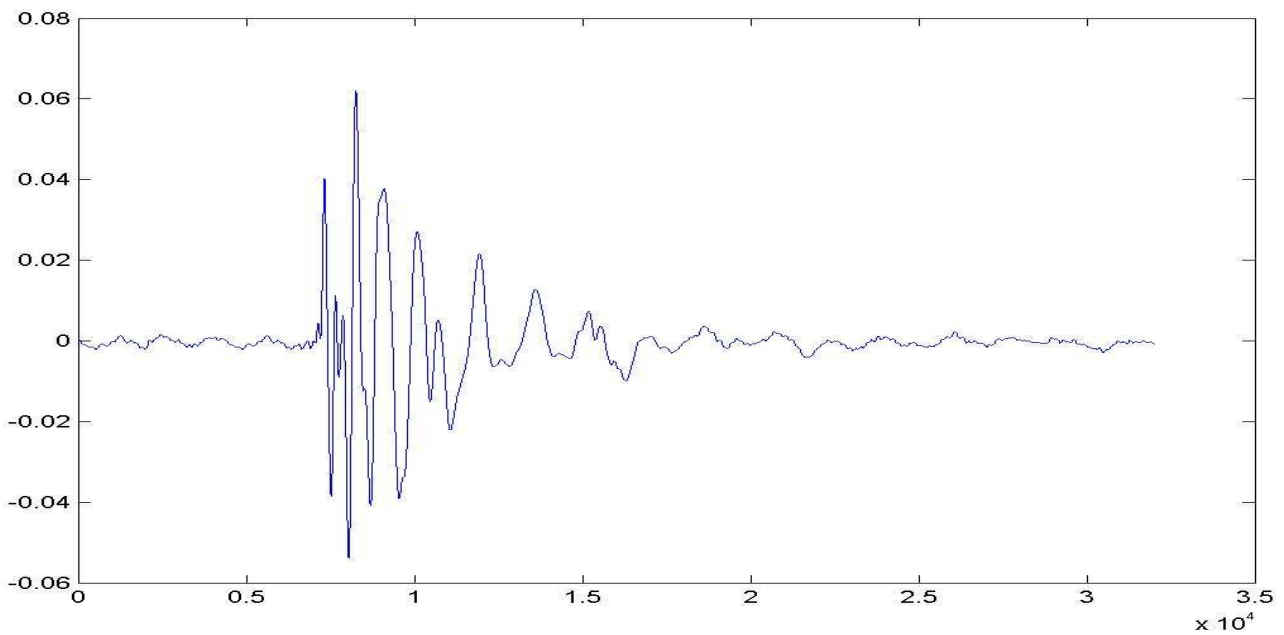
Σχήμα 56. Η $h^{-1}(t)$ για το Διάστημα των 100 nsec.



Σχήμα 57. Συνέλιξη του Σήματος Εξόδου του Διαύλου με την Αντίστροφη της Χαρακτηριστικής του Διαύλου για να Προκύψει και πάλι ο Παλμός της Γεννήτριας.

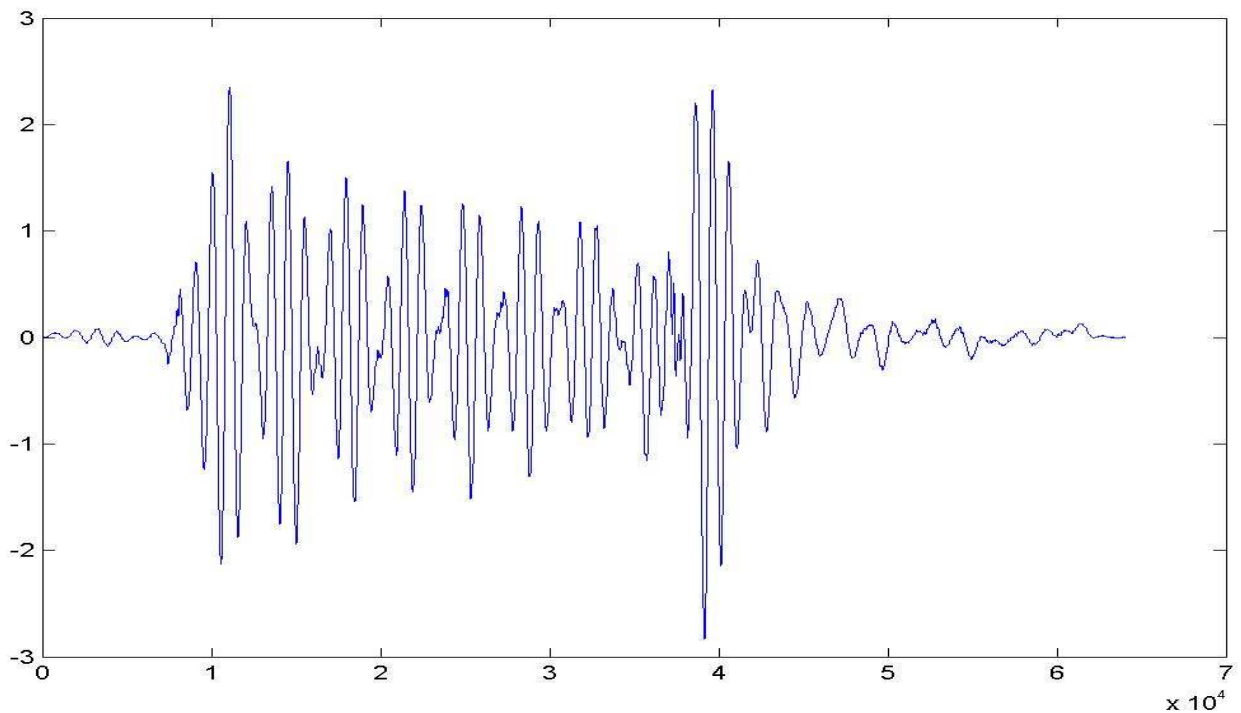
Παρατηρούμε ότι και πάλι εμφανίζεται το σήμα που συνελίσεται, το οποίο δεν εξαλείφεται εντελώς.

Τέλος, πραγματοποιείται η δοκιμή για την οποία στήθηκε το πείραμα. Αυτό είναι το σήμα προς επεξεργασία. Βλέπουμε το απευθείας και το από ανάκλαση να συμβάλλουν, εξού και οι δύο κορυφές.



Σχήμα 58. Σήμα από Ανάκλαση σύμφωνα με το Σχήμα 49 – απόσταση 55 cm.

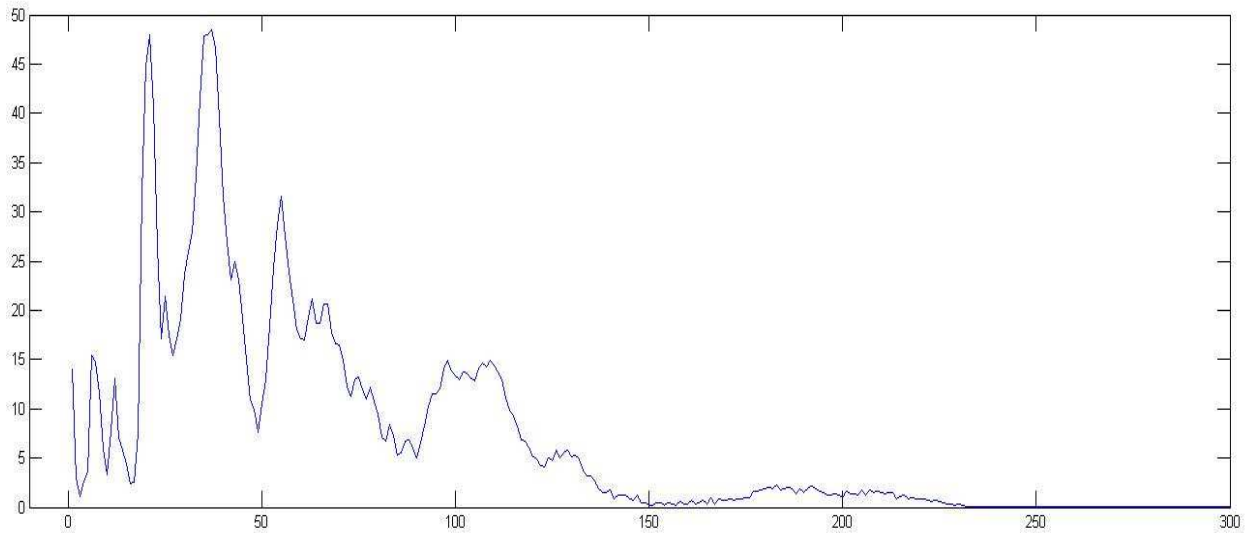
Μέχρι τώρα τα πράγματα δούλεψαν σωστά. Όμως σε αυτή την περίπτωση δεν εμφανίζονται οι δύο *Digas* από το απευθείας και το ανακλώμενο. Η εφαρμογή της χαρακτηριστικής ενός διαύλου A στη λήψη ενός άλλου διαύλου B δεν έδωσε κάποιο αποτέλεσμα παρόλο που στην ίδια μέτρηση ανακατασκεύασε το σήμα ικανοποιητικά.



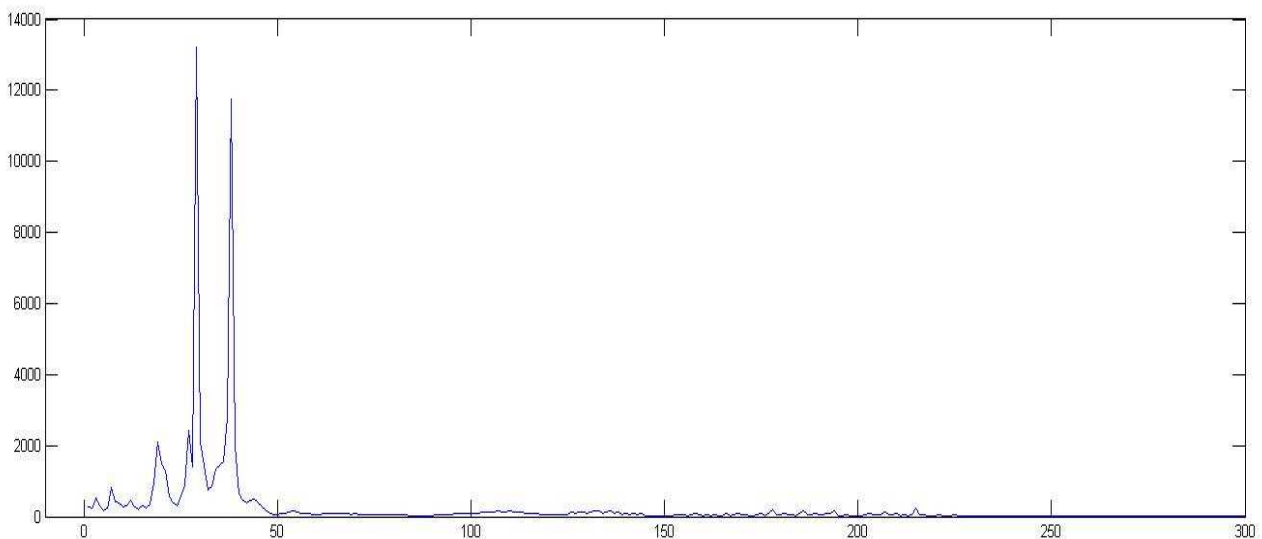
Σχήμα 59. Συνέλιξη του Σήματος του Σχήματος 72 με την $h^{-1}(t)$.

Μια βασική μορφή φαίνεται να επαναλαμβάνεται. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο μεγάλο μήκος του σωλήνα που έχει ως αποτέλεσμα πολλαπλές ανακλάσεις, βλέπε σχήμα 36. Αν είχαμε ένα αντικείμενο με πολύ μικρότερες διαστάσεις, μάλλον θα βλέπαμε μόνο μια επανάληψη της λήψης στις θέσεις όπου εμφανίζονται και στην προηγούμενη περίπτωση, δηλαδή γύρω από τα σημεία 10.000 και 40.000. Λίγο πριν το σημείο 40.000 κανονικά πρέπει να εμφανιστούν Dirac με αυξημένο πλάτος σε σχέση με το υπόλοιπο σήμα. Βλέπουμε σε εκείνο το σημείο έντονο χρώμα αλλά πολύ μικρό πλάτος. Με καλύτερο υπολογισμό της αντίστροφης συνάρτησης μεταφοράς του διαύλου μπορεί το πλάτος να αυξανε. Το λογισμικό όμως, παρόλο που προσφέρει μεγάλες δυνατότητες έχει και όρια, όπως και ο αριθμός των σημείων που μπορεί να μετρήσει ο παλμογράφος.

Μια τελευταία προσπάθεια είναι να δουλέψουμε πρώτα στο πεδίο της συχνότητας και μετά να γυρίσουμε στο χρόνο. Έστω ότι το ανακλώμενο σήμα είναι το $\gamma(t)$. Υπολογίζουμε αρχικά το μετασχηματισμό Fourier αυτού $Y(j\omega)$. Ύστερα το διαιρούμε με τη χαρακτηριστική του διαύλου $H(j\omega)$ και παίρνουμε αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier.

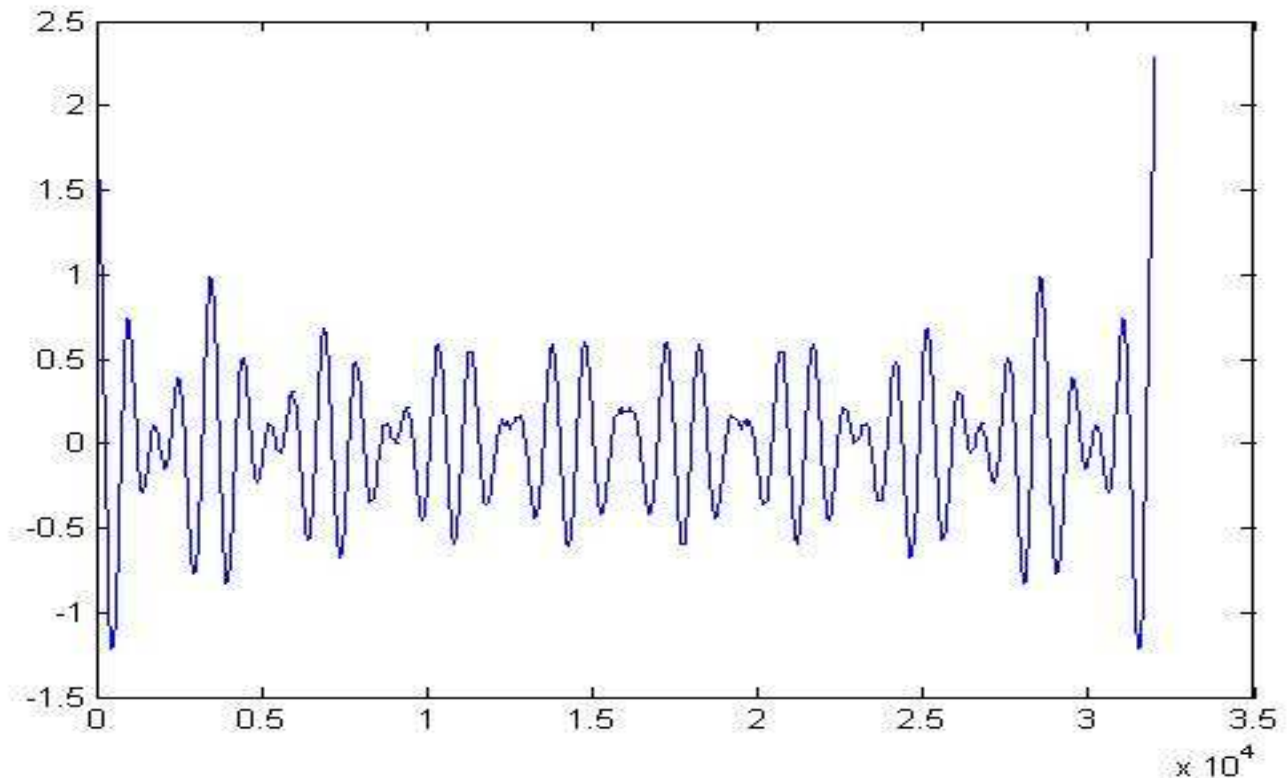


Σχήμα 60. Φάσμα του $\gamma(t)$.



Σχήμα 61. $Y(j\omega)/H(j\omega)$.

Το σήμα που θα προκύψει είναι το $\gamma(t)$ περασμένο εικονικά μέσα από τον αντίστροφο πρότυπο δίαυλο. Η διασπορά δεν εξαλείφεται και παίρνουμε το σήμα της παρακάτω εικόνας.



Σχήμα 62. $F^{-1}\{ Y(j\omega) / H(j\omega) \}$.

Έχει κάποια κοινά με την εικόνα του σχήματος 73. Πιστεύω ότι πρόκειται ουσιαστικά για το ίδιο σήμα αλλά τα επιμέρους βήματα εισάγουν σφάλματα που προκαλούν τις διαφορές. Εξάλλου οι δύο δρόμοι είναι ισοδύναμοι. Να τονίσουμε ότι τα μεγέθη είναι μιγαδικά και στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο της συχνότητας. Λαμβάνονται αντίστοιχα το μέτρο ή το πραγματικό μέρος της μιγαδικής συνάρτησης ανάλογα την περίπτωση. Έχει σημασία να αναφέρουμε ότι τα σχήματα 73 και 76 είναι πανομοιότυπα με ελάχιστες διαφορές για διαφορετικές αποστάσεις.

Επίλογος

Εδώ τελειώνουν τα όρια της μελέτης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Το ραντάρ είναι ακόμα υπό μελέτη και πολλές βελτιώσεις και αλλαγές μπορούν να γίνουν. Ίσως μια κεραία με μικρότερη διασπορά να κάνει τα πράγματα πιο εύκολα. Μένει να διευθετηθεί το ζήτημα της προσαρμογής και απομόνωσης των δεκτών για να δοκιμαστεί και η ισχύς του αλγορίθμου στην πράξη.

Ανακεφαλαιώνοντας να αναφέρουμε τα βασικά βήματα της έρευνας. Ξεκινήσαμε μελετώντας γενικά τα είδη μεθόδων που χρησιμοποιούνται για απεικόνιση του υπεδάφους. Τα GPR είναι ευρέως διαδεδομένα και χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τα παλμικά, η περίπτωση μας, και αυτά που παίρνουν τις απαραίτητες πληροφορίες εκπέμποντας διαμορφωμένο κατά συχνότητα σήμα.

Έχοντας την απαραίτητη γνώση, ασχολούμαστε με μια συγκεκριμένη διάταξη που έχει τα δικά της ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Αναλύουμε και κατανοούμε τη λειτουργία της και των επιμέρους χαρακτηριστικών της και στη συνέχεια κατασκευάζουμε ένα δικό μας αλγόριθμο, σύμφυτο με τη συμπεριφορά της.

Τέλος, μελετούμε και παρουσιάζουμε τις διαθέσιμες μετρήσεις, προσπαθώντας να εξηγήσουμε και να αντιμετωπίσουμε τις δυσκολίες που παρουσιάστηκαν. Το τελευταίο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην εύρεση ενός τρόπου να ξεπεράσουμε τα ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά της εκπομπής, αναφερόμενοι στη διασπορά.

Η μελέτη απεικόνισης μέσω ηλεκτρομαγνητικού πεδίου αποτελεί μια πολύ ενδιαφέρουσα και υποσχόμενη περιοχή έρευνας με τεράστιο εύρος εφαρμογών. Είναι σημαντικό να δοκιμάζουμε καινούρια πράγματα που μας δίνουν προσωπικές εμπειρίες και επεκτείνουν τη γνώση.

Παράρτημα

%Ξεκινώ ρυθμίζοντας τις μεταβλητές του κώδικα, οι οποίες παρατίθενται στην
%αρχή για ευκολία. Αυτές είναι η ανάλυση, resolution, ο αριθμός των δειγμάτων στο
%πεδίο του χρόνου, samples, και ο αριθμός των επαναλήψεων της μέτρησης για μία
%κεραία, segments. Με βάση την ανάλυση ρυθμίζεται και η περιοχή που θα
%απεικονιστεί, από τις μεταβλητές imax, jmax και zmax.

```
%variables  
imax=5;  
jmax=4;  
zmax=4;
```

```
segments=30;  
samples=190;  
resolution=30;
```

%Όλες οι αποστάσεις είναι σε second και οι χρόνοι σε nanosecond

%Οι ταχύτητες σε cm/nsec
u_air=3*10^1;

%Οι συντεταγμένες του πομπού
x0=60;
y0=-2;
z0=9.8;

%Το path που είναι αποθηκευμένο το αρχείο με τις μετρήσεις
address='C:\Users\metriseis';

%Το πρώτο βήμα στον κώδικα είναι να ανοίξουμε το αρχείο με τις μετρήσεις.
%Οι μετρήσεις είναι σε ένα διάνυσμα στη σειρά, γι' αυτό αναδιατάσσουμε τον
%πίνακα, ώστε να έρθει σε πιο βολική μορφή.

%Διαβάζω το αρχείο
E=fopen(address,'r','b');
E=fread(E,inf,'single');

%Αναδιατάσσω τον πίνακα του αρχείου
Ereshape=reshape(E,samples,repeat,32);

%Υπολογίζω τους μέσους όρους από το αρχείο
%Αρχικοποιώ τον πίνακα Psum
for k=1:32
 for i=1:samples,
 Esum(k,i)=0;
 end
end

%Υπολογίζω τους μέσους όρους από το αρχείο καθώς και τις απόλυτες τιμές
%τους, Για να μην έχω θετικές και αρνητικές τιμές και δημιουργείται
%σύγχυση, παίρνω τις απόλυτες τιμές και απλά κοιτάζω το πλάτος για να δω τη συμβολή κάθε
%σημείου.

```

for k=1:32
    for i=1:samples
        for j=1:segments,
            Esum(k,i)=Esum(k,i)+Ereshape(i,j,k);
        end
    end
end

```

```

for k=1:32
    for i=1:samples,
        Eav(k,i)=Esum(k,i)/segments;
        Eav_apol(k,i)=abs(Eav(k,i));
    end
end

```

%Στη συνέχεια υπολογίζω τις συντεταγμένες των σημείων του υπεδάφους.
 %Το έδαφος έχει z=0 και το υπέδαφος z<0.
 %Κβαντίζω το χώρο με απόσταση resolution.
 %Αρχή του χώρου θεωρείται η μία γωνία της τετραγωνικής διάταξης.

```

for i=1:imax
    for j=1:jmax
        for z=1:zmax,
            ground_x(i,j,z)=distance*(i-1);
            ground_y(i,j,z)=distance*(j-1);
            ground_z(i,j,z)=distance*(-z+1);
        end
    end
end

```

%Και εδώ δίνονται οι συντεταγμένες των κεραιών της διάταξης του δέκτη.

```

antenna_x=[11 25 39 53 67 81 95 109 109 95 81 67 53 39 25 11 11 25 39 53 67 81 95 109 109 95 81
67 53 39 25 11];

```

```

antenna_y=[77 77 77 77 77 77 77 77 57 57 57 57 57 57 57 57 37 37 37 37 37 37 37 37 17 17 17 17
17 17 17 17];

```

```

antenna_z=13.8;

```

%Υπολογίζονται οι αποστάσεις και οι χρόνοι μεταξύ του πομπού και των
 %δεκτών, δηλαδή ο χρόνος που διαδίδεται το απευθείας.

```

for k=1:32,
    d(k)=((x0-antenna_x(k))^2+(y0-antenna_y(k))^2+(z0-antenna_z)^2)^0.5;
    t(k)=d(k)/u_air;
end

```

%Υπολογίζονται οι αποστάσεις και οι χρόνοι μεταξύ του πομπού και των
 %σημείων του υπεδάφους για να πάει το κύμα και μετά οι αποστάσεις και οι χρόνοι μεταξύ των
 %σημείων του υπεδάφους και των δεκτών για να %γυρίσει, δηλαδή, το κύμα, καθώς και οι συνολικές
 %αποστάσεις και %χρόνοι.

```

for i=1:imax
    for j=1:jmax
        for z=1:zmax
            for k=1:32,
                d1(i,j,z,k)=((x0-ground_x(i,j,z))^2+
                    (y0-ground_y(i,j,z))^2+
                    (z0-ground_z(i,j,z))^2)^0.5;
                t1(i,j,z,k)=d1(i,j,z,k)/u_air;

                d2(i,j,z,k)=((antenna_x(k)-ground_x(i,j,z))^2+
                    (antenna_y(k)-ground_y(i,j,z))^2+
                    (antenna_z-ground_z(i,j,z))^2)^0.5;
                t2(i,j,z,k)=d2(i,j,z,k)/u_air;

                d_tot(i,j,z,k)=d1(i,j,z,k)+d2(i,j,z,k);
                t_tot(i,j,z,k)=t1(i,j,z,k)+t2(i,j,z,k);
            end
        end
    end
end

```

%Υπολογίζονται οι ελάχιστοι και μέγιστοι χρόνοι διάδοσης. Για ποιες κεραίες και ποια σημεία; Αυτό γίνεται για λόγους μελέτης και επαλήθευσης.

```

min=30;
max=0;

```

```

for i=1:imax
    for j=1:jmax
        for z=1:zmax
            for k=1:32,
                if min>t_tot(i,j,z,k),min=t_tot(i,j,z,k);
                    ,i1=i; ,i2=j; ,i3=z; ,i4=k; , end

                if max<t_tot(i,j,z,k),max=t_tot(i,j,z,k);
                    j1=i; , j2=j; , j3=z; , j4=k; , end
            end
        end
    end
end
end

```

%Και στη συνέχεια περνάμε στην επεξεργασία των μετρήσεων. Κατ' αρχήν παραμεθάζουμε στα δείγματα κάθε κεραίας για να βρούμε τη συμβολή κάθε ενός διακριτού σημείου του χώρου.

```

%interpolation-interp1-spline
t=3:0.5:(samples-1)*0.5+3;

```

```

for i=1:imax
    for j=1:jmax
        for z=1:zmax
            for k=1:32,
                E_t(i,j,z,k)=interp1(t,squeeze(Eav_apol(k,:)),
                    t_tot(i,j,z,k),'spline');
            end
        end
    end
end
end

```

%Υπολογίζεται ο συντελεστής ανάκλασης r. Γι' αυτό το λόγο λαμβάνω υπόψη και την απόσταση. Ο %συντελεστής ανάκλασης κάθε σημείου υπολογίζεται από όλες τις κεραίες, γι' αυτό το λόγο ένας %νέος μέσος όρος όλων αυτών των τιμών πρέπει να παρθεί.

```
for i=1:imax
    for j=1:jmax
        for z=1:zmax
            for k=1:32,
                r(i,j,z,k)=E_t(i,j,z,k)*d1(i,j,z,k)*d2(i,j,z,k);
            end
        end
    end
end
```

%Αρχικοποίηση του r_sum

```
for i=1:imax
    for j=1:jmax
        for z=1:zmax,
            r_sum(i,j,z)=0;
        end
    end
end
```

%Υπολογισμός του rsum και του μέσου r_av.

```
for i=1:imax
    for j=1:jmax
        for z=1:zmax
            for k=1:32,
                r_sum(i,j,z)=r_sum(i,j,z)+r_apol(i,j,z,k);
            end
            r_av(i,j,z)=r_sum(i,j,z)/32;
        end
    end
end
```

%Και τέλος γίνεται η απεικόνιση. Κάθε επίπεδο z αντιστοιχίζεται σε μία %οριζόντια φέτα στο τρισδιάστατο διάγραμμα.

```
hold on
for zi=1:zmax
    for i=1:imax
        for j=1:jmax,
            h_z(i,j)=-distance*(zi-1);
        end
    end
    surfc(h_z,squeeze(r_av_apol(:,zi)))
end
hold off
```


Αναφορές

[1] Ahmet Serdar Turk, Ali Koksai Hocaoglu, ``Encyclopedia of RF and Microwave Engineering``, volume 1, Buried Object Detection, 2005.

[2] Κατάλογος του <ftp://ftp.esd.ece.ntua.gr/>, book IWA, WATERPIPE book_IWA_partners edition_v2-rev1 AQUASERV.doc.