



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ

**Καινοτομική Πλατφόρμα Επικοινωνίας για Δίκτυα
MEMs Αισθητήρων Βιοϊατρικής**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΧΡΗΣΤΟΥ Β. ΗΛΙΟΥΔΗ

Επιβλέπων καθηγητής : Μιχαήλ .Ε. Κιζήρογλου

Επιβλέπων μέλος Δ.Ε.Π : Μαλαματή Λούτα

Κοζάνη, Μάρτιος 2012

Περίληψη

Τα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSNs) βελτιώνουν και προσδίδουν νέες δυνατότητες σε σημαντικούς τομείς που αφορούν την ποιότητας ζωής, όπως η υγειονομική φροντίδα ασθενών, η ασφάλεια κτιρίων και η τήρηση των κανόνων υγιεινής των τροφίμων. Η τροφοδοσία ισχύος των κόμβων των αισθητήρων αποτελεί μια μεγάλη πρόκληση για αυτές τις εφαρμογές, καθώς οι μπαταρίες, που χρησιμοποιούνται, είναι ογκώδεις και απαιτούν επαναφόρτιση, πράγμα ασύμφορο πρακτικά σε απομακρυσμένες περιοχές και για μεγάλο αριθμό αισθητήρων. Για αυτόν τον λόγο, πολλές έρευνες επικεντρώνονται στην δημιουργία συσκευών με χαμηλή κατανάλωση, ενώ έχουν αναπτυχθεί καινοτόμες πηγές ενέργειας όπως είναι οι συσκευές συλλογής ενέργειας (energy harvesting devices). Παρόλο που έχουν προταθεί ήδη ραδιοσυστήματα υψηλής απόδοσης, με χαμηλή κατανάλωση και ρυθμό μετάδοσης στην περιοχή των μερικών kbps, υπάρχουν εφαρμογές όπου απαιτείται ρυθμός λήψης δεδομένων πολύ χαμηλότερος από την τιμή αυτή, ακόμα και χαμηλότερος από 1bps. Για αυτό τον λόγο οι εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων περιλαμβάνουν προγραμματισμό των κόμβων ώστε να βρίσκονται τον περισσότερο χρόνο σε κατάσταση αναμονής (idle or sleep mode). Αυτό αφορά κυρίως το σύστημα πομπού-δέκτη, το οποίο θα πρέπει να λειτουργεί για σύντομο χρόνο κατά την αποστολή ή λήψη δεδομένων, με μεγάλους ρυθμούς και να τίθεται αμέσως σε κατάσταση αναμονής. Η προσέγγιση είναι πολύ αποδοτική, αλλά περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την κατανάλωση ενέργειας κατά την αναμονή, η οποία είναι σημαντική ιδίως σε περιπτώσεις όπου απαιτείται λειτουργία μεγάλης διάρκειας. Μια απλή επικοινωνιακή πλατφόρμα για ασύρματους αισθητήρες προτάθηκε πρόσφατα, και περιλαμβάνει άμεση αποφόρτιση της εξόδου του αισθητήρα ή του συλλέκτη, σε μια κεραία βρόχου. Τα χαρακτηριστικά του αντίστοιχου ηλεκτρομαγνητικού παλμού, που μπορούν να ανιχνευθούν τοπικά, αντιπροσωπεύουν τις πληροφορίες του αισθητήρα. Σε αυτήν την διπλωματική, μελετώνται τα χαρακτηριστικά ενός τέτοιου ταλαντωτή LC. Η συχνότητα, το πλάτος και οι συντελεστές ποιότητας των ταλαντωτών παρουσιάζονται για διαφορετικές τιμές του πυκνωτή C και για διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κεραίας βρόχου. Οι ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί, ανιχνεύονται σε απόσταση έως 1 μέτρου από τον ταλαντωτή και παρουσιάζονται οι μεταδιδόμενες πληροφορίες. Τα αποτελέσματα αυτά, αποδεικνύουν πως η τοπική μετάδοση πληροφορίας με ρυθμό ενέργειας 1nJ/byte είναι εφικτή σε εφαρμογές όπου χρησιμοποιείται χαμηλή ταχύτητα μετάδοσης.

Λέξεις Κλειδιά: Ταλαντωτής LC, Εκπομπός Χαμηλής Ισχύος, Ασύρματοι Αισθητήρες.

Abstract

Wireless sensor networks (WSNs) may improve and offer new possibilities in critical areas of life quality such as patient health care, safety of buildings and food hygiene standards monitoring. Powering sensor nodes is a major challenge for such applications, as batteries are bulky and require recharging, which is not practical in cases involving remote locations or large numbers of sensors. For this reason, a lot of research has focused on low power electronics for sensors, while novel electrical power sources such as energy harvesting devices have been developed. While highly efficient low power radio systems with transmission bit rates in the range of a few kbps have already been proposed, there are applications where the required data collection rate is much lower, even below 1 bps. For this reason, WSN implementations typically involve programming nodes to spend most time in sleep mode, at least for the transceiver, waking up only to quickly send/receive information in a high bit rate and go back to sleep. This approach is very effective but it is ultimately limited by sleep-mode consumption, which is substantial, especially for cases where long term operation is required. Recently, a very simple transmission platform for wireless sensors has been proposed involving direct discharge of a sensor/harvester output into a loop antenna. The characteristics of the corresponding electromagnetic pulse, which can be detected locally, represent sensor information. In this work, the characteristics of such LC oscillation transmitters are studied. The frequency, amplitude and quality factor of oscillations are presented for different C values and loop antenna geometrical characteristics. The electromagnetic pulses are detected at a distance up to 1 m from the oscillator and transmission of information is demonstrated. These results show that local transmission of information with energy rate of 1 nJ/byte may be possible for low bit rate applications.

Keywords: *LC Oscillator; Low Power Transmitter; Wireless Sensors.*

Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δρ. Μιχαήλ Ε. Κυζίρογλου, για την ενθάρρυνση του κατά την διάρκεια της διπλωματικής μου διατριβής. Η υποστήριξή του ήταν άμεση και καθοριστική ώστε να ολοκληρωθεί κατά το καλύτερο δυνατόν η παρούσα εργασία σε ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την καθηγήτρια Δρ. Μαλαματή Λούτα που αποτέλεσε υπεύθυνο μέλος Δ.Ε.Π. της παρούσας εργασίας καθώς και την καθηγήτρια Δρ. Σωτηρία Δ. Ψωμά για πολύτιμη βοήθειά τους. Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου για την αγάπη τους και την αμέριστη υποστήριξή τους.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή	1
1.1	Δίκτυα MEMS αισθητήρων βιοϊατρικής	1
1.2	Αντικείμενο διπλωματικής.....	1
1.2.1	Συνεισφορά	2
1.3	Οργάνωση κειμένου.....	2
2	Ανασκόπηση της Έρευνας	4
2.1	Εκπομπή Σήματος Χαμηλής Ενέργειας	5
3	Θεωρητικό υπόβαθρο	7
3.1	Συλλογή Ενέργειας (Energy Harvesting).....	7
3.1.1	Συλλέκτες Ενέργειας Κίνησης (Motion Energy Harvesters).....	9
3.2	Κεραίες.....	12
3.2.1	Κυκλικές Κεραίες Βρόχου	17
4	Σχεδίαση Πλατφόρμας Επικοινωνίας	18
4.1	Αρχιτεκτονική.....	18
4.2	Περιγραφή Λειτουργιών	19
4.2.1	Συλλέκτης Ενέργειας (Energy Harvester)	19
4.2.2	Εκπομπός (Transmitter).....	20
4.2.3	Παλμογράφος (Oscilloscope).....	22
5	Επιλογές παραμέτρων και ανάλυση Πλατφόρμας Επικοινωνίας	24
5.1	Επιλογές τιμών.....	24
5.2	Ανάλυση παραμέτρων Πλατφόρμας Επικοινωνίας	25
5.2.1	Μελέτη κυματομορφής.....	25
5.2.2	Επιδερμικό Φαινόμενο (Skin Effect).....	27
5.2.3	Αντίσταση Ακτινοβολίας της Κεραίας (Antenna Radiation Resistance).....	32
5.2.4	Συντελεστής Ποιότητας Q (Quality Factor).....	33
5.2.5	Ισχύς σήματος.....	34
6	Προσομοίωση Πλατφόρμας Επικοινωνίας	37

6.1	Αποτελέσματα Προσομοίωσης μέσω Spice.....	37
6.2	Σύγκριση Αποτελεσμάτων ως προς την Συχνότητα	41
7	Υλοποίηση Πλατφόρμας Επικοινωνίας	42
7.1	Λεπτομέρειες υλοποίησης.....	42
7.1.1	Υλοποίηση του κυκλώματος τροφοδοσίας.....	42
7.1.2	Υλοποίηση της Κεραίας Βρόγχου.....	43
7.1.3	Φόρτιση, Αποφόρτιση και Διακόπτες.....	44
7.1.4	Συνδεσμολογία	45
7.2	Όργανα μέτρησης και απαραίτητο λογισμικό.....	45
7.2.1	Βασικές ρυθμίσεις παλμογράφου.....	46
8	Μέτρηση Φορτίου στον Πομπό	47
8.1	Κυματομορφές Πειραματικών Μετρήσεων.....	47
8.2	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	51
8.2.1	Συχνότητα εκπομπής f	51
8.2.2	Συντελεστής ποιότητας Q	53
9	Μέτρηση Φορτίου στον Δέκτη	57
9.1	Επιλογή Παραμέτρων Μέτρησης.....	57
9.1.1	Κεραία Λήψης	57
9.1.2	Πυκνωτής Κυκλώματος Λήψης	58
9.1.3	Τάση Εκφόρτισης	58
9.2	Κατασκευή Δέκτη	58
9.3	Παρουσίαση Κυματομορφών	59
9.4	Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	62
9.4.1	Μελέτη κυματομορφών.....	62
9.4.2	Ισχύς σήματος.....	65
9.4.3	Ισχύς θορύβου και δυνατότητα λήψης	69
9.4.4	Ανάκτηση της κυματομορφής του λαμβανόμενου σήματος - Φιλτράρισμα θορύβου (Signal Recovering - Noise filtering)	71
10	Επίλογος	74
10.1	Σύνοψη και Συμπεράσματα.....	74
10.2	Μελλοντικές επεκτάσεις	75

Παράρτημα Α.....	76
Βιβλιογραφία.....	81

1

Εισαγωγή

1.1 Δίκτυα MEMS αισθητήρων βιοϊατρικής

Έναν πολύ σημαντικό και αναπτυσσόμενο κλάδο της βιοϊατρικής αποτελούν τα ανθρώπινα εμφύτευμα και οι μικρο-αισθητήρες. Μέσω αυτών μπορούμε να εξάγουμε πληροφορίες για κάποιον ασθενή χωρίς αυτός να χρειάζεται να υποβληθεί σε κάποια επέμβαση.

Μέχρι στιγμής τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που υπάρχουν για μικρο-αισθητήρες εστιάζουν σε ταχύτητες της τάξης των δεκάδων kilo-bits-per-second (kbps) και εμβέλειας δεκάδων μέτρων. Έντονη ερευνητική δραστηριότητα έχει οδηγήσει στην μείωση της απαιτούμενης ισχύος τέτοιων συστημάτων σε επίπεδο δεκάδων μW . Παρόλα αυτά, η επίτευξη ακόμα και τόσο χαμηλής ισχύος δεν μπορεί να γίνει χωρίς την χρήση κάποιας μορφής μπαταρίας. Όπως είναι φυσικό, η χρήση μπαταριών επάγει την ανάγκη επαναφόρτισής τους, κάτι εξαιρετικά ασύμφορο και μη πρακτικό όσο αφορά εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων και εμφυτευμάτων για ιατρικούς σκοπούς. Επομένως είναι αναγκαία η έρευνα που θα οδηγήσει σε περαιτέρω μείωση της απαιτούμενης ισχύος, καθώς και εύρεση τρόπων που θα παρέχουν την ισχύ αυτή χωρίς την χρήση μπαταριών.

1.2 Αντικείμενο διπλωματικής

Στα δίκτυα αισθητήρων στα οποία η χρήση μπαταριών για την τροφοδότηση τους είναι εξαιρετικά ασύμφορη έως και αδύνατη παρουσιάζονται δύο κύρια προβλήματα. Το πρώτο

αφορά τον τρόπο παροχής της απαραίτητης ενέργειας για την λειτουργία τους αλλά και για την αποστολή δεδομένων. Το δεύτερο πρόβλημα, που πρέπει να αντιμετωπισθεί, είναι η βέλτιστη και αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων από τον αισθητήρα στον δέκτη που βρίσκεται σε σχετικά μικρή απόσταση (από μερικά cm μέχρι κάποια m) με την λιγότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας (κάποιων nJ/byte).

Πρόσφατα στο Imperial College London αναπτύχθηκε μια καινοτομική πλατφόρμα επικοινωνίας που χρησιμοποιεί ενέργεια από το περιβάλλον του αισθητήρα (κίνηση, φως, διαφορές θερμοκρασίας) για την απευθείας αποστολή δεδομένων μέσω ηλεκτρομαγνητικών παλμών πολύ χαμηλής ενέργειας (κάτω από 1nJ). Στην διπλωματική αυτή εργασία, θα μελετηθούν κυκλώματα εξομοίωσης και υλοποίησης αυτής της μεθόδου επικοινωνίας ως προς την εμβέλεια και τις δυνατότητες ταχύτητας και ακρίβειας στην αποστολή πληροφορίας.

1.2.1 Συνεισφορά

Η συνεισφορά της διπλωματικής διατριβής επικεντρώνεται κυρίως στα ακόλουθα:

1. Στον σχεδιασμό και λειτουργία ενός απλού πομπού χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο LC κύκλωμα.
2. Στην έρευνα, προσομοίωση και υλοποίηση διαφόρων τύπων πομπών.
3. Στην αξιολόγηση της μεθόδου επικοινωνίας και στην σύγκριση μεταξύ των θεωρητικών υπολογισμών, εξομοίωσης και πειραματικών αποτελεσμάτων.
4. Στην υλοποίηση ενός δέκτη και στην μελέτη της απόδοσης του συνολικού συστήματος κατά την αποστολή και λήψη σημάτων, ώστε να γίνει μια ολοκληρωμένη εκτίμηση της μεθόδου.

1.3 Οργάνωση κειμένου

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται σε δέκα κεφάλαια, τα οποία περιγράφονται συνοπτικά ως ακολούθως:

Μια ανασκόπηση της έρευνας σχετικής με το αντικείμενο της διπλωματικής παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 2. Το Κεφάλαιο 3 περιέχει την θεωρητική ανάλυση που αφορά την πλατφόρμα επικοινωνίας. Στο Κεφάλαιο 4 αναλύεται ο σχεδιασμός και η λειτουργία της πλατφόρμας. Μια εκτενή αναφορά στην επιλογή των παραμέτρων των διαφόρων δομικών στοιχείων της κατασκευής του συστήματος εκπομπής γίνεται στο κεφάλαιο 5. Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με την χρήση του λογισμικού SPICE. Στο κεφάλαιο 7 περιγράφονται τα στοιχεία που επιλέχθηκαν για το κύκλωμα εκπομπής, όπως κεραίες, πυκνωτές φόρτισης, διακόπτες και κύκλωμα τροφοδοσίας. Τα πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν το εκπεμπόμενο και το λαμβανόμενο σήμα περιγράφονται και

σχολιάζονται στο κεφάλαιο 8 και 9 αντίστοιχα. Στο κεφάλαιο 10 συζητούνται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και επίσης προτείνονται βελτιώσεις και μελλοντικές επεκτάσεις της.

2

Ανασκόπηση της Έρευνας

Μία από τις κύριες προκλήσεις για την ανάπτυξη ασύρματων βιομετρικών αισθητήρων είναι η απαίτηση για την ολοκλήρωση διαφόρων συστημάτων σε μια πολύ μικρή συσκευή, τον βιοαισθητήρα (biosensor), όπου η εκπομπή της ζωτικής σημασίας πληροφορίας θα πρέπει να εκτελείται με την μικρότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας (nJ/byte). Τέτοια συστήματα περιλαμβάνουν μονάδες ανίχνευσης, ενίσχυσης, εκπομπής και τροφοδοσίας. Η αρχιτεκτονική των βιοαισθητήρων χαρακτηρίζεται από την σχεδίαση ξεχωριστών υποσυστημάτων, τα οποία επιλέγονται ώστε να εκτελούν συγκεκριμένες λειτουργίες. Ειδικότερα στις λειτουργίες ενός βιοαισθητήρα περιλαμβάνονται η ανίχνευση κάποιου φυσικού μεγέθους (π.χ. το επίπεδο σακχάρου στο αίμα), η μετατροπή του σε ηλεκτρικό σήμα (συνήθως τάση dc 0-2V), η ενίσχυση του και την εκπομπή του ως πληροφορία, αφού διαμορφωθεί κατάλληλα. Συνήθως για την ενίσχυση του σήματος χρησιμοποιείται μία κατάλληλη πηγή ενέργειας (μπαταρία ή συλλέκτης ενέργειας), ενώ για την εκπομπή του χρησιμοποιείται ένας ειδικά σχεδιασμένος πομπός LC.

Για να ξεπεραστούν τα προβλήματα του βιοαισθητήρα, που οφείλονται στην παρουσία μπαταρίας ως πηγής ενέργειας, όπως είναι ο επιπλέον όγκος και το βάρος καθώς και η επαναφόρτιση ή αντικατάσταση της μπαταρίας, έχει προταθεί η αντικατάστασή της από συλλέκτες ενέργειας. Η αναγκαία ενέργεια για την λειτουργία του βιοαισθητήρα, μπορεί να συλλέγεται από το ηλιακό φως, την θερμότητα (διαφορά θερμοκρασίας), την κίνηση, την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (RF), ή από συνδυασμό τους ανάλογα με το περιβάλλον, που βρίσκονται, αυξάνοντας την διάρκεια ζωής του. Επιπρόσθετα, αν η κατανάλωση ενέργειας

είναι εξαιρετικά χαμηλή, ο βιοαισθητήρας μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα (χωρίς μπαταρία) χρησιμοποιώντας μόνο την ισχύ του συλλέκτη ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση, ο συλλέκτης ενέργειας συλλέγει ενέργεια και την αποθηκεύει προσωρινά, για παράδειγμα σε ένα υπέρ-πυκνωτή, ενώ ο βιοαισθητήρας είναι ανενεργός. Κατόπιν η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά την λειτουργία του αισθητήρα, που θα πρέπει να είναι σχετικά μικρής χρονικής διάρκειας.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι γενικά για να υλοποιηθεί ένας χωρίς μπαταρία αισθητήρας, θα πρέπει η κατανάλωση ενέργειας κατά την λειτουργία του να είναι εξαιρετικά χαμηλή. Κατά κανόνα, το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας του αισθητήρα καταναλώνεται από τον εκπομπό του κατά την διάρκεια της ασύρματης επικοινωνίας με σκοπό την αποστολή των δεδομένων. Επομένως, η ελαχιστοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται στους μετατροπείς σημάτων και τον εκπομπό είναι ζωτικής σημασίας για την λειτουργία ενός αισθητήρα βασισμένου σε συλλέκτη ενέργειας. Η εξέλιξη και η υλοποίηση κυκλωμάτων εκπομπής χαμηλής ενέργειας σε συνδυασμό με προηγμένες τεχνικές συλλογής ενέργειας (Energy Harvesting) είναι ένα από τα σημαντικότερα πεδία έρευνας για την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ασύρματων βιοαισθητήρων.

2.1 Εκπομπή Σήματος Χαμηλής Ενέργειας

Στην τεχνολογία των ασύρματων εκπομπών που λειτουργούν με χαμηλή ενέργεια υπάρχουν ουσιαστικά δύο κατηγορίες: η ασύρματη χαμηλής ενέργειας (low-energy wireless) και η ασύρματη πολύ χαμηλής ενέργειας (ultra low-energy wireless). Η κύρια διαφορά που τις διακρίνει είναι ότι στην ασύρματη χαμηλής ενέργειας η μέση τιμή του ρεύματος ανέρχεται σε mA (milliamps), ενώ στην ασύρματη πολύ χαμηλής ενέργειας η αντίστοιχη μέση τιμή ρεύματος ανέρχεται σε μ A (microamps). Υπάρχει ένα αυξανόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον ώστε στην υλοποίηση των ασύρματων βιοαισθητήρων να συνδυάζεται η τεχνολογία ασύρματης εκπομπής χαμηλής ενέργειας και οι τεχνικές συλλογής ενέργειας. Ο σχεδιασμός κυκλωμάτων που να υποστηρίζουν εκπομπές πολύ χαμηλής ενέργειας (Ultra Low Energy Transmissions) είναι ζωτικής σημασίας για την λειτουργία των αυτόνομων βιοαισθητήρων λόγω του ότι η διαθέσιμη για το σκοπό αυτό ενέργεια είναι εξαιρετικά περιορισμένη. Την τελευταία δεκαετία έχουν προταθεί μέθοδοι, που σκοπό έχουν ανάπτυξη συστημάτων εκπομπής ικανών για ασύρματη αποστολή δεδομένων σε περιοχή ενεργειών μικρότερων από 1nJ/byte.

Οι Cairan He, Michail E. Kiziroglou, David C. Yates και Eric M. Yeatman παρουσίασαν την υλοποίηση ενός νέου συστήματος ασύρματου βιοαισθητήρα [1]. Πρόκειται για μια επίδειξη λειτουργίας ενός ασύρματου αισθητήρα με πομπό, που τροφοδοτείται αποκλειστικά από συλλέκτη ενέργειας τύπου MEMs (Μικροηλεκτρομηχανικά Συστήματα -

Microelectromechanical Systems). Στην συγκεκριμένη εργασία γίνεται κυρίως αναφορά στον τρόπο λειτουργίας των συλλεκτών ενέργειας για MEMs (MEMS energy harvesters) καθώς και μια περαιτέρω ανάλυση του τρόπου λειτουργίας ενός τέτοιου αισθητήρα, της κατασκευής του και του ελέγχου του βάσει μετρήσεων.

Οι Maria Gorlatova, Peter Kinget, Ioannis Kymissis, Dan Rubenstein, Xiaodong Wang και Gil Zussman πρότειναν τον σχεδιασμό μιας νέας κατηγορίας συσκευών εξαιρετικά χαμηλής ισχύος συσκευές, οι οποίες αναφέρονται ως Ενεργές Δικτυωμένες Ετικέτες Συγκομιδής Ενέργειας (Energy-Harvesting Active Networked Tags - EnHANTs) [2]. Τα EnHANTs είναι μικρές, ευέλικτες και αυτόνομες (όσον αφορά την ενέργεια) συσκευές που μπορούν να επισυναφθούν σε αντικείμενα που παραδοσιακά δεν δικτυώνονται παρέχοντας την υποδομή για διάφορες εφαρμογές παρακολούθησης.

Ο Naronng Panitantom παρουσίασε δύο πρωτότυπους εκπομπούς για δίκτυα ασύρματων αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSN), οι οποίοι ελαχιστοποιούν την ενέργεια εκπομπής [3]. Ο πρώτος εκπομπός ενσωματώνει μια γρήγορη βαθμονόμηση της συχνότητας για να μικρύνει τον χρόνο ρύθμισης της συχνότητας συντονισμού. Έτσι ελαχιστοποιείται η κατανάλωση ενέργειας κατά την έναρξη της εκπομπής. Στον δεύτερο εκπομπό η κατανάλωση ενέργειας ελαχιστοποιείται μέσω ενός ταλαντωτή ισχύος μεγιστοποιώντας την απόδοση του. Οι πρωτότυποι εκπομποί κατασκευάστηκαν με τεχνολογία 0.18 μ m CMOS καταναλώνουν ισχύ 1.91 και 1.34nW.

Οι D.C. Yates, A.S. Holmes και A.J. Burdett πρότειναν μια μέθοδο για ασύρματη εκπομπή μικρής χρονικής διάρκειας, η οποία προσδιορίζει την βέλτιστη συχνότητα εκπομπής σημάτων πολύ χαμηλής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό των διαστάσεων της κεραίας [4]. Η ανάλυση, που πραγματοποιήθηκε για κεραίες βρόχου, έχει χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση του πομπού ταλαντωτή ως τοπολογία χαμηλής ισχύος. Φαίνεται ότι η απαίτηση της υψηλής συντελεστή ποιότητας Q για την υλοποίηση ενός ταλαντωτή χαμηλής ισχύος δεν είναι απαραίτητο να αντιτίθεται στην επίτευξη των χαρακτηριστικών της βέλτιστης ακτινοβολίας μακρινού πεδίου (optimal far-field radiation). Με βάση αυτό το γεγονός προτείνεται μια προσέγγιση σχετικά με το μέγεθος της κεραίας βρόχου για πομπούς χαμηλής ισχύος.

Αν και έχουν δημοσιευθεί αρκετές εργασίες προτείνοντας πολύ σημαντικές προσεγγίσεις στο πρόβλημα της ασύρματης εκπομπής χαμηλών ενεργειών, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση συστημάτων πομπών που να ικανοποιούν τέτοιες απαιτήσεις εξαιρετικά χαμηλής ενέργειας αποτελεί μία από τις κύριες προκλήσεις στην έρευνα και ανάπτυξη των βιομετρικών αισθητήρων.

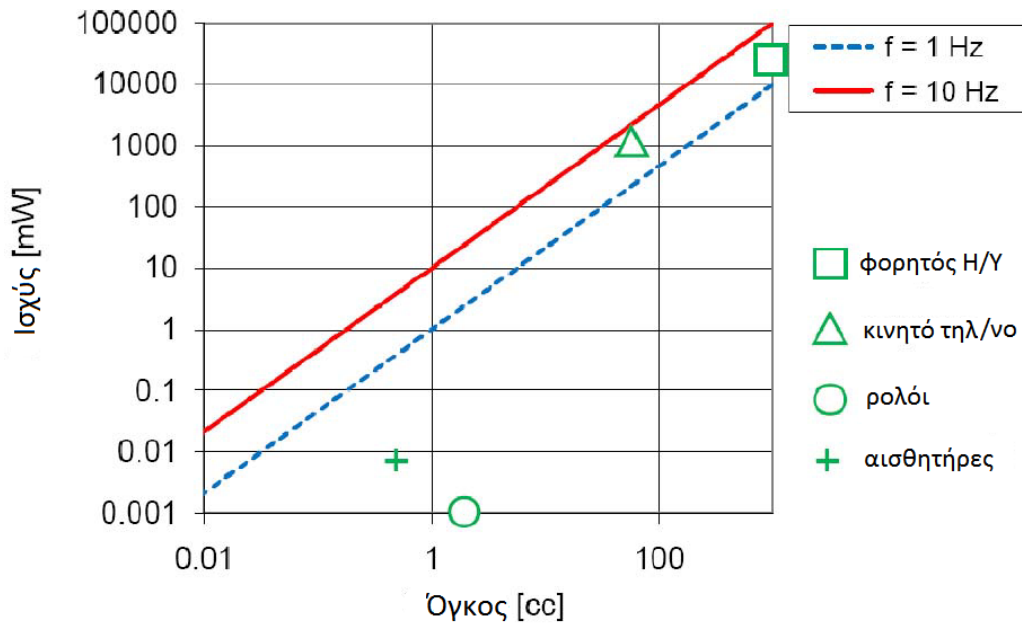
3

Θεωρητικό υπόβαθρο

3.1 Συλλογή Ενέργειας (Energy Harvesting)

Ο όρος συγκομιδή ενέργειας (energy harvesting) αναφέρεται σε μεθόδους συλλογής και αποθήκευσης ενέργειας από το περιβάλλον, ενέργεια που διαφορετικά θα είχε χαθεί σε θερμότητα. Για να γίνει διακριτή η συγκεκριμένη τεχνολογία από αυτή της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η συγκομιδή ενέργειας μπορεί να οριστεί ως η συλλογή της τοπικά διαθέσιμης από το περιβάλλον ενέργειας για τοπική χρήση. Εφαρμόζεται κυρίως από μικρά συστήματα με δυνατότητα διάθεσης μικροσκοπικών ποσών ενέργειας,, που κυμαίνονται από μερικά nW έως εκατοντάδες mW [3].

Η κύρια κατηγορία συσκευών επικοινωνίας σε αυτά τα επίπεδα ενέργειας είναι οι ασύρματες συσκευές. Η δυνατότητα εφαρμογής της συγκομιδής ενέργειας στις συγκεκριμένες συσκευές εξαρτάται από το είδος και το μέγεθος της διαθέσιμης από το περιβάλλον ενέργειας, καθώς και από τους περιορισμούς που τίθενται σχετικά με το μέγεθος της συσκευής. Έχει αποδειχθεί για παράδειγμα ότι η συγκομιδή ενέργειας από την κίνηση του ανθρώπινου σώματος δεν είναι αρκετή για να τροφοδοτήσει φορητούς υπολογιστές ή κινητά τηλέφωνα, αλλά είναι πρακτικά κατάλληλη για πολλούς τύπους ασύρματων αισθητήρων (βλ. Σχ. 3.1.) [4].



Σχ. 3.1. Μέγιστη ισχύς για συλλέκτες ενέργειας από κίνηση συναρτήσει του μέγεθος τους για δύο διαφορετικές συχνότητες διέγερσης, με το μέγεθος και την απαίτηση για την ισχύ διάφορων εφαρμογών.

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την εξέταση του κατά πόσο η συγκομιδή ενέργειας αποτελεί λύση είναι, αν οι μπαταρίες, που μέχρι στιγμής αποτελούν την κυρία ασύρματη πηγή ενέργειας, είναι σε θέση να καλύψουν την απαιτούμενη ισχύ. Επίσης σημαντικοί παράγοντες είναι το μέγεθος, το βάρος και οι «οικολογικές» απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

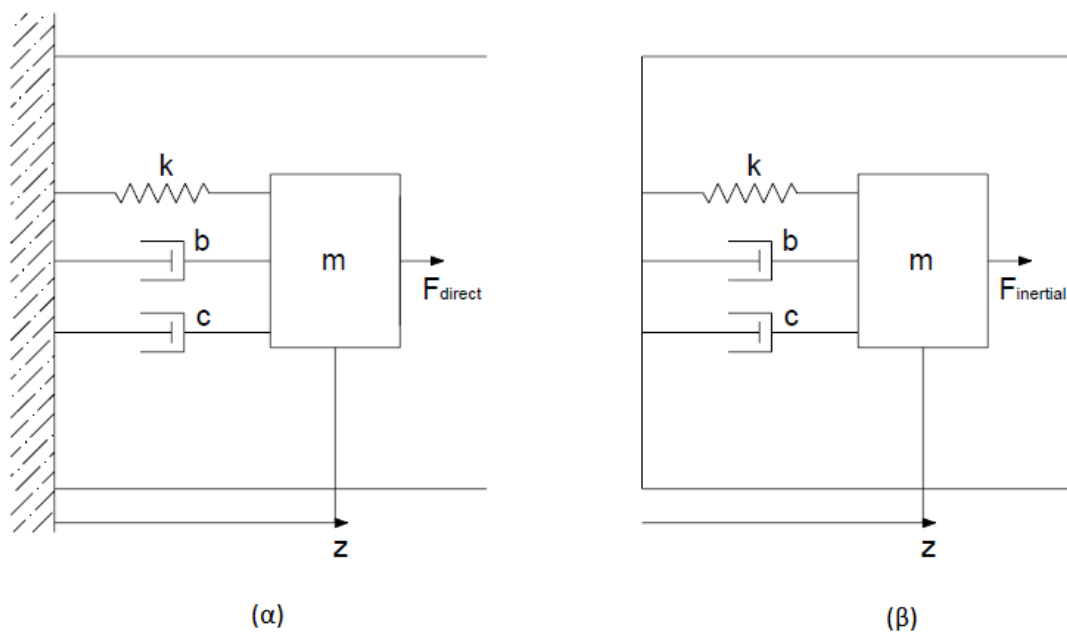
Η κατηγοριοποίηση των energy harvesters γίνεται ανάλογα με το είδος της ενέργειας που αξιοποιούν. Στο Σχ. 3.2. παραθέτονται οι μέθοδοι καθώς και οι πηγές που χρησιμοποιούνται για την συλλογή ηλεκτρικής ενέργειας [3].



Σχ. 3.2. Διάγραμμα πηγών και μεθόδων συγκομιδής ενέργειας

3.1.1 Συλλέκτες Ενέργειας Κίνησης (*Motion Energy Harvesters*)

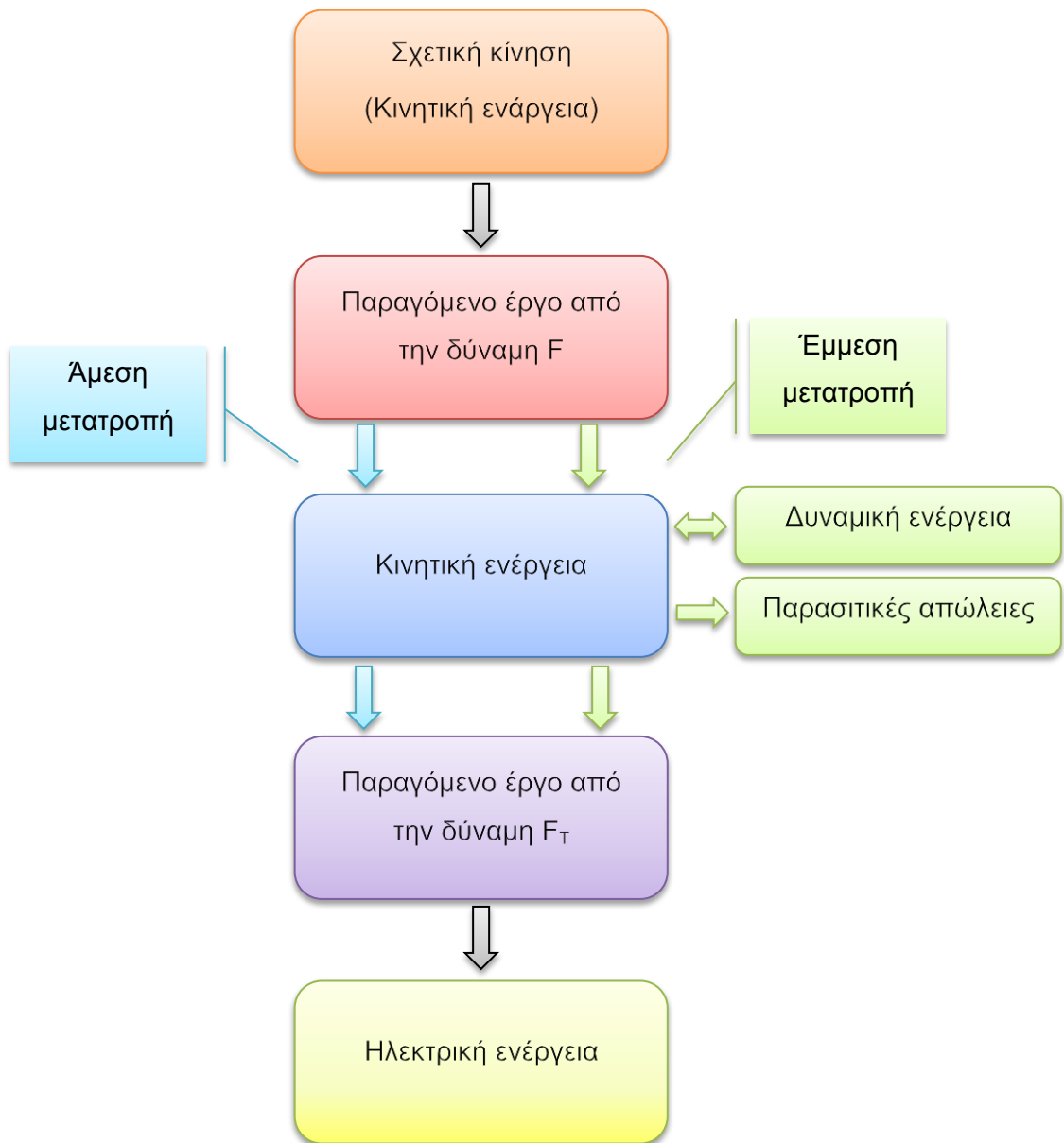
Μια από τις πιο πολλά υποσχόμενες μεθόδους συγκομιδής ενέργειας είναι αυτές που χρησιμοποιούν την σχετική κίνηση. Οι συσκευές που συλλέγουν ενέργεια μέσω της κίνησης, συνήθως χρησιμοποιούν μία στοιχειώδη μάζα (proof mass), η οποία μπορεί να κινείται σε σχέση με το πλαίσιο της συσκευής (σχετική κίνηση). Η ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί είτε ασκώντας μια εξωτερική δύναμη απευθείας στην μάζα, είτε ασκώντας την στο πλαίσιο. Με βάση αυτόν τον τρόπο άσκησης και μεταφοράς της δύναμης οι συλλέκτες ενέργειας κίνησης (*motion energy harvesters*) χωρίζονται σε δύο κύριους τύπους ή πρότυπα: τους συλλέκτες απευθείας δύναμης και συλλέκτες αδρανειακής δύναμης (βλ. Σχ. 3.3).



Σχ. 3.3. Τυπικά μοντέλα συστημάτων συλλογής ενέργειας μέσω κίνησης. Συλλέκτης απευθείας δύναμης (α), Συλλέκτης αδρανειακής δύναμης (β).

Λαμβάνοντας το πλαίσιο της συσκευής ως σημείο αναφοράς κατά την κίνηση, στην πρώτη περίπτωση η δύναμη επιταχύνει τη μάζα, παράγοντας έργο το οποίο μπορεί να μετατραπεί στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια (βλ. Σχ. 3.3 (α)). Στη δεύτερη περίπτωση η δύναμη επιταχύνει το πλαίσιο με αποτέλεσμα την εμφάνιση μίας αδρανειακής δύναμης, που ενεργεί στη στοιχειώδη μάζα η οποία αντιστέκεται στην κίνηση του πλαισίου (βλ. Σχ. 3.3 (β)). Το έργο που παράγει αυτή η αδρανειακή δύναμη μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.

Ένα γενικό διάγραμμα ροής της ενέργειας δίνεται στο Σχ. 3.4. Η μετακίνηση του σημείου εφαρμογής της συνιστώσας της F , η οποία ακυρώνεται από την F_T (δρα αντίθετα ως προς την F_T), αντιστοιχεί στην άμεση μετατροπή του έργου σε ηλεκτρική ενέργεια. Το υπόλοιπο τμήμα της F κινεί την μάζα m , ενώ η αντίστοιχη ενέργεια εναλλάσσεται από κινητική σε δυναμική. Η αποθηκευμένη αυτή ενέργεια, υπό μορφή κινητικής ή δυναμικής ενέργειας, μπορεί επίσης να μετατραπεί σε ηλεκτρική μέσω της F_T (έμμεση μετατροπή). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, κατά την κίνηση, ο παρασιτικός μηχανισμός απόσβεσης c προκαλεί μη αναστρέψιμη απώλεια ενέργειας (βλ. Σχ. 3.3.)



Σχ. 3.4. Γενικό διάγραμμα ροής της ενέργειας σε έναν Ενεργειακό Συλλέκτη Κίνησης (*Motion Energy Harvester*).

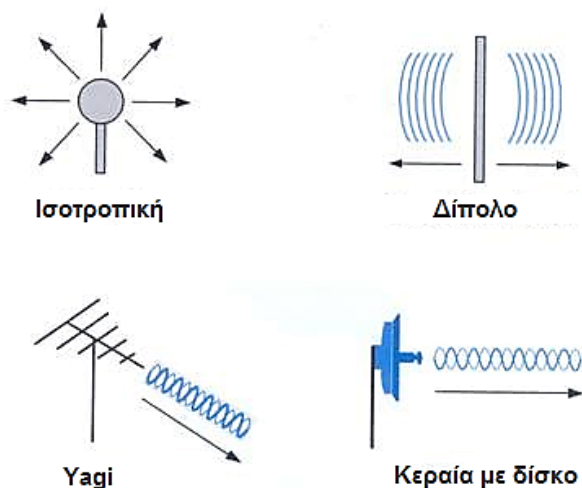
Η δυναμική του συστήματος στο Σχ. 3.3 μπορεί να περιγραφεί από μια γενική εξίσωση κίνησης ως ακολούθως:

$$F + F_T + F_k + F_d = m\ddot{z} \quad (3.1)$$

όπου F είναι η εξωτερική δύναμη (άμεση ή αδράνειας), F_T η δύναμη της οποίας το έργο μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, F_k η δύναμη που εφαρμόζεται στον σύνδεσμο της μάζας με το πλαίσιο, F_d η δύναμη στον μηχανισμό απόσβεσης και \ddot{z} η επιτάχυνση της στοιχειώδης μάζας m κατά τον άξονα z .

3.2 Κεραίες

Ως κεραία ορίζεται ένα μέσο ακτινοβολίας και λήψης ραδιοκυμάτων [5]. Ακριβέστερα η κεραία μετατρέπει την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, που οδεύει σε μια γραμμή μεταφοράς ή ένα κυματοδηγό, σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα στο χώρο και αντίστροφα. Με απλά λόγια, μια κεραία δεν είναι τίποτα άλλο παρά μια διάταξη με αγωγούς που επιτρέπει αποτελεσματικά την εκπομπή ή/και την λήψη ραδιοκυμάτων βάσει του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Όταν λειτουργεί ως τμήμα του δέκτη λαμβάνει ραδιοκύματα και τα μετατρέπει σε εναλλασσόμενο ρεύμα, και όταν λειτουργεί ως τμήμα του πομπού, λαμβάνει εναλλασσόμενο ρεύμα και το μετατρέπει αντίστοιχα σε ραδιοκύματα. Συναντιέται με μεγάλη ποικιλομορφία σε μεγέθη και σχήματα. Μπορεί να είναι κυλινδρική, επίπεδη, να είναι μεγάλων διαστάσεων αποτελώντας συστοιχία από επιμέρους κεραίες, ή ακόμα να είναι διακριτική όσο ένα κομμάτι καλωδίου [6]. Η πιο απλή κεραία είναι το δίπολο το οποίο ονομάζεται και "στοιχειώδες βραχύ δίπολο" ή "δίπολο του Hertz".



Σχ.3.5. Ορισμένοι βασικοί τύποι κεραιών

Οι κεραίες αποτελούν απαραίτητο στοιχείο σε κάθε συσκευή λήψης ή αποστολής σημάτων, καθώς πραγματοποιούν την ηλεκτρική σύζευξη των συσκευών μέσα στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Τα ραδιοκύματα είναι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που μεταφέρουν σήματα δια μέσου του αέρα (ή του κενού) με την ταχύτητα του φωτός χωρίς σχεδόν καμία απώλεια μετάδοσης. Οι ασύρματοι πομποδέκτες χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν σήματα πληροφοριών σε συστήματα που περιλαμβάνουν: μεταδόσεις ραδιοφώνου και τηλεόρασης, κινητά τηλέφωνα, Wi-Fi (WLAN), δίκτυα δεδομένων, σημείο προς σημείο (point-to-point) επικοινωνιακές συνδέσεις (όπως τηλεφωνικά δίκτυα, δίκτυα δεδομένων κ.α.), δορυφορικές

συνδέσεις και μεγάλο εύρος τηλεχειριζόμενων συσκευών. Τα ραδιοκύματα, επίσης, χρησιμοποιούνται άμεσα στην τεχνολογία των μετρήσεων, σε εφαρμογές RADAR, GPS και ραδιοαστρονομίας. Σε κάθε περίπτωση, οι πομποί και δέκτες που εμπλέκονται πρέπει να διαθέτουν κεραίες, ακόμα και αν πολλές φορές δεν είναι ορατές, όπως για παράδειγμα η κεραία μέσα σε ένα ραδιόφωνο AM ή μέσα σε έναν φορητό υπολογιστή εξοπλισμένο με Wi-Fi. Στις επόμενες παραγράφους αναφέρονται μερικά από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά μίας κεραίας, όπως:

A. Εύρος ζώνης

Εύρος ζώνης ορίζεται το εύρος των συχνοτήτων για τις οποίες μία κεραία πληροί συγκεκριμένες προδιαγραφές [5]. Οι προδιαγραφές αυτές συνήθως προκύπτουν από τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζεται η κεραία και στην συντριπτική τους πλειοψηφία έχουν να κάνουν με τον λόγο τάσεων στάσιμου κύματος (Voltage Standing Wave Ratio - VSWR). Το εύρος ζώνης επομένως είναι:

$$BW = f_h - f_l \quad (3.2)$$

όπου f_h , f_l είναι η άνω και κάτω συχνότητα αντίστοιχα, όπου ικανοποιούνται οι περιορισμοί των προδιαγραφών. Ένας ακόμη ορισμός του εύρους ζώνης είναι αυτός του λόγου της μέγιστης προς την ελάχιστη συχνότητα.

$$BW = \frac{f_h}{f_l} \quad (3.3)$$

Το εύρος ζώνης μιας κεραίας ουσιαστικά της παρέχει την περιοχή συχνοτήτων στην οποία η κεραία λειτουργεί αποτελεσματικά και περιλαμβάνει τις συχνότητες γύρω από την συχνότητα συντονισμού. Το κριτήριο με το οποίο προσδιορίζεται το εύρος ζώνης είναι το μέτρο της παραμέτρου S_{11} (αντιπροσωπεύει την ανακλώμενη ισχύ από την κεραία) το οποίο στα σύγχρονα συστήματα πρέπει να λαμβάνει τιμές μικρότερες από -10dB, κάτι το οποίο μεταφράζεται σε $VSWR < 2$. Μ' αυτόν τον τρόπο το φάσμα των συχνοτήτων, που ικανοποιούν το συγκεκριμένο περιορισμό, αποτελεί το εύρος ζώνης της κεραίας.

B. Απόδοση κεραίας

Μια κεραία μπορεί να σχετίζεται με ένα αριθμό αποδόσεων. Η ολική απόδοση της κεραίας e_0 χρησιμοποιείται για να συμπεριλάβει τις απώλειες τόσο στους ακροδέκτες εισόδου όσο και στη δομή της κεραίας. Τέτοιες απώλειες μπορεί να οφείλονται για παράδειγμα σε ανακλάσεις λόγω κακής προσαρμογής μεταξύ της γραμμής μεταφοράς και της κεραίας ή σε απώλειες λόγω φαινομένου Joule (απώλειες αγωγιμότητας και διηλεκτρικού), οι οποίες είναι ανάλογες του $I^2 R$. Έτσι η συνολική απόδοση γράφεται:

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad (3.4)$$

όπου

e_0 = συνολική απόδοση

e_r = απόδοση προσαρμογής = $1 - |\Gamma|^2$

e_c = απόδοση αγωγιμότητας

e_d = απόδοση διηλεκτρικού

Γ = συντελεστής ανάκλασης με $\Gamma = (Z_{in} - Z_0) / (Z_{in} + Z_0)$, Z_{in} = σύνθετη αντίσταση εισόδου και Z_0 = κανονικοποιημένη σύνθετη αντίσταση εξόδου)

Τις περισσότερες φορές τα e_c , e_d είναι δύσκολο να υπολογιστούν, όμως μπορούν να προσδιοριστούν πειραματικά. Και σε αυτήν όμως την περίπτωση δεν είναι δυνατό να διαχωριστούν, οπότε για λόγους ευκολίας η παραπάνω εξίσωση γράφεται:

$$e_0 = e_r e_{cd} = (1 - |\Gamma|^2) e_{cd}$$

όπου $e_{cd} = e_c e_d$ είναι η απόδοση ακτινοβολίας και χρησιμοποιείται για να συσχετίσει την κατευθυντικότητα της κεραίας με το κέρδος της.

Γ. Απόδοση ακτινοβολίας

Η απόδοση της κεραίας που αναφέρθηκε προηγουμένως περιλαμβάνει τις απώλειες λόγω ανακλάσεων, αγωγιμότητας και διηλεκτρικού. Οι απώλειες αγωγιμότητας και διηλεκτρικού είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστούν γι αυτό χρησιμοποιείται ο πειραματικός προσδιορισμός τους. Αλλά και πάλι η δυσκολία διαχωρισμού τους δημιουργεί την ανάγκη να λαμβάνονται μαζί υπ' όψιν ως μία απόδοση, ορίζοντας έτσι την απόδοση e_{cd} . Με τον ίδιο τρόπο χρησιμοποιούμε την αντίσταση R_L για να αναφερθούμε σε απώλειες αγωγιμότητας και διηλεκτρικού.

Ως απόδοση αγωγιμότητας – διηλεκτρικού e_{cd} ορίζεται ο λόγος της ισχύος που παραδίδεται στην αντίσταση ακτινοβολίας R_r προς την συνολική ισχύ που παραδίδεται στις R_r και R_L μαζί. Συγκεκριμένα ισχύει:

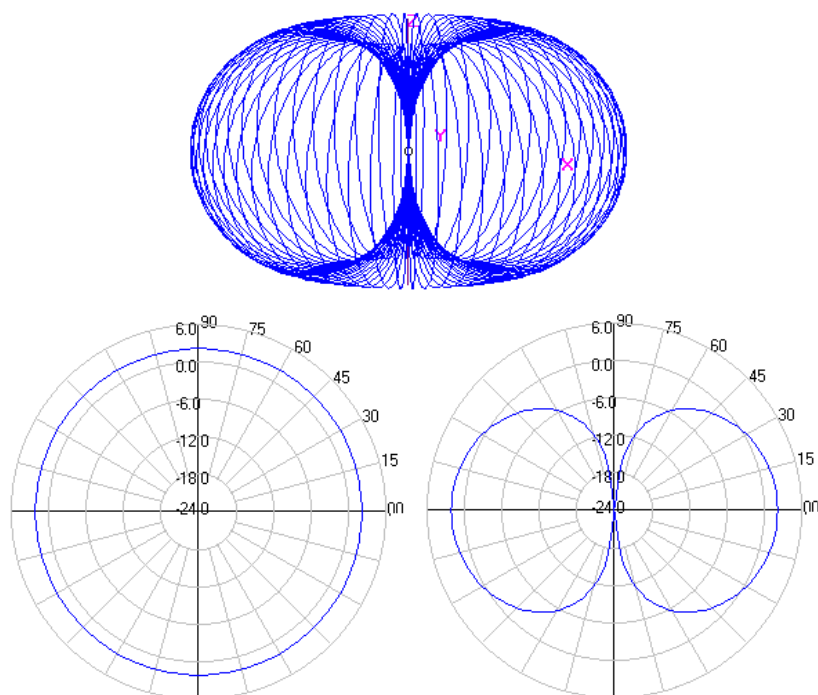
$$e_{cd} = \frac{R_r}{R_r + R_L} \quad (3.5)$$

Με άλλα λόγια η απόδοση ακτινοβολίας είναι ο λόγος της ακτινοβολουμένης ισχύος προς την εισερχόμενη ισχύ και δίνεται από τη σχέση:

$$e_{cd} = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \quad (3.6)$$

4. Διάγραμμα ακτινοβολίας

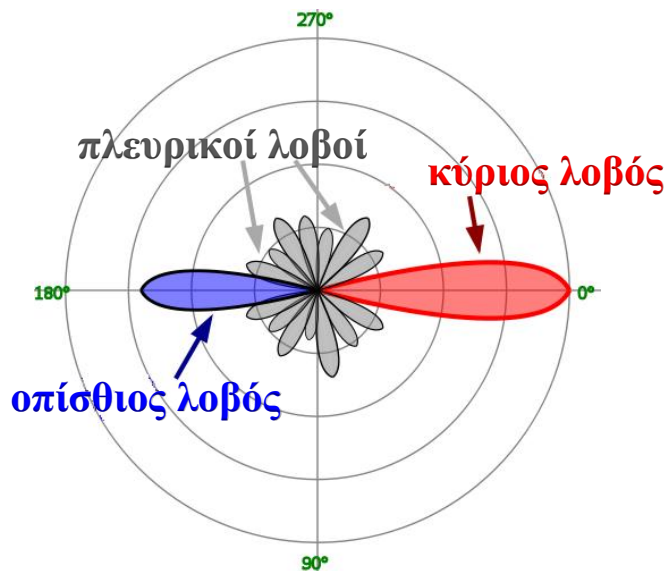
Ως διάγραμμα ακτινοβολίας μια κεραίας ορίζεται η μαθηματική συνάρτηση ή η γραφική παράσταση των ιδιοτήτων της ακτινοβολίας της κεραίας συναρτήσει των χωρικών συντεταγμένων [5]. Συχνά αναπαριστάται με ένα τρισδιάστατο γράφημα, ή με πολική απεικόνιση των οριζοντίων και κάθετων διατομών. Το διάγραμμα μιας ιδανικής ιστροπικής κεραίας, που εκπέμπει εξ ίσου προς κάθε κατεύθυνση, θα έμοιαζε με μια σφαίρα. Πολλές μη κατευθυντικές κεραίες, όπως είναι οι μονοπολικές και οι διπολικές, εκπέμπουν προς όλες τις κατευθύνσεις την ίδια ισχύ ακτινοβολίας, με την ισχύ να μειώνεται στις υψηλότερες και τις χαμηλότερες γωνίες (βλ. Σχ. 3.6). Αυτό το διάγραμμα ονομάζεται μη κατευθυνόμενο διάγραμμα και μοιάζει με περιστρεφόμενη καμπύλη ή με ντόνατς.



Σχ. 3.6. Τρισδιάστατο, οριζόντιο και κάθετο διάγραμμα ακτινοβολίας μίας κεραίας δίπολου

Η ακτινοβολία πολλών κεραιών εμφανίζει ένα μοτίβο των μεγίστων ή «λοβών» σε διάφορες γωνίες, που χωρίζονται με μηδενικά, γωνίες δηλαδή όπου η ακτινοβολία πέφτει στο μηδέν. Αυτό συμβαίνει επειδή τα ραδιοκύματα που εκπέμπονται από διαφορετικά σημεία της κεραίας συμβάλλουν μεταξύ τους, δημιουργώντας μέγιστο (μέγιστη ακτινοβολία) σε γωνίες όπου τα ραδιοκύματα φτάνουν σε απομακρυσμένα σημεία με την ίδια φάση 0^0 (ή $2k\pi$), και ελάχιστο (μηδενική ακτινοβολία) στις γωνίες που τα κύματα φτάνουν με διαφορά φάσης 180^0 (ή $(2k+1)\pi$). Σε μια κατευθυντική κεραία σχεδιασμένη για να εκπέμπει τα ραδιοκύματα σε συγκεκριμένη κατεύθυνση, ο λοβός σε αυτή την κατεύθυνση σχεδιάζεται να είναι

μεγαλύτερος από τους υπόλοιπους και ονομάζεται κύριος λοβός. Οι υπόλοιποι λοβοί, συνήθως αντιπροσωπεύουν την μη επιθυμητή ακτινοβολία και λέγονται πλευρικοί λοβοί. Ο άξονας που περνάει από το μέσο του κύριου λοβού ονομάζεται αρχικός άξονας ή άξονας boresight της κεραίας (antenna boresight) και αντιπροσωπεύει τον άξονα της μέγιστης ακτινοβολούμενης ισχύος



Σχ. 3.7. Οριζόντιο διάγραμμα ακτινοβολίας κατευθυντικής κεραίας

E. Κατευθυντικότητα κεραίας

Η κατευθυντικότητα μιας κεραίας είναι το αδιάστατο μέγεθος, που προσδιορίζει τον βαθμό εστίασης του διαγράμματος ακτινοβολίας σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, με κριτήριο τον βαθμό εστίασης του διαγράμματος της ισοτροπικής κεραίας. Η κατευθυντικότητα ισούται με τον λόγο της έντασης της ακτινοβολίας σε συγκεκριμένη κατεύθυνση προς την μέση τιμή της έντασης της ακτινοβολίας σε κάθε κατεύθυνση (η μέση τιμή της έντασης της ακτινοβολίας ισούται με τον λόγο της συνολικής ισχύος προς 4π). Αν δεν προσδιορίζεται η κατεύθυνση, τότε λαμβάνεται υπ' όψιν η κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας. Μαθηματικά η κατευθυντικότητα της κεραίας D εκφράζεται ως:

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (3.7)$$

όπου U η ένταση ακτινοβολίας σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, U_0 η ένταση της ισοτροπικής και P_{rad} η συνολική ακτινοβολούμενη ισχύς της κεραίας.

ΣΤ. Κέρδος

Το κέρδος είναι ένα μέγεθος που αφορά την απόδοση μιας κεραίας και τις κατευθυντικές της ιδιότητες. Ορίζεται ως ο λόγος της έντασης ακτινοβολίας σε καθορισμένη κατεύθυνση προς την ένταση ακτινοβολίας μιας κεραίας που θα ακτινοβολούσε όλη την ισχύ που λαμβάνει προς κάθε κατεύθυνση (ισοτροπικά). Το κέρδος G υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{in}} \quad (3.8)$$

Όταν η κατεύθυνση δεν διευκρινίζεται, τότε το κέρδος υπολογίζεται με βάση την κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας. Η σχέση κέρδους-κατευθυντικότητας περιγράφεται από την σχέση:

$$G(\theta, \varphi) = e_{ca} D(\theta, \varphi) \quad (3.9)$$

3.2.1 Κυκλικές Κεραίες Βρόχου

Η κεραία βρόχου αποτελεί μία απλή, φτηνή και εύχρηστη κεραία που μπορεί να πάρει πολλές μορφές, όπως ορθογώνια, τετραγωνική, τριγωνική, ελλειπτική, κυκλική κ.α. Είναι απλή στην κατασκευή και στην ανάλυση, κάτι που την κάνει αρκετά δημοφιλή.

Οι κεραίες βρόχου ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες: *Ηλεκτρικά μικρές* και *ηλεκτρικά μεγάλες*. Ηλεκτρικά μικρές είναι εκείνες, όπου το συνολικό τους μήκος (αριθμός σπειρών N επί την περιφέρεια C) είναι μικρότερο από το ένα δέκατο περίπου του μήκους κύματος ($NC < \lambda/10$). Ηλεκτρικά μεγάλες είναι εκείνες, όπου το μήκος της περιφέρειας είναι περίπου ίσο με το μήκος κύματος στον ελεύθερο χώρο ($C \sim \lambda$). Οι κεραίες βρόχου χρησιμοποιούνται κυρίως στις συχνότητες ζώνης των HF (3-30 MHz), VHF (30-300 MHz) και UHF (300-3000 MHz). Στις μικροκυματικές συχνότητες βρίσκουν εφαρμογή ως λήπτες σήματος (prodes).

Οι κεραίες βρόχου με ηλεκτρικά μικρές περιφέρειες ή περιμέτρους, έχουν μικρή αντίσταση ακτινοβολίας, που συνήθως είναι μικρότερη από την αντίσταση απωλειών. Κατά συνέπεια η ακτινοβολία τους είναι πενιχρή, οπότε στις ραδιοεπικοινωνίες χρησιμοποιούνται σπανίως. Αυξάνοντας το ηλεκτρικό μήκος της περιμέτρου και/ή τον αριθμό των σπειρών, η αντίσταση ακτινοβολίας της κεραίας βρόχου μπορεί να αυξηθεί και να γίνει συγκρίσιμη πρακτικά με τη χαρακτηριστική αντίσταση πολλών γραμμών μεταφοράς. Ένας άλλος τρόπος αύξησης της αντίστασης ακτινοβολίας της κεραίας βρόχου είναι η εισαγωγή στο εσωτερικό της περιφέρειας ή της περιμέτρου ενός πυρήνα φερριτή πολύ μεγάλης διαπερατότητας, ο οποίος αυξάνει την ένταση του μαγνητικού πεδίου και συνεπώς την αντίσταση ακτινοβολίας.

4

Σχεδίαση Πλατφόρμας Επικοινωνίας

Στόχος της διπλωματικής εργασίας ήταν να μελετηθεί μια πλατφόρμα επικοινωνίας για δίκτυα MEMS αισθητήρων. Για τον σκοπό αυτό, αρχικά σχεδιάστηκε ένας αισθητήρας ώστε αρχικά να προσομοιωθεί και στην συνέχεια να κατασκευαστεί. Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφούν κυρίως τα τμήματα που αποτελούν έναν αισθητήρα αναφέροντας συνοπτικά την λειτουργία τους.

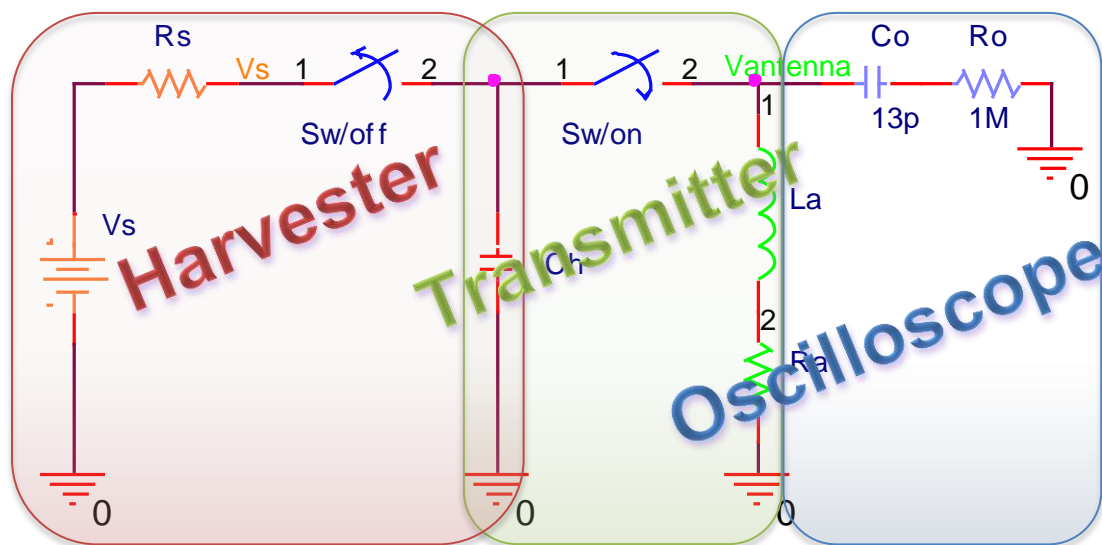
4.1 Αρχιτεκτονική

Ο αισθητήρας που περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους είναι ένα αρκετά απλοποιημένο μοντέλο ενός συλλέκτη ενέργειας που εκπέμπει ένα σήμα μέσω μίας κεραίας πομπού. Συγκεκριμένα το κύκλωμα αποτελείται από δύο κυρίως τμήματα:

1. **Συλλέκτης Ενέργειας (Energy Harvester)**: Υποσύστημα υπεύθυνο για την συλλογή και τροφοδότηση του αισθητήρα με ηλεκτρική ενέργεια.
2. **Εκπομπός (Transmitter)**: Εξασφαλίζει την αποστολή δεδομένων σε απομακρυσμένους δέκτες.

Επίσης στο συνολικό κύκλωμα προστίθεται και ένα όργανο μέτρησης:

Παλμογράφος (Oscilloscope): Η προσθήκη του παλμογράφου επιτρέπει την παρακολούθηση της λειτουργίας του κυκλώματος σε πειραματικό επίπεδο και η σημασία του αναλύεται στις επόμενες παραγράφους. Η περιγραφή ενός τέτοιου μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχ. 4.1.



Σχ.4.1. Τα κύρια τμήματα ενός απλοποιημένου αισθητήρα τύπου MEMS με χρήση παλμογράφου

4.2 Περιγραφή Λειτουργιών

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι λειτουργίες των τμημάτων από τα οποία αποτελείται το μοντέλο του αισθητήρα που έχει μελετηθεί.

4.2.1 Συλλέκτης Ενέργειας (Energy Harvester)

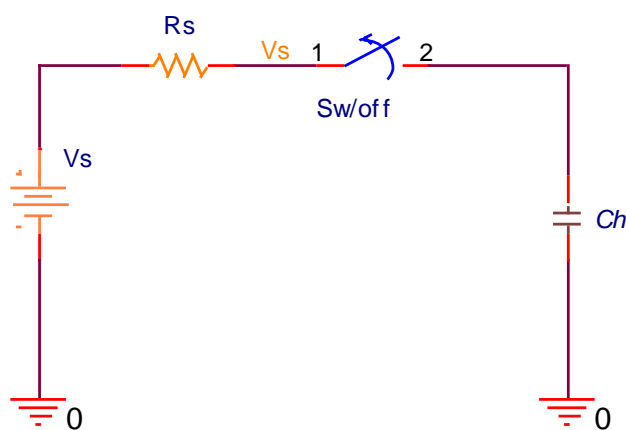
Η λειτουργία ενός συλλέκτη ενέργειας σε ένα ολοκληρωμένο αυτόνομο αισθητήρα επικεντρώνεται στην συλλογή και τροφοδότηση της απαραίτητης ενέργειας για την λειτουργία του αισθητήρα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ολική ενέργεια που έχει συλλέξει ο συλλέκτης διατίθεται για την αποστολή ενός σήματος δεδομένων από τον αισθητήρα σε ένα τοπικό δέκτη, που βρίσκεται σε μικρή σχετικά απόσταση.

Ο συλλέκτης που έχει προτιμηθεί για αυτήν την εφαρμογή αφορά έναν συλλέκτη ενέργειας κίνησης (motion energy harvester). Από τις αρχές λειτουργίας του είναι γνωστό ότι το ποσό της ενέργειας που μπορεί να συλλέξει και τελικά να εξάγει, μια τέτοια συσκευή, εξαρτάται άμεσα από την σχετική κίνηση στην οποία υποβάλλεται από το περιβάλλον του. Κάτι τέτοιο τον καθιστά ιδανικό για ιατρικές εφαρμογές που αφορούν δονήσεις του σώματος όπως π.χ. ο χτύπος της καρδιάς, όπου ο συλλέκτης ενέργειας μπορεί να λειτουργεί ταυτόχρονα και ως συλλέκτης πληροφοριών.

Για να γίνει καλύτερα αντιληπτό το παραπάνω παράδειγμα μπορεί να θεωρηθεί η περίπτωση όπου ένας αισθητήρας έχει τοποθετηθεί για την παρακολούθηση του πλήθους των

σφυγμών ενός ασθενή. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο η αρχή που διέπει ένα ηλεκτροστατικό συλλέκτη ενέργειας είναι η φόρτιση ενός πυκνωτή κατά την διάρκεια της συλλογής ενέργειας και στη συνέχεια η εκφόρτωση του για την τροφοδότηση κάποιας συσκευής, στην προκειμένη περίπτωση ενός εκπομπού. Όταν η δύναμη που θα ασκηθεί είναι αρκετά μεγάλη ο πυκνωτής θα φορτιστεί πλήρως και το φορτίο που θα εξάγει θα είναι Q_{max} . Αντίθετα εάν ο πυκνωτής δεν φορτιστεί πλήρως τότε θα έχουμε $Q < Q_{max}$. Έτσι, αν στην συνέχεια ο πυκνωτής συνδεθεί με μία κεραία, ο αριθμός των παλμών που θα εκπεμφθούν θα είναι μεγαλύτερος στην πρώτη περίπτωση, αφού η αποφόρτιση του πυκνωτή θα διαρκέσει περισσότερο.

Ο τρόπος συλλογής ενέργειας από το περιβάλλον σε μια τέτοια συσκευή είναι εξαιρετικά περίπλοκος και δεν θα αποτελέσει κύριο θέμα προς μελέτη στην παρούσα διατριβή. Στο παρόν σύστημα ο συλλέκτης ενέργειας προσομοιώνεται με έναν πυκνωτή μικρής χωρητικότητας ενώ η διέγερση του γίνεται από μία πηγή τάσης σε σειρά με μία αντίσταση (βλ. Σχ. 4.2). Όταν ο πυκνωτής έχει φορτιστεί πλήρως, απομονώνεται από την πηγή οπότε και έχει λήξει το στάδιο της περισυλλογής ενέργειας. Η σταθερά χρόνου του κυκλώματος είναι $\tau = RC$ ενώ μια πλήρης φόρτιση πυκνωτή (99,9%) διαρκεί 5τ . Παρ' όλα αυτά στην προσομοίωση θεωρήθηκε ότι ο πυκνωτής φορτίζεται ακαριαία και επομένως ο χρόνος φόρτισης δεν επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα.



Σχ.4.2. Απλοποιημένο, ισοδύναμο κύκλωμα Energy harvester στο εργαλείο PSpice

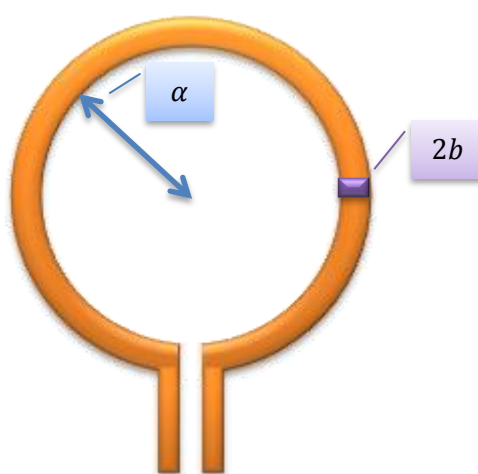
4.2.2 Εκπομπός (Transmitter)

Όπως προαναφέρθηκε ένα πολύ σημαντικό τμήμα του αισθητήρα είναι το πομπός του. Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του πομπού είναι τα σημεία, τα οποία μελετήθηκαν περισσότερο και στα οποία αφιερώθηκε το μεγαλύτερο μέρος των προσομοιώσεων και των πειραμάτων

της εργασίας αυτής. Προβλήματα όπως το μέγεθος της κεραίας, η αποδοτικότητα, η απόσταση εκπομπής κ.α. είναι από τα κυριότερα ζητήματα που θα απαντηθούν στην παρούσα διπλωματική.

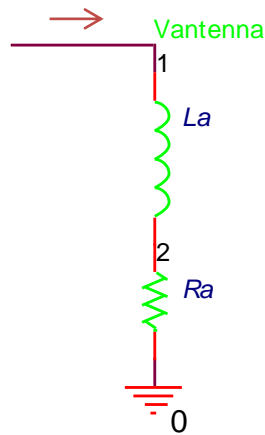
Λόγω του περιορισμένου μεγέθους της συσκευής αλλά και της κατά το δυνατό μικρής παρεχόμενης ισχύος, προτιμήθηκε μία μικρή κεραία βρόχου. Οι κεραίες βρόχου χαρακτηρίζονται για την απλότητα τους, τόσο στον τρόπο λειτουργίας τους όσο και στην κατασκευή τους.

Όσο αφορά την κεραία που χρησιμοποιήθηκε, αυτή είναι μια κυκλική κεραία βρόχου μίας σπείρας, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.3. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά επομένως που κυρίως ενδιαφέρουν είναι η ακτίνα του βρόχου a και η ακτίνα διατομής του αγωγού b .



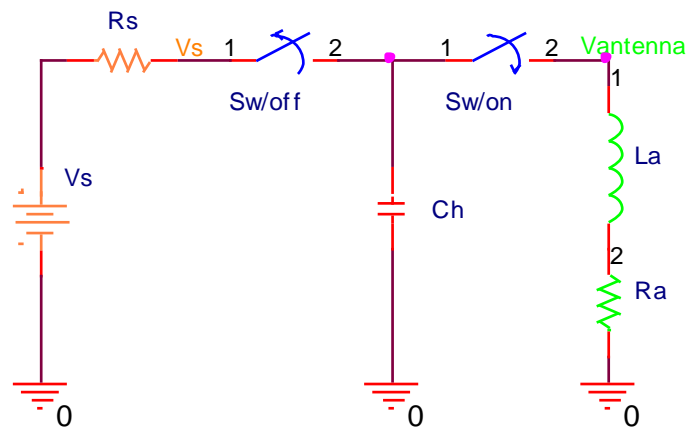
Σχ.4.3. Κυκλική κεραία βρόχου μιας σπείρας

Τα εργαλεία προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν δεν υποστηρίζουν κάποιο μοντέλο κεραίας και επομένως για την προσομοίωση ήταν απαραίτητος ο υπολογισμός ενός ισοδύναμου κυκλώματος. Η κυκλωματική μορφή μιας τέτοιας κεραίας αποτελείται από μία αντίσταση R_a και ένα πηνίο L_a συνδεδεμένα στην σειρά (βλ. Σχ. 4.4), που αντιπροσωπεύουν την αντίσταση και την αυτεπαγωγή της κεραίας αντίστοιχα [6].



Σχ.4.4. Ισοδύναμο κύκλωμα κυκλική κεραίας βρόχου

Το κύκλωμα αυτό συνδέεται σε σειρά με το κύκλωμα του συλλέκτη ενέργειας (energy harvester) που περιγράφηκε στην προηγούμενη υποενότητα μέσω ενός διακόπτη (βλ. Σχ. 4.5). Αφού ο πυκνωτής του κυκλώματος φορτιστεί και αποσυνδεθεί από την πηγή τάσης, συνδέεται με την κεραία και μέσω την εκφόρτωσης του εκπέμπεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από την κεραία.

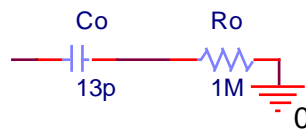


Σχ. 4.5. Ισοδύναμο κύκλωμα Harvester-Antenna.

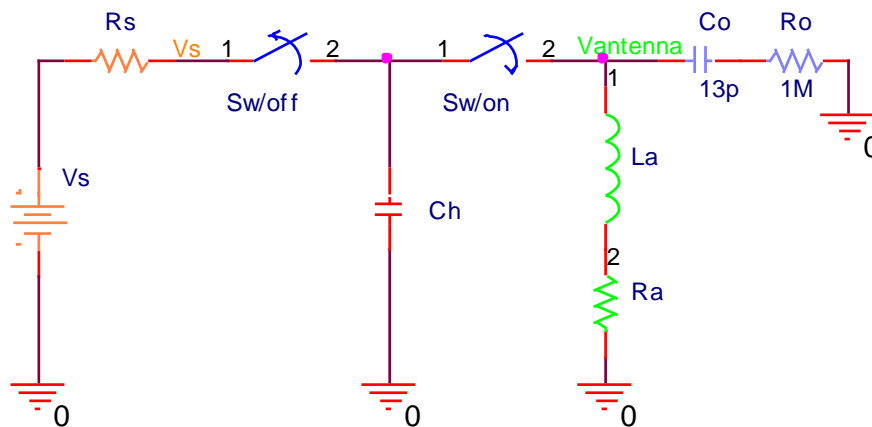
4.2.3 Παλμογράφος (Oscilloscope)

Το ισοδύναμο κύκλωμα του παλμογράφου αποτελείται από έναν πυκνωτή και μια αντίσταση σε σειρά (βλ. Σχ. 4.6). Οι τιμές, που χρησιμοποιήθηκαν στο υποκύκλωμα, προέρχονται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του εργαστηριακού παλμογράφου, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις. Ο λόγος που ένα μέγεθος, όπως η χωρητικότητα του παλμογράφου έπρεπε να συμπεριληφθεί στο τελικό κύκλωμα οφείλεται κυρίως στο ότι αυτή επηρεάζει την συμπεριφορά του συνολικού κυκλώματος. Η προσθήκη ενός πυκνωτή

χωρητικότητας 13pF, αν και μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα στις περισσότερες των περιπτώσεων, είναι αρκετά σημαντική στην περίπτωση που ο πυκνωτής του συλλέκτη είναι 1, ή 10 ή και 100pF, όπου τα μεγέθη της χωρητικότητας είναι συγκρίσιμα. Το τελικό κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε στο στάδιο της προσομοίωσης απεικονίζεται στο σχήμα 4.7.



Σχ. 4.6. Ισοδύναμο κύκλωμα παλμογράφου.



Σχ. 4.7. Συνολικό κύκλωμα της πλατφόρμας επικοινωνίας, όπως προσομοιώθηκε στο PSpice.

5

Επιλογές παραμέτρων και ανάλυση Πλατφόρμας

Επικοινωνίας

5.1 Επιλογές τιμών

Για την προσομοίωση της πλατφόρμας επικοινωνίας που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο επιλέχθηκαν μεταβλητές μεταξύ ενός εύρους τιμών έτσι ώστε να μελετηθεί καλύτερα η συμπεριφορά της. Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν έτσι ώστε να γίνεται πιο αποτελεσματική η σύγκριση μεταξύ των θεωρητικών υπολογισμών και αυτών που προκύπτουν από την προσομοίωση ή τα πειραματικά αποτελέσματα.

Οι κύριες μεταβλητές των στοιχείων που μετέχουν στην υλοποίηση της συγκεκριμένης πλατφόρμας επικοινωνίας είναι:

- Η τάση εκφόρτωσης του πυκνωτή
- Η χωρητικότητα του πυκνωτή
- Η διάμετρος της κεραίας εκπομπής και
- Η διατομή της κεραίας εκπομπής

Για την τάση εκφόρτωσης έχει επιλέγει η τιμή των 5 V αφού θεωρείται μια σχετικά χαμηλή τάση και είναι δυνατό να εμφανιστεί σε συλλέκτες ενέργειας. Οι χωρητικότητες που επιλέχθηκαν για τον πυκνωτή ήταν: 1 pF, 10 pF, 100 pF, 1 nF, 10 nF, 100nF. Ο λόγος που επιλέχθηκαν τόσο μικρές χωρητικότητες είναι η πολύ περιορισμένη δυνατότητα αποθήκευσης

που χαρακτηρίζει τους συλλέκτες ενέργειας των αισθητήρων, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα να καθίσταται πρακτικά αδύνατη η πλήρης φόρτιση πυκνωτών μεγαλύτερης χωρητικότητας. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την κυκλωματική ανάλυση της πλατφόρμας επικοινωνίας, στις χωρητικότητες των πυκνωτών, που επιλέχθηκαν, έχει προστεθεί η χωρητικότητα του υποκυκλώματος του παλμογράφου, η οποία ήταν 13pF. Η διάμετρος της κεραίας κυμαίνεται από 1 mm μέχρι 30 mm ενώ η ακτίνα διατομής της από 0.5 mm μέχρι 0.75 mm. Η επιλογή των τιμών έγινε βάσει των υλικών που διατίθενται για την υλοποίηση της πλατφόρμας αλλά και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που πρέπει να έχει μια τέτοια συσκευή.

5.2 Ανάλυση παραμέτρων Πλατφόρμας Επικοινωνίας

Κατά την ανάλυση της καινοτόμου πλατφόρμας επικοινωνίας μελετήθηκαν: η κυματομορφή εκπομπής, η επίδραση του επιδερμικού φαινομένου στο σύστημα επικοινωνίας, η αντίσταση ακτινοβολίας, ο συντελεστής ποιότητας Q και η ισχύς του σήματος. Οι θεωρητικές μετρήσεις και τα αντίστοιχα γραφήματα έγιναν με την βοήθεια του εργαλείου *MATLAB* της *Mathworks*.

5.2.1 Μελέτη κυματομορφής

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο η αποστολή του σήματος γίνεται μέσω μίας κεραίας βρόχου που τροφοδοτείται από έναν πυκνωτή. Από το ισοδύναμο κύκλωμα προκύπτει ένα σχετικά απλό LC κύκλωμα. Η ταλάντωση σε ένα τέτοιο κύκλωμα είναι αρμονική, με συχνότητα [7]:

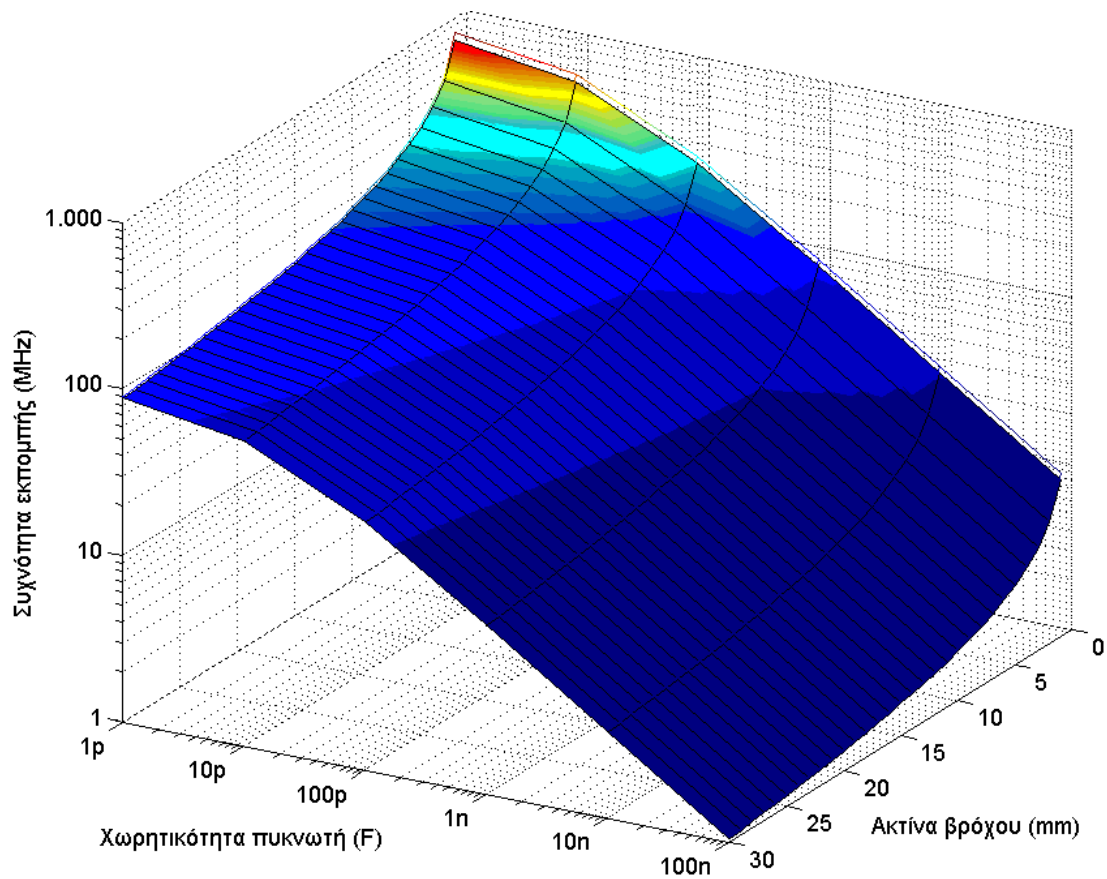
$$f = 1/2\pi\sqrt{LC} \quad (5.1)$$

ενώ η αυτεπαγωγή L της κεραίας δίνεται από τον τύπο [6]:

$$L = \mu_0 \alpha \left[\ln \left(\frac{8a}{b} \right) - 2 \right] \quad (5.2)$$

όπου $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ V} \cdot \text{s}/(\text{A} \cdot \text{m})$, η διαπερατότητα του κενού και a , b η ακτίνα του βρόχου και η ακτίνα διατομής του αγωγού αντίστοιχα.

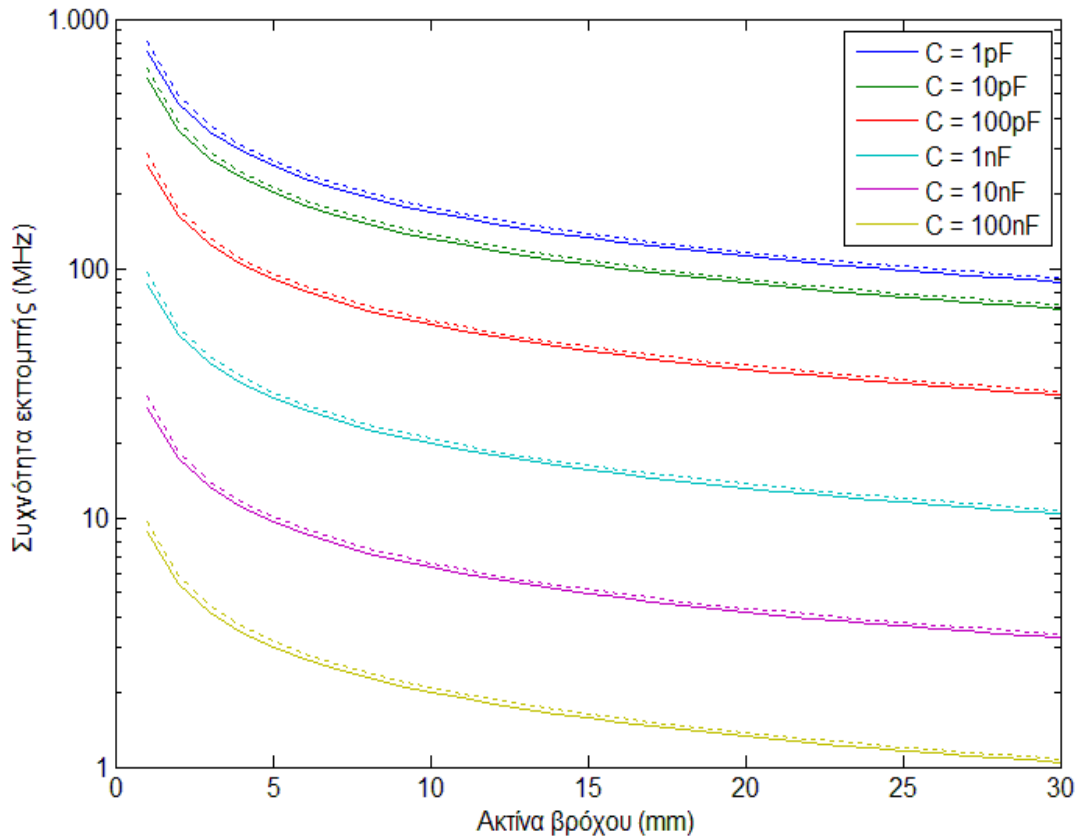
Επομένως υποθέτοντας ότι η διατομή του αγωγού της κεραίας είναι σταθερή σε όλο το μήκος της, τότε η συχνότητα εκπομπής προκύπτει ως συνάρτηση της χωρητικότητας του πυκνωτή και της ακτίνας βρόχου της κεραίας.



Σχ. 5.1 Τρισδιάστατο γράφημα της συχνότητα εκπομπής συναρτήσει της χωρητικότητας του πυκνωτή και της ακτίνας βρόχου της κεραίας για ακτίνα διατομής 0.5mm και περίγραμμα γραφήματος για ακτίνα διατομής 0.75mm.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 5.1, όσο αυξάνονται οι τιμές της χωρητικότητας του πυκνωτή και της ακτίνας του βρόχου τόσο χαμηλότερη συχνότητα εκπομπής εμφανίζει το κύκλωμα. Επίσης από το περίγραμμα που έχει συμπεριληφθεί διαφαίνεται ότι η μεταβολή της συχνότητας εκπομπής είναι πολύ μικρή για μικρές διακυμάνσεις της διατομής της κεραίας.

Για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων, παρατίθεται παρακάτω το ίδιο διάγραμμα σε δισδιάστατη μορφή με διαφορετική καμπύλη για διάφορες τιμές του πυκνωτή.



Σχ. 5.2. Γράφημα της συχνότητα εκπομπής συναρτήσει της ακτίνας βρόχου της κεραίας για κάθε διαφορετικό πυκνωτή. Οι συνεχείς γραμμές αντιστοιχούν σε ακτίνα διατομής 0.5mm ενώ οι διακεκομμένες σε 0.75mm.

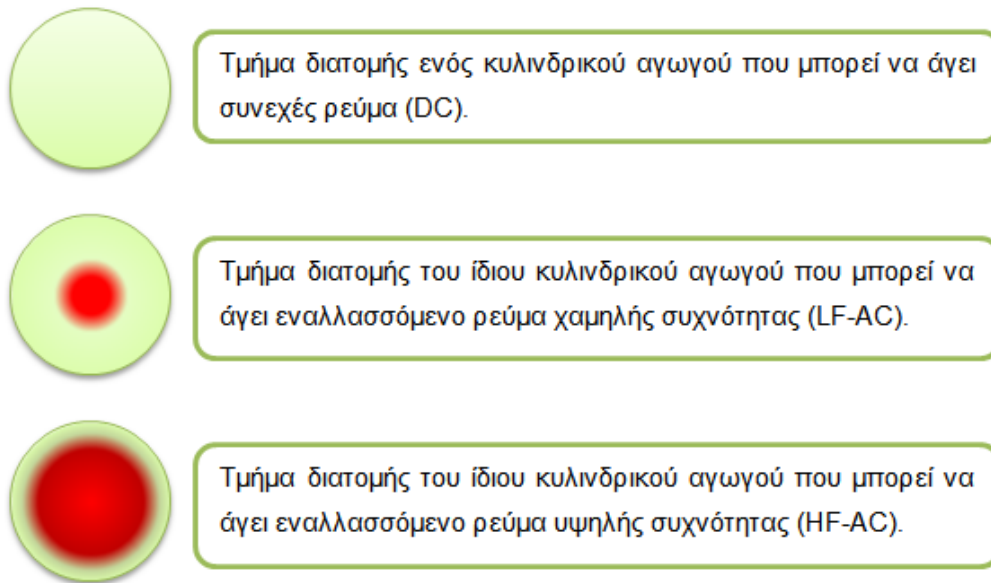
5.2.2 Επιδερμικό Φαινόμενο (Skin Effect)

Η ονομαστική αντίσταση ενός κυλινδρικού αγωγού δίνεται από την σχέση:

$$R = \frac{\rho \ell}{D} \quad (5.3)$$

όπου ρ είναι η ειδική αντίσταση του αγωγού, ℓ είναι το του μήκος αγωγού και D διατομή αγωγού.

Η πραγματική αντίσταση (σύνθετη αντίσταση) ενός αγωγού είναι πάντα υψηλότερη όταν διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) από ότι από συνεχές (DC). Η εναλλασσόμενη μαγνητική ροή, που δημιουργείται από το εναλλασσόμενο ρεύμα που διαρρέει έναν αγωγό, αλληλεπιδρά με τον ίδιο τον αγωγό παράγοντας ένα αντίθετο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο αντιστέκεται στην διέλευση του ρεύματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το ρεύμα να μην μπορεί να εκμεταλλευτεί όλη την ωφέλιμη διατομή του αγωγού για την διέλευσή του, αλλά ένα μικρό μόνο μέρος στην εξωτερική επιφάνεια (βλ. Σχ. 5.3.).



Σχ. 5.3. Σχηματική αναπαράσταση του επιδερμικού φαινομένου

Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως επιδερμικό φαινόμενο (skin effect). Η προκύπτουσα ανομοιόμορφη πυκνότητα ρεύματος έχει ως αποτέλεσμα την μεγάλη αύξηση της πραγματικής αντίστασης του αγωγού και κατά συνέπεια και των απωλειών.

Οι εξισώσεις για τον υπολογισμό του επιδερμικού βάθους (skin depth) είναι [8]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (5.4)$$

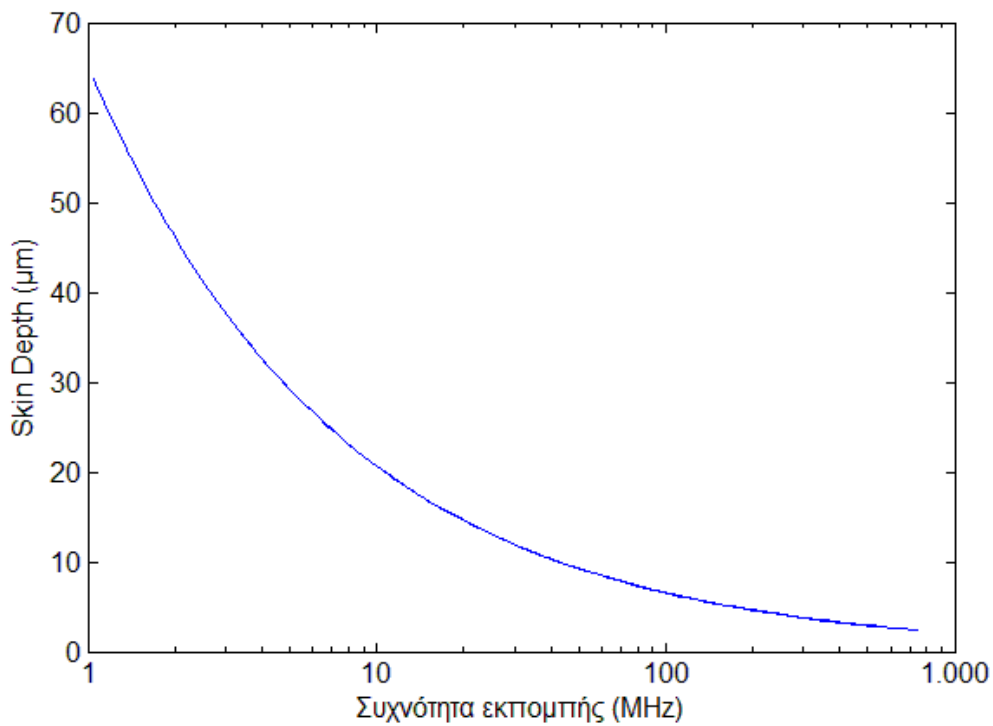
όπου ω είναι η γωνιακή συχνότητα και μ η απόλυτη μαγνητική διαπερατότητα του αγωγού. Η συνολική αντίσταση που εμφανίζει ο αγωγός δίνεται από την εξίσωση [8]:

$$R \approx \frac{\ell\rho}{\pi(D-\delta)\delta} \quad (5.5)$$

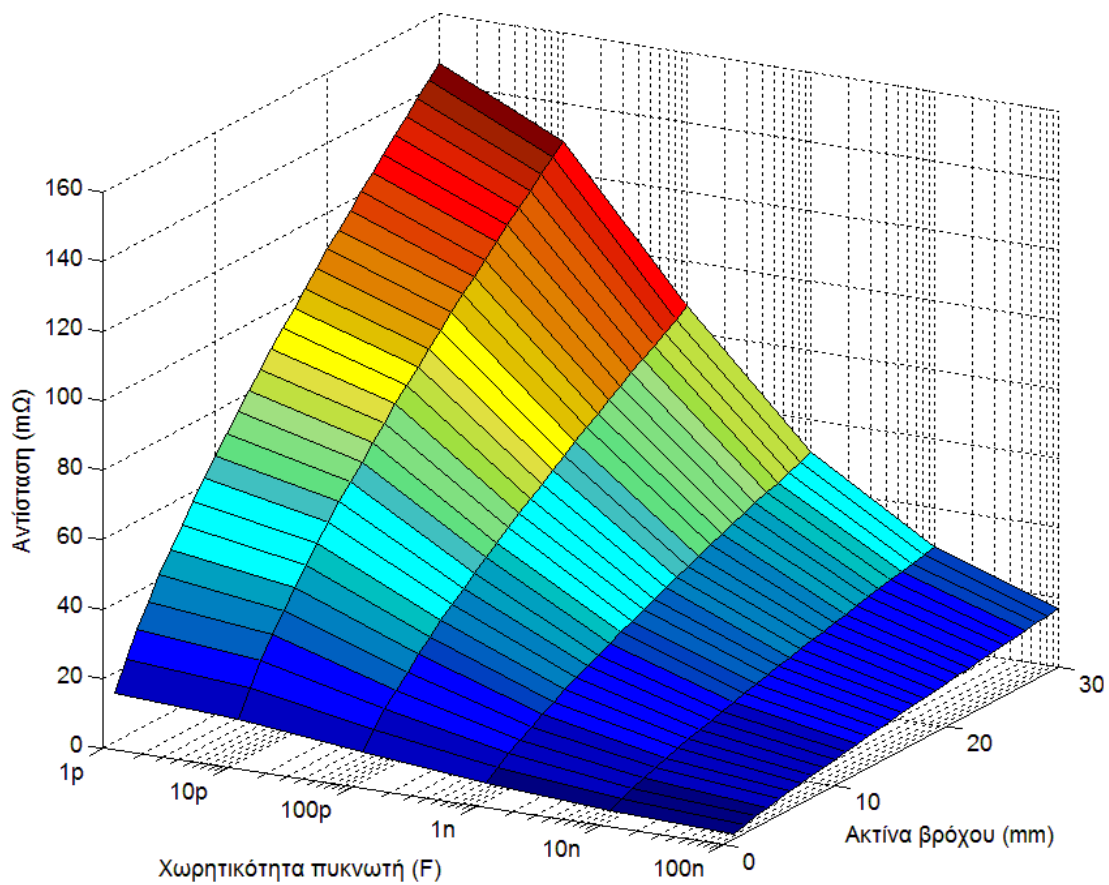
Στο LC κύκλωμα που μελετήθηκε, η μεταβολή του δ (skin depth) συναρτηθεί της συχνότητας, για χάλκινο αγωγό, περιγράφεται από το Σχ. 5.4.

Η εξίσωση (5.4) δηλώνει ότι το επιδερμικό βάθος δ είναι αντιστρόφως ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας της συχνότητας εκπομπής ω . Από τις σχέσεις (5.4) και (5.5) είναι δυνατό να υπολογισθεί η ολική αντίσταση της κεραίας κατά την εκπομπή ενός σήματος. Συμπερασματικά προκύπτει ότι για υψηλές συχνότητες εκπομπής, η παράμετρος δ σχεδόν μηδενίζεται αυξάνοντας υπερβολικά την συνολική αντίσταση της κεραίας και κατά συνέπεια τις απώλειες της.

Επειδή το κύκλωμα εκπομπής περιλαμβάνει ένα πυκνωτή χωρητικότητας C , αξίζει να σημειωθεί η σχέση που συνδέει την συνολική αντίσταση του LC κυκλώματος με την χωρητικότητα C , την ακτίνα βρόγχου της κεραίας και την διατομή της (βλ. Σχ. 5.5).



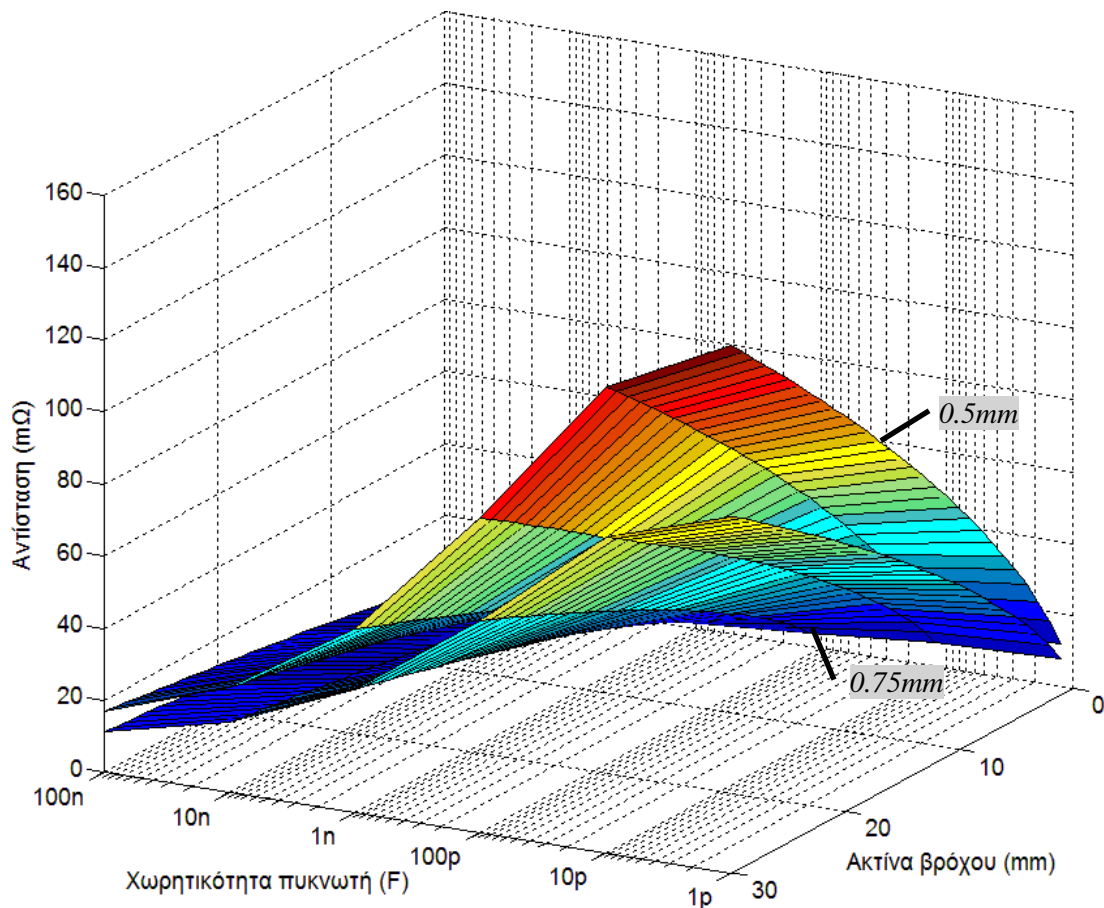
Σχ. 5.4. Γράφημα μεταβολής skin depth συναρτήσει της συχνότητας εκπομπής.



Σχ. 5.5. Τριδιάστατο γράφημα ολικής αντίστασης συναρτήσει της χωρητικότητας του πυκνωτή και της ακτίνας βρόχου για ακτίνα διατομής 0.5mm.

Όπως φαίνεται από το Σχ. 5.5, η προσθήκη πυκνωτή μικρότερης χωρητικότητας επιφέρει μεγαλύτερη ολική αντίσταση στο LC κύκλωμα, ενώ αντίθετα η χρήση κεραίας με μικρότερη ακτίνα βρόχου επιφέρει μείωση της ολικής αντίστασης. Όσο αφορά τις χωρητικότητες, το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται λόγω τον υψηλών συχνοτήτων συντονισμού, που παρουσιάζουν οι μικροί σε χωρητικότητα πυκνωτές (βλ. Σχ.5.2.). Σαν συνέπεια της σχέσης (5.5), οι υψηλές συχνότητες συντονισμού οδηγούν σε μικρότερα επιδερμικά βάθη δ και επομένως μεγαλύτερες ολικές αντιστάσεις του LC κυκλώματος.

Από την σχέση (5.1) προκύπτει ότι η ακτίνα του βρόχου επηρεάζει και αυτή αντιστρόφως ανάλογα την συχνότητα εκπομπής λόγω της αυτεπαγωγής της L και επομένως μικρότερες ακτίνες συνεπάγονται μεγαλύτερες συχνότητες συντονισμού. Παρόλα αυτά η ωμική αντίσταση της κεραίας μικραίνει σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από την αντίσταση που παρουσιάζεται λόγω του επιδερμικού φαινομένου, όσο η ακτίνα του βρόχου μικραίνει, όπως προκύπτει από την (5.3). Επομένως, μεγαλύτερες ακτίνες βρόχου επιφέρουν μεγαλύτερες αντιστάσεις. Με παρόμοιο τρόπο από την σχέση (5.5), εξηγείται η μείωση της ολικής αντίστασης για μεγαλύτερες ακτίνες διατομής της κεραίας, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.6.

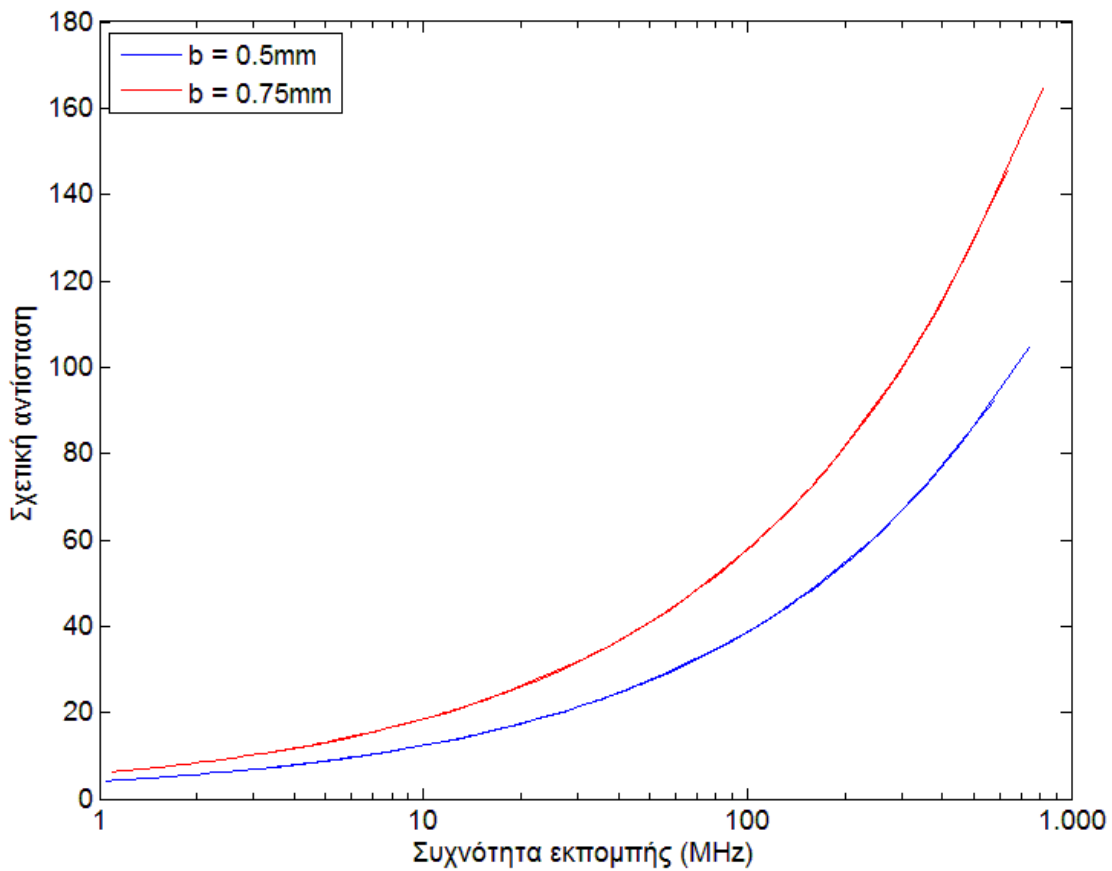


Σχ. 5.6. Σύγκριση ολικής αντίστασης κεραίας διατομής 0.5mm και 0.75mm.

Τέλος για την ορθότερη αντιμετώπιση του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας της κεραίας, υπολογίστηκε η σχετική αντίσταση της κεραίας:

$$R_{\text{relevant}} = \frac{R}{R_{\text{DC}}} \quad (5.6)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η σχετική αντίσταση είναι αδιάστατο μέγεθος και δείχνει το πόσο μεγαλύτερη είναι η ολική αντίσταση της κεραίας κατά την αποστολή σήματος σε σχέση με την ωμική αντίσταση του αγωγού. Στο Σχ. 5.7 παριστάνεται ένα γράφημα της ολικής αντίστασης συναρτήσει της συχνότητας εκπομπής για δύο τυπικές διατομές του αγωγού της κεραίας (0.5mm και 0.75mm).



Σχ. 5.7. Σχετική αντίσταση της κεραίας συναρτήσει της συχνότητας εκπομπής για ακτίνα διατομής 0.5mm και 0.75mm.

Όπως ήταν αναμενόμενο, η ολική αντίσταση της κεραίας είναι κατά πολύ μεγαλύτερη, σε υψηλές συχνότητες, από την αντίσταση που παρουσιάζει στη διαρροή συνεχούς ρεύματος (βλ. Σχ. 5.7 με συχνότητες κοντά στο 0). Το φαινόμενο αυτό γίνεται ακόμη πιο έντονο όσο μεγαλώνει η διατομή (D) του αγωγού, αφού, όπως προκύπτει από τις (5.3) και (5.5), η DC αντίσταση του αγωγού μικραίνει με ακόμη μεγαλύτερο ρυθμό από ότι η ολική αντίσταση του LC κυκλώματος. Για τους παραπάνω λόγους θεωρήθηκε ότι, το επιδερμικό φαινόμενο είναι

απαραίτητο να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς, που ακολουθούν και αφορούν την συμπεριφορά της κεραίας κατά την εκπομπή του σήματος.

5.2.3 Αντίσταση Ακτινοβολίας της Κεραίας (*Antenna Radiation Resistance*)

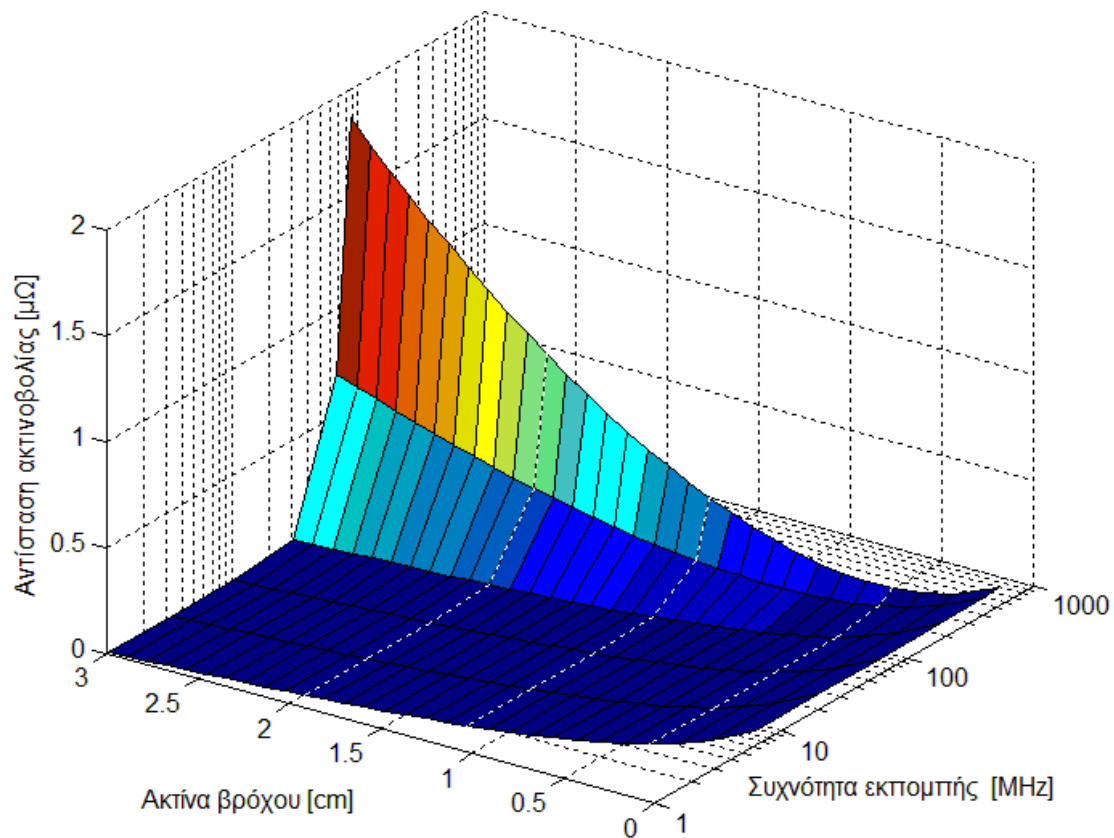
Ως αντίσταση ακτινοβολίας της κεραίας (antenna radiation resistance) ορίζεται η υποθετική ωμική αντίσταση ενός κυκλώματος, μέσα στην οποία θα απελευθερώνονταν το ίδιο ποσό ενέργειας με το αντίστοιχο ακτινοβολούμενο από την κεραία. Πρόκειται για ένα υποθετικό μέγεθος με κυρίως θεωρητική σημασία.

Η αντίσταση ακτινοβολίας για μικρές κεραίες βρόγχου υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο [6]:

$$R_{rad} = 31,171 \left(\frac{S^2}{\lambda^4} \right) \quad (5.7)$$

όπου $S = \pi a^2$ είναι η επιφάνεια του βρόχου και λ το μήκος κύματος. Επομένως η αντίσταση αυτή είναι σε άμεση συνάρτηση με την συχνότητα εκπομπής (βλ. Σχ. 5.8).

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι, όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 5.8, για μικρές ακτίνες βρόχου η αντίσταση ακτινοβολίας παραμένει πολύ μικρή σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Η χαρακτηριστική αυτή συμπεριφορά της αντίστασης ακτινοβολίας αποτελεί μια σημαντική ιδιότητα, η οποία λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα μελέτη, αφού αν για παράδειγμα χρησιμοποιηθεί μια κεραία βρόχου αρκετά μεγάλης ακτίνας, η ακτινοβολούμενη ενέργεια θα είναι πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με μία άλλη μικρότερης, για συχνότητες μεγαλύτερες των 100MHz.



Σχ. 5.8. Τρισδιάστατο γράφημα της αντίστασης ακτινοβολίας συναρτήσει της ακτίνας βρόχου και της συχνότητας εκπομπής, σημειώνονται με διακεκομμένες γραμμές οι ακτίνες 0.4, 1.2 και 2 cm

5.2.4 Συντελεστής Ποιότητας Q (Quality Factor)

Γενικά στα κυκλώματα, ο συντελεστής ποιότητας Q ή Q quality factor είναι ένας αδιάστατος παράγοντας ο οποίος μας δείχνει πόσο αργά αποσβένει ένας ταλαντωτής ή ένα αντηχείο. Υψηλός συντελεστής ποιότητας Q δείχνει χαμηλότερο ρυθμό απώλειας της ενέργειας σε σχέση με την αποθηκευμένη ενέργεια του ταλαντωτή και κατά συνέπεια οι ταλαντώσεις διαρκούν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Το Q ορίζεται από την ακόλουθη μαθηματική έκφραση:

$$Q = 2\pi \times \frac{\text{Αποθηκευμένη ενέργεια}}{\text{Διαχεόμενη ενέργεια ανά κύκλο}} \quad (5.8)$$

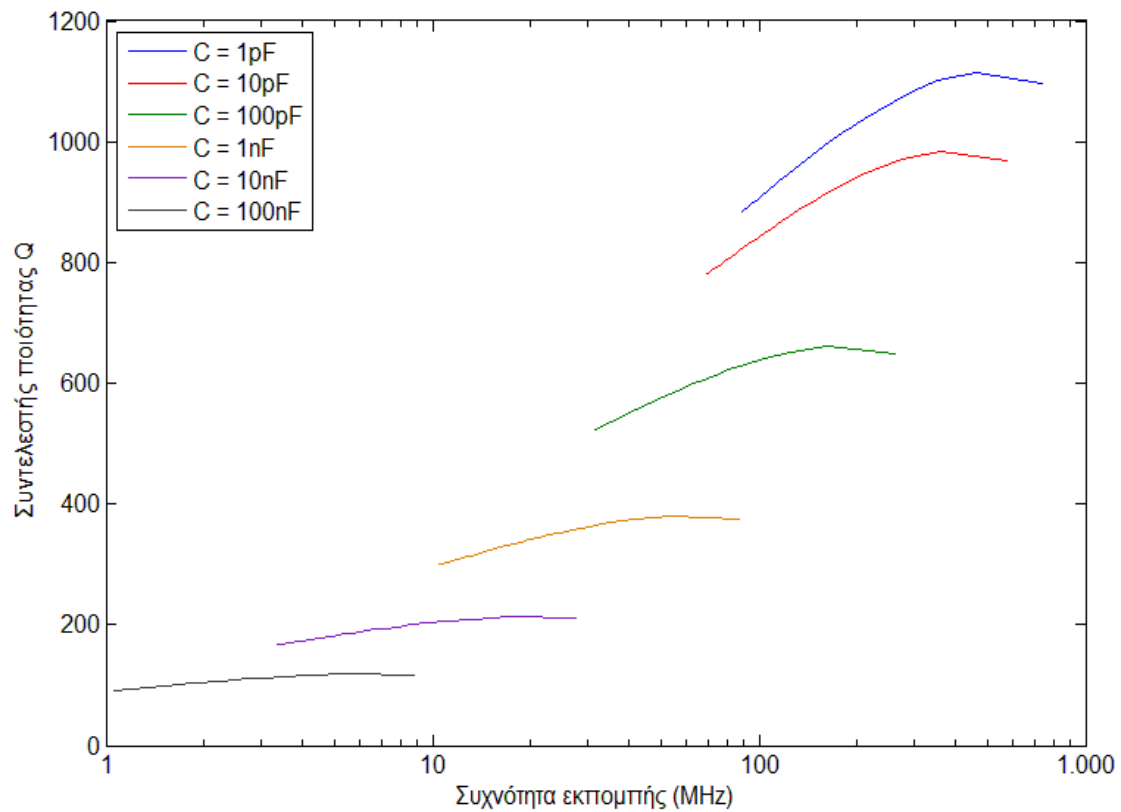
Ειδικότερα σε ένα RLC κύκλωμα το Q εκφράζεται από την σχέση [9]:

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (5.9)$$

Ο υπολογισμός του για μια κεραία εκπομπής γίνεται λίγο πιο σύνθετος αν ληφθεί υπόψη ότι, η συνολική αντίσταση του βρόχου εξαρτάται όχι μόνο από την ακτίνα του και την διατομή του αλλά και από την συχνότητα εκπομπής (βλ. Επιδερμικό φαινόμενο - skin effect).

Στις προηγούμενες ενότητες παρουσιάστηκε ο τρόπος υπολογισμού της συχνότητας καθώς και της ολικής αντίστασης. Επομένως είναι δυνατό να υπολογιστεί ο συντελεστής ποιότητας Q για τις διάφορες πλατφόρμες επικοινωνίας, δηλαδή για διάφορες τιμές των L και C συναρτήσει της συχνότητας εκπομπής (βλ. Σχ. 5.9).

Όπως φαίνεται στο Σχ. 5.9, πυκνωτές μικρότερης χωρητικότητας αποδίδουν μεγαλύτερο Q . Κάτι τέτοιο είναι φυσιολογικό, αφού όσο μικρότερη είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή τόσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα ταλάντωσης του RLC κυκλώματος, όπως αυτό προκύπτει από την σχέση (5.1). Επιπρόσθετα εξετάζοντας την σχέση (5.9) προκύπτει ότι, αύξηση της γωνιακής ταχύτητας ω του κυκλώματος ($\omega=2\pi f$) συνεπάγεται ταυτόχρονα αύξηση του Q . Παρόλα αυτά δεν θα πρέπει να υπάρχει συσχετισμός του Q και της διάρκειας εκπομπής του σήματος, αφού η επιλογή ενός πυκνωτή μεγάλης χωρητικότητας σε έναν ταλαντωτή, αν και μειώνει το Q , εντούτοις αυξάνει τον χρόνο αποφόρτισης του.



Σχ. 5.9. Τιμές του Q του κυκλώματος για έξι διαφορετικούς πυκνωτές, συναρτήσει της συχνότητας εκπομπής

5.2.5 Ισχύς σήματος

Η ισχύς του σήματος είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες στην ασύρματη μετάδοση. Η στιγμιαία ισχύς ενός σήματος δίνεται από την απόλυτη τιμή του τετράγωνο της τάσης του [10]:

$$P(t) = |x(t)|^2 \quad (5.10)$$

Ο υπολογισμός της μέσης ισχύος σε ένα περιοδικό σήμα για μία περίοδο είναι απλός και δίνεται από την ακόλουθη σχέση [10]:

$$P = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |x(t)|^2 dt \quad (5.11)$$

όπου $x(t)$ είναι η συνάρτηση του κύματος ως προς τον χρόνο t και T η περίοδος του σήματος. Σε ένα συνημιτονοειδές σήμα η συνάρτηση του κύματος δίνεται από την σχέση:

$$x(t) = A \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \quad (5.12)$$

όπου A είναι το πλάτος το κύματος. Στο κύκλωμα, που μελετήθηκε, το σήμα είναι αποσβένον και επομένως το πλάτος του δεν είναι σταθερό, αφού μειώνεται με τον χρόνο t . Θεωρώντας την απόσβεση εκθετική, η συνάρτηση του πλάτους A ως προς τον χρόνο δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$A(t) = A_0 e^{-\zeta \omega t} \quad (5.13)$$

όπου ω είναι η γωνιακή ταχύτητα και ζ ο ρυθμός απόσβεσης, ο οποίος σε ένα RLC κύκλωμα δίνεται από την σχέση:

$$\zeta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (5.14)$$

Αντικαθιστώντας την (5.1) στην (5.13), το πλάτος A μπορεί να περιγραφεί ως ακολούθως:

$$A(t) = A_0 e^{-\frac{R}{2L} t} \quad (5.15)$$

Στην αρχή της παραγράφου παρατίθεται η σχέση που περιγράφει τον υπολογισμό της ισχύος του σήματος στο σημείο εκπομπής του (βλ. (5.10)). Ο υπολογισμός της ισχύος σε έναν απομακρυσμένο δέκτη αν αυτός ανήκει στο μακρινό πεδίο δύνεται από την εξίσωση του Friis [6]:

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_r G_t \quad (5.16)$$

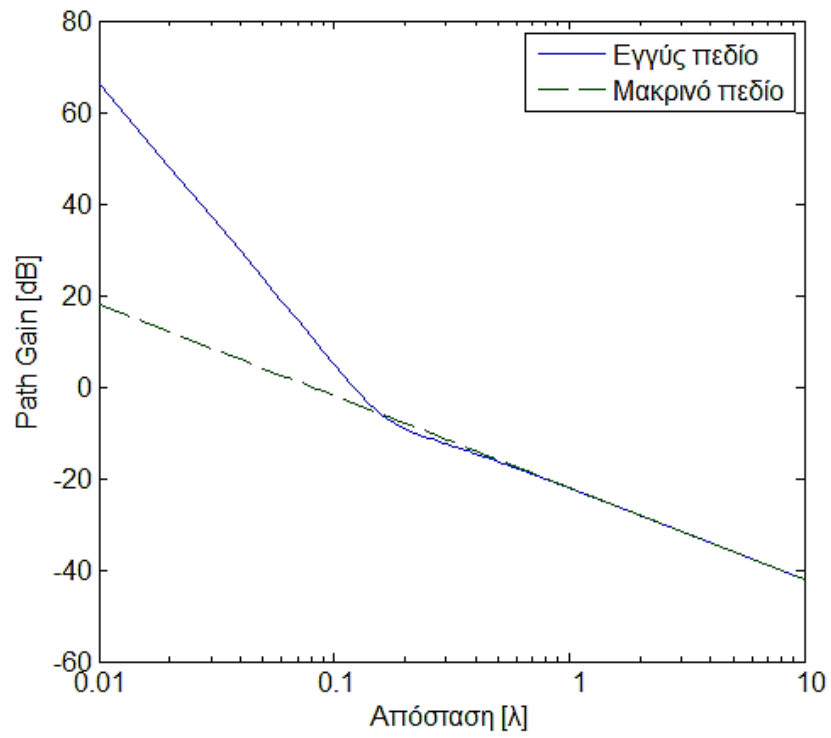
όπου P_r και P_t είναι η λαμβανόμενη και η εκπεμπόμενη ισχύς, λ το μήκος κύματος, G_r και G_t το κέρδος στον δέκτη και στον πομπό και d η απόσταση. Σημειώνεται ότι η για το μακρινό πεδίο ισχύει $d > 2D^2/\lambda$, όπου D η μεγαλύτερη από τις διαστάσεις των δύο κεραιών.

Στην περίπτωση, που η λήψη βρίσκεται στο εγγύς πεδίο, η ισχύς δίνεται από την σχέση [4], [11]:

$$P_r = P_t \frac{G_r G_t}{4} \left(\frac{1}{(kd)^2} - \frac{1}{(kd)^4} + \frac{1}{(kd)^6} \right) \quad (5.17)$$

όπου $k = 2\pi/\lambda$. Οι όροι $\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$ και $\frac{1}{(kd)^2} - \frac{1}{(kd)^4} + \frac{1}{(kd)^6}$ ονομάζονται Path Gain γιατί δηλώνουν το κέρδος που προσδίδει η ελεύθερη διάδοση στην εξίσωση ισχύος του σήματος.

Μία γραφική αναπαράσταση της μεταβολής του Path Gain συναρτήσει της απόστασης παρουσιάζεται στο Σχ. 5.10.



Σχ. 5.10. Μεταβολή του Path Gain συναρτήσει της απόστασης

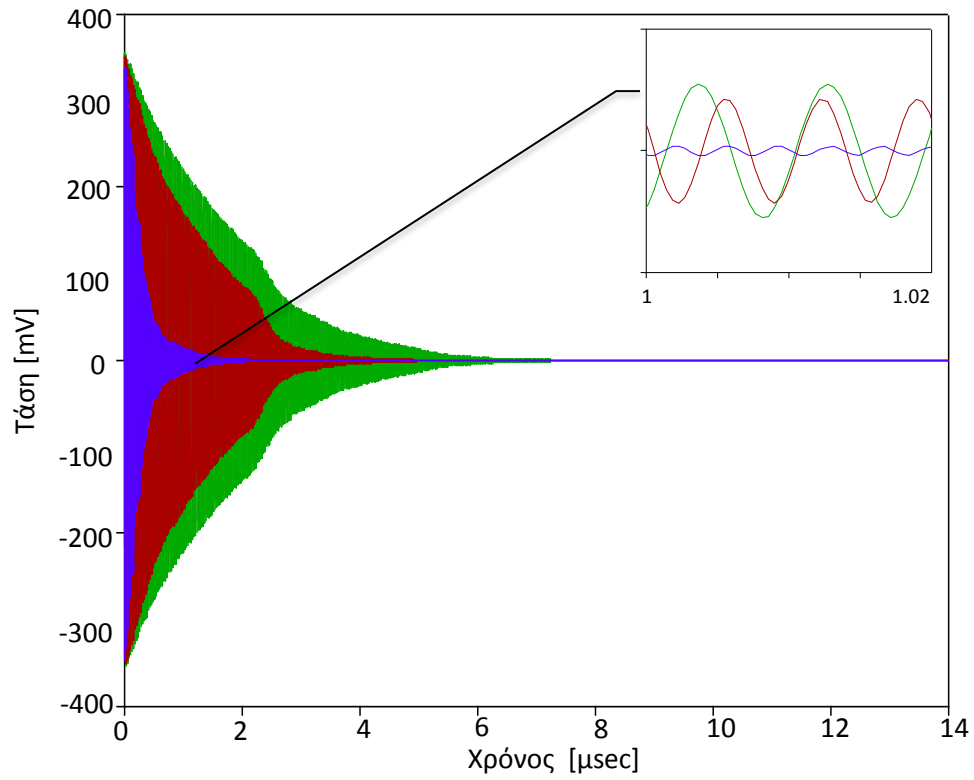
6

Προσομοίωση Πλατφόρμας Επικοινωνίας

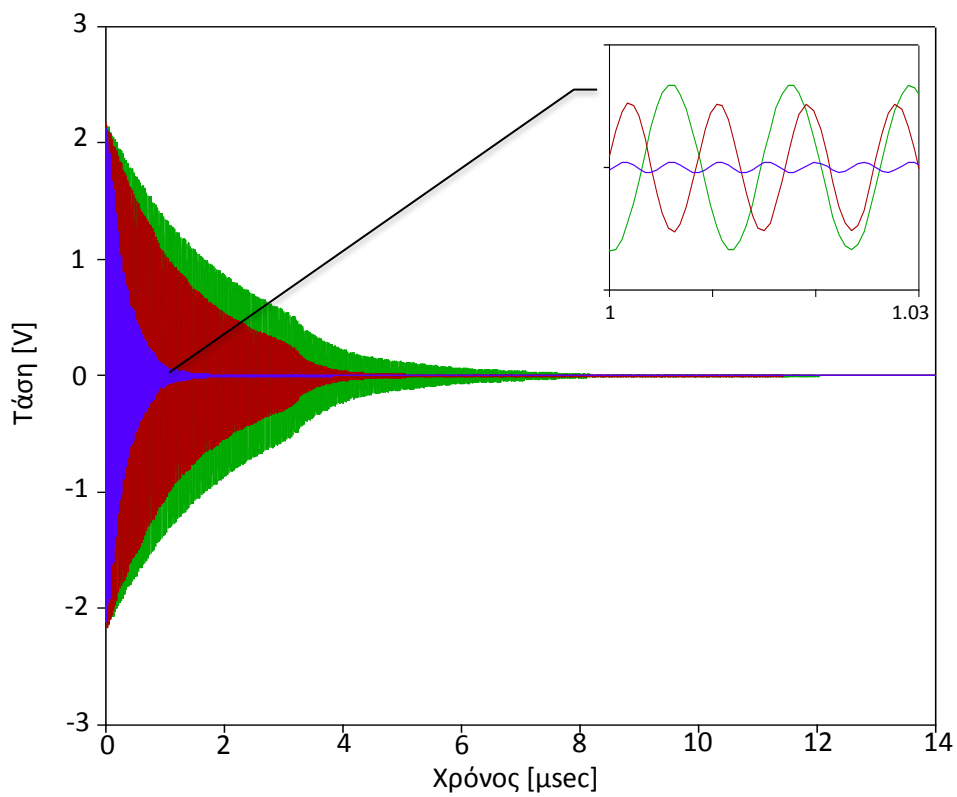
Στόχος της προσομοίωσης είναι αρχικά να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα της σε σχέση με την θεωρητική ανάλυση και κατόπιν να συγκριθούν με αυτά που προκύπτουν κατά την εκτέλεση του πειραματικού τμήματος της διπλωματικής εργασίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα αποτελέσματα μόνο για τις κεραίες με ακτίνα διατομής 0.5cm , αφού δεν παρουσιάστηκαν αξιοσημείωτες διαφοροποιήσεις για σχετικά μικρές μεταβολές της διατομής του αγωγού της κεραίας.

6.1 Αποτελέσματα Προσομοίωσης μέσω Spice

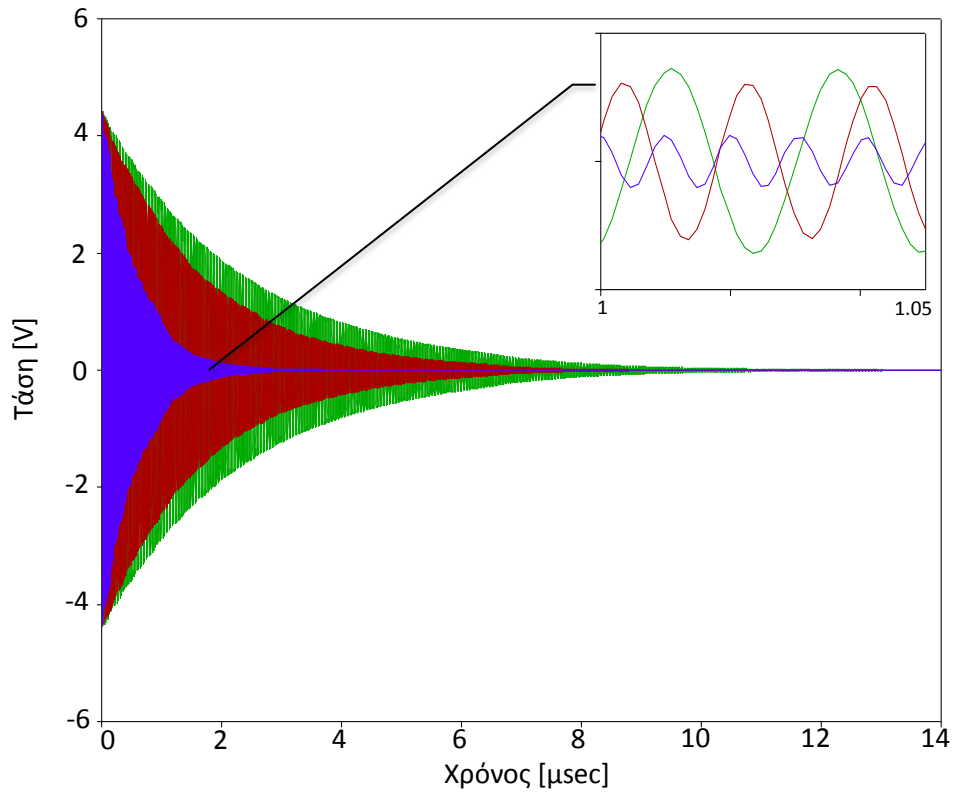
Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4, επειδή τα εργαλεία προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν δεν υποστηρίζουν κάποια συγκεκριμένα μοντέλα κεραίας, η προσομοίωση που γίνεται βασίστηκε στο ισοδύναμο RL κύκλωμα (βλ. Σχ. 4.4) χρησιμοποιώντας τις τιμές που υπολογίστηκαν στο κεφάλαιο 5 για την συνολική αντίσταση και αυτεπαγωγή της κεραίας. Ακολούθως παρατίθενται οι κυματομορφές που εξήχθησαν μέσω του προγράμματος προσομοίωσης *Spice* για κεραίες βρόχου ακτινών 0.4, 1.2 και 2cm, και πυκνωτές χωρητικότητας 1pF, 10pF, 100pF, 1nF, 10nF και 100nF. Το ισοδύναμο κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτό που περιγράφηκε εκτενώς στο κεφάλαιο 4.



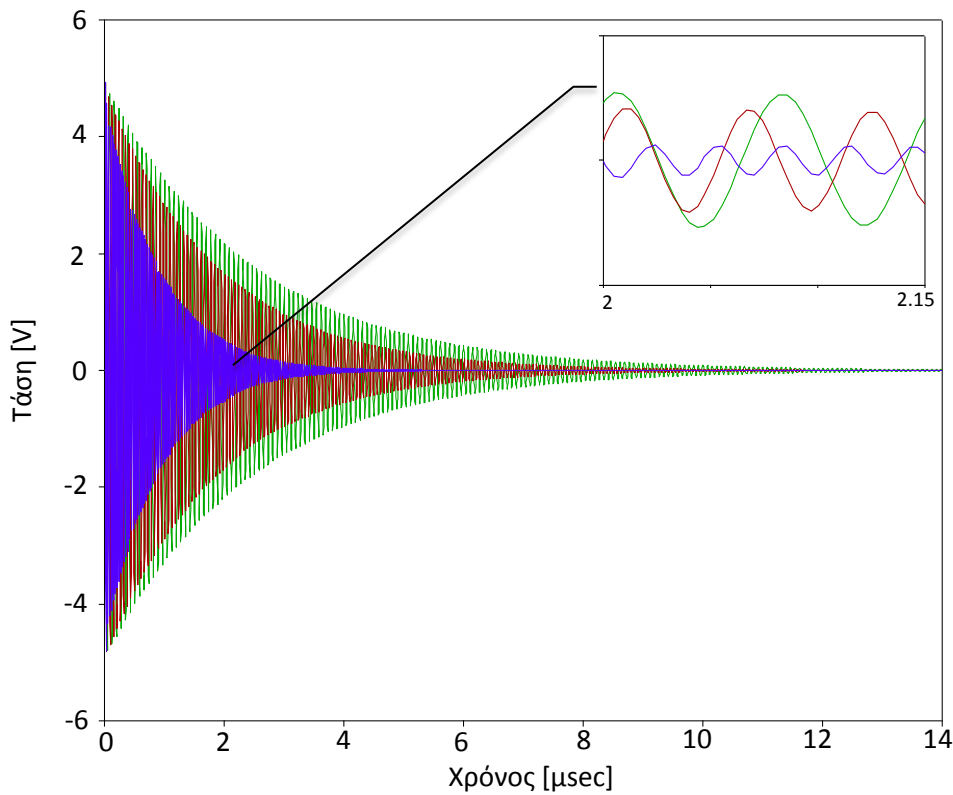
Σχ. 6.1. Κυματομορφές για κεραία βρόχου ακτίνας 0.4 (μπλε), 1.2 (κόκκινο) και 2cm (πράσινο) και πυκνωτή 1pF



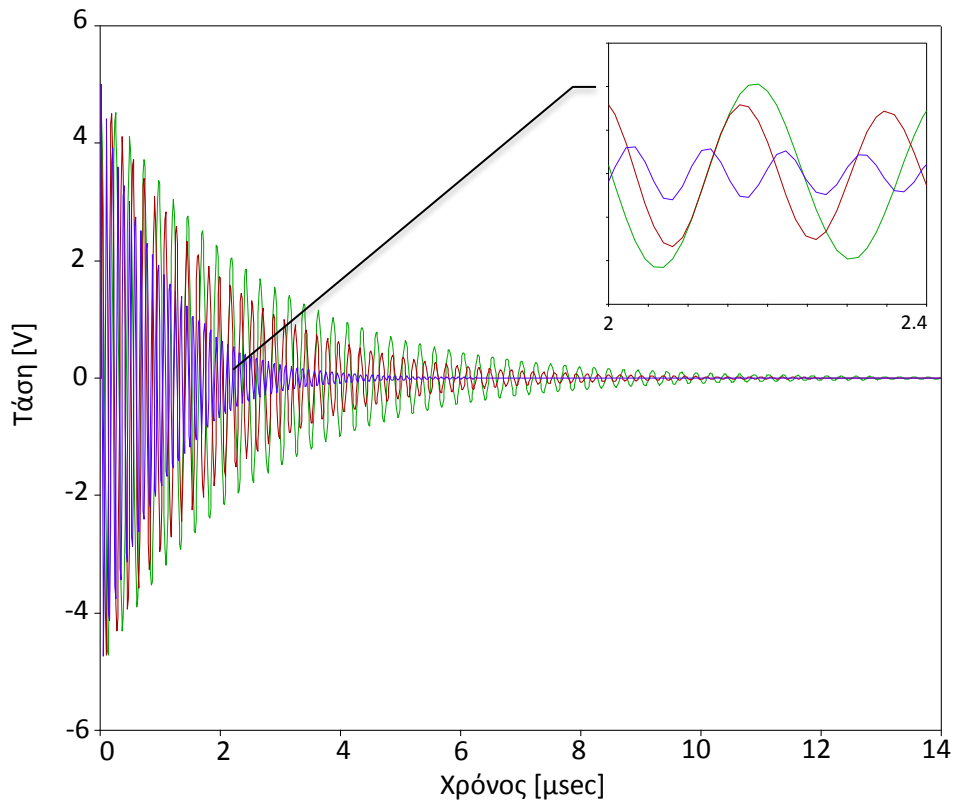
Σχ. 6.2. Κυματομορφές για κεραία βρόχου ακτίνας 0.4 (μπλε), 1.2 (κόκκινο) και 2cm (πράσινο) και πυκνωτή 10pF



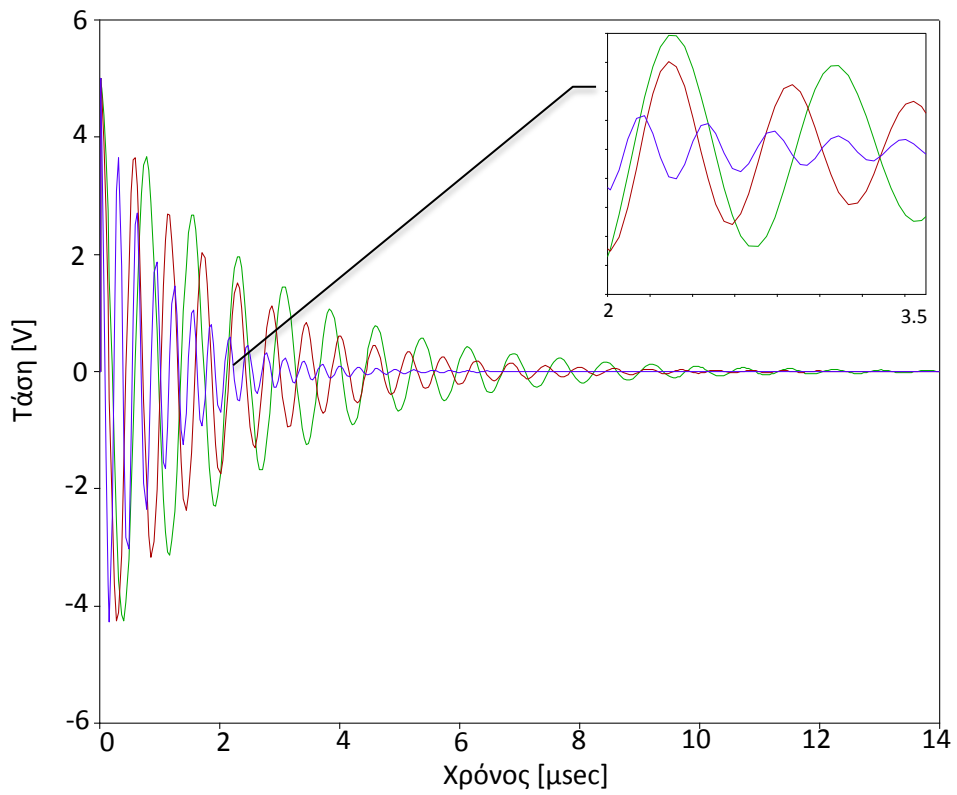
Σχ. 6.3. Κυματομορφές για κεραίες βρόχου ακτίνας 0.4 (μπλε), 1.2 (κόκκινο) και 2cm (πράσινο) και πυκνωτή 100pF



Σχ. 6.4. Κυματομορφές για κεραίες βρόχου ακτίνας 0.4 (μπλε), 1.2 (κόκκινο) και 2cm (πράσινο) και πυκνωτή 1nF



Σχ. 6.5. Κυματομορφές για κεραίας βρόχου ακτίνας 0.4 (μπλε), 1.2 (κόκκινο) και 2cm (πράσινο) και πυκνωτή 10nF



Σχ. 6.6. Κυματομορφές για κεραίας βρόχου ακτίνας 0.4 (μπλε), 1.2 (κόκκινο) και 2cm (πράσινο) και πυκνωτή 100nF

6.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων ως προς την Συχνότητα

Η συχνότητα της κάθε κυματομορφής εξάγεται μέσω του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier της (Fast Fourier Transform - FFT) [10]. Στον πίνακα 6.1 παρατίθενται οι συχνότητες που προέκυψαν από τους θεωρητικούς υπολογισμούς και τις μετρήσεις της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα ήταν σχεδόν όμοια και επομένως οι θεωρητικές μετρήσεις, που προκύπτουν, ήταν αρκετά ακριβείς.

Χωρητικότητα Πυκνωτή (F)	Ακτίνα (cm)	Συχνότητα (MHz)	
		Θεωρητικοί υπολογισμοί	Αποτελέσματα προσομοίωσης
1p	0.4	295	277
	1.2	151	148
	2	111	110
10p	0.4	230	217
	1.2	117	116
	2	87	86
100p	0.4	103	98
	1.2	53.2	52.6
	2	39.3	39
1n	0.4	34.7	32.7
	1.2	17.7	17.5
	2	13.1	13
10n	0.4	11	10.4
	1.2	5.65	5.57
	2	4.17	4.14
100n	0.4	3.49	3.28
	1.2	1.78	1.75
	2	1.32	1.28

Πίνακας 6.1. Συχνότητες που προέκυψαν από τους θεωρητικούς υπολογισμούς και από την προσομοίωση

7

Υλοποίηση Πλατφόρμας Επικοινωνίας

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται τα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν στην πλατφόρμα επικοινωνίας καθώς και τον τρόπο με τον οποίο κατασκευάστηκε αυτή. Επίσης παρουσιάζονται τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και το απαραίτητο λογισμικό.

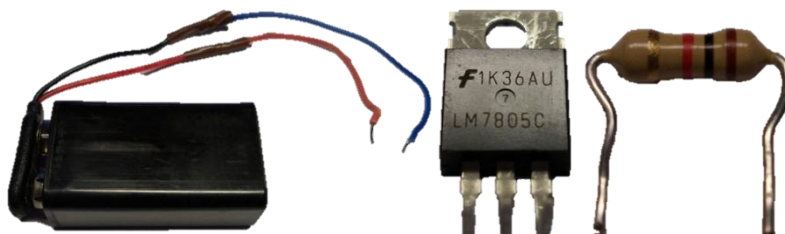
7.1 Λεπτομέρειες υλοποίησης

Στην παράγραφο που ακολουθεί αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάστηκε το κάθε τμήμα της πλατφόρμας. Για πρακτικούς λόγους η πλατφόρμα επικοινωνίας έγινε πιλοτικά πάνω σε ένα δοκιμαστικό πίνακα συναρμολόγησης (Πλακέτα κατασκευών - Breadboard). Η κατασκευή της περιλαμβάνει την υλοποίηση του κυκλώματος της τροφοδοσίας, της κεραίας βρόγχου, της φόρτισης και αποφόρτισης του πυκνωτή και της συνδεσμολογίας μεταξύ τους.

7.1.1 Υλοποίηση του κυκλώματος τροφοδοσίας

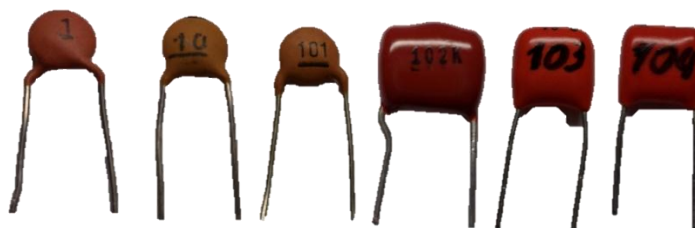
Η υλοποίηση της τροφοδοσίας έγινε σύμφωνα με το πρότυπο που μελετήθηκε στην προσομοίωση. Το πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε είναι αρκετά απλοποιημένο σε σχέση με αυτό που απαιτείται για εφαρμογές αυτόνομων μικρο-αισθητήρων. Η επιλογή αυτή έγινε για τον λόγο ότι η προσομοίωση και ανάπτυξη ενός τέτοιου συλλέκτη ενέργειας αποτελεί αρκετά εξειδικευμένη διαδικασία και δεν περιλαμβάνεται στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής.

Σαν σταθερή πηγή τάσης χρησιμοποιήθηκε μια απλή αλκαλική μπαταρία τάσης 9 V, τύπου PP3, συνδεδεμένη με έναν σταθεροποιητή τάσης των 5 V (LM7805C). Προτιμήθηκε αυτή η λύση για την τροφοδοσία της πλατφόρμας επικοινωνίας, λόγω του ότι είναι αρκετά αξιόπιστη, απλή και εύκολη στην χρήση.



Σχ. 7.1. Η μπαταρία, ο σταθεροποιητής τάσης και η αντίσταση φόρτισης που χρησιμοποιήθηκαν

Η πηγή σταθερής τάσης 5V, που προκύπτει μετά το κύκλωμα σταθεροποίησης συνδέθηκε στην συνέχεια σε σειρά με ένα διακόπτη, μια αντίσταση 1 kΩ και έναν πυκνωτή. Οι πυκνωτές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν χωρητικότητας 1nF, 10nF, 100nF, 1pF, 10pF και 100pF.



Σχ. 7.2. Οι πυκνωτές με διάφορες χωρητικότητες, που χρησιμοποιήθηκαν.

7.1.2 Υλοποίηση της Κεραίας Βρόγχου

Οι διάφορες κεραίες τύπου βρόγχου κατασκευάστηκαν με ακτίνες βρόγχου 0.4cm, 1.2cm και 2cm και αποτελούνται από ένα απλό μονόκλωνο χάλκινο καλώδιο με ακτίνα διατομής 0.5 και 0.75mm (βλ. Σχ. 7.3). Η διαδικασία της κατασκευής είναι απλή απομακρύνοντας αρχικά το εξωτερικό προστατευτικό περίβλημα και κάμπτοντας στην συνέχεια το καλώδιο κυκλικά. Αν και με αυτό τον απλό τρόπο, ο σχηματισμός ενός τέλει κύκλου συγκεκριμένης ακτίνας είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί, παρόλα αυτά οι αποκλίσεις των διαστάσεων ήταν αρκετά μικρές.



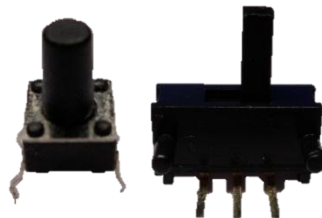
Σχ. 7.3. Οι κεραίες που κατασκευάστηκαν με ακτίνα διατομής 0.5mm και 0.75mm.

Για την επίτευξη του καλύτερου δυνατού συντελεστή ποιότητας, η κεραία τοποθετήθηκε απευθείας πάνω στην πλακέτα, χωρίς την παρεμβολή κάποιου καλωδίου που θα αύξανε την συνολική αντίσταση και την αυτεπαγωγή του υποκυκλώματος πυκνωτή-διακόπτη-κεραίας.

7.1.3 Φόρτιση, Αποφόρτιση και Διακόπτες

Τέλος, κατά την υλοποίηση για τον συντονισμό της φόρτισης και της αποφόρτισης του πυκνωτή χρησιμοποιήθηκαν διακόπτες τύπου push-button ενώ για την σύνδεση και την αποσύνδεση της μπαταρίας χρησιμοποιήθηκε ένας διακόπτης τύπου toggle.

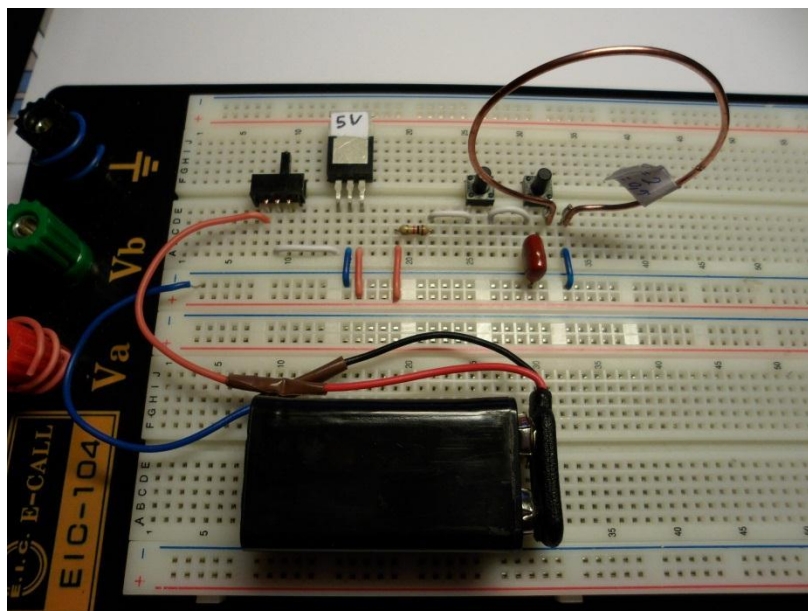
Η επιλογή των διακοπών έγινε καθαρά για πρακτικούς λόγους. Η επιλογή ενός toggle διακόπτη για την παροχή ρεύματος στο κύκλωμα αποτελεί λύση σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείτε μία πηγή τάσης που δεν μπορεί να αποσυνδεθεί εύκολα κάθε φορά που θα γίνονται αλλαγές στο κύκλωμα. Οι push-button διακόπτες είναι μια πολύ καλή και απλή λύση για γρήγορη φόρτιση και αποφόρτιση του πυκνωτή. Κάτι τέτοιο ήταν απαραίτητο αφού χρειάστηκε να επαναλάβουμε αρκετές φορές τις μετρήσεις για να επιτευχθεί το σωστό αποτέλεσμα. Παρόλα αυτά οι push-button διακόπτες δεν λειτουργούν «ιδανικά» και έτσι επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του συστήματος, κάτι που θα περιγραφεί εκτενέστερα στη παράγραφο 8.2.2.



Σχ. 7.4. Οι δύο τύποι διακοπών (αριστερά push-button, δεξιά toggle), που χρησιμοποιήθηκαν.

7.1.4 Συνδεσμολογία

Η συνδεσμολογία των παραπάνω έγινε σε Breadboard με απλά μονόκλινα καλώδια ώστε οι παρεμβολές μεταξύ πυκνωτή και κεραίας να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες.



Σχ. 7.5 Φωτογραφία του συνολικού κυκλώματος σε Breadboard

7.2 Όργανα μέτρησης και απαραίτητο λογισμικό

Τα πειράματα έγιναν στο εργαστήριο ηλεκτρονικής του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ένας ψηφιακός παλμογράφος μοντέλου HP/Agilent DSO3202A με μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας 200MHz, καθώς και το απαραίτητο λογισμικό για την διασύνδεση του με έναν προσωπικό υπολογιστή (*3000 Series Oscilloscopes Connect Software*). Τα αρχεία που εξήχθησαν από την μνήμη του παλμογράφου ήταν σε μορφή excel, και στην συνέχεια εισήχθησαν σε μορφή πινάκων στο εργαλείο MATLAB. Όπως προαναφέρθηκε, είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί ότι στην είσοδο του παλμογράφου υπάρχει αντίσταση 1MΩ αλλά και χωρητικότητα 13pF. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι αναμενόμενο να επηρεάσουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων και για αυτόν το λόγο συνυπολογίστηκαν στο τελικό ισοδύναμο κύκλωμα (βλ. Σχ.4.6).

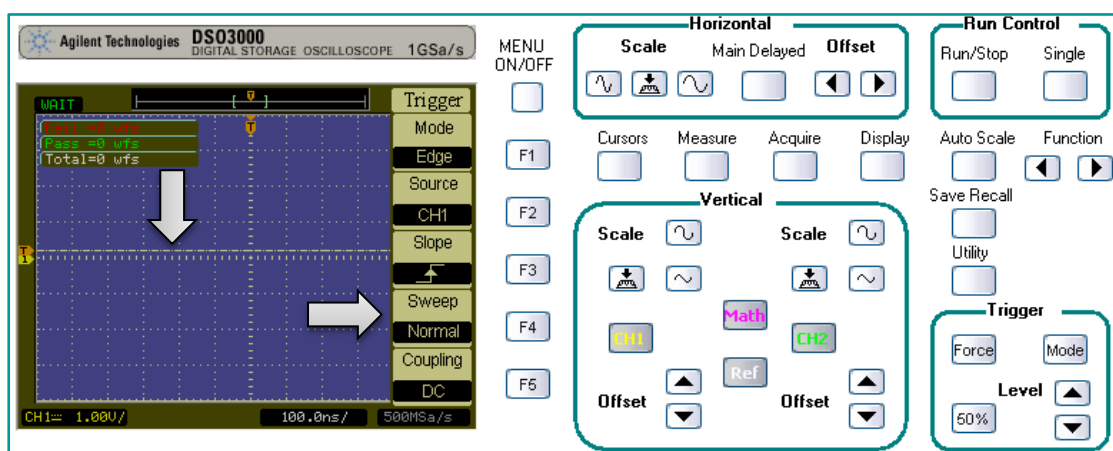


Σχ. 7.6. Ο παλμογράφος που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις.

7.2.1 Βασικές ρυθμίσεις παλμογράφου

Πέρα από τις τυπικές ρυθμίσεις κλιμάκωσης της τάσης και του χρόνου που έγιναν σε κάθε φάση του περάματος, για την ορθότερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκαν κάποιες βασικές ρυθμίσεις ώστε να μπορούν να ληφθούν αποτελέσματα από τον παλμογράφο και αφορούν το trigger (βλ. Σχ. 7.7).

Στην περίπτωση που το προσμετρούμενο φορτίο είναι στα άκρα της κεραίας, το Trigger Level πρέπει να είναι λίγο παραπάνω από το 0. Ακόμη για να αποτυπωθεί το ζητούμενο στιγμιότυπο θα πρέπει να ρυθμιστεί το Sweep στην επιλογή Normal.



Σχ. 7.7. Απαραίτητες ρυθμίσεις του Trigger για την σωστή λήψη αποτελεσμάτων

8

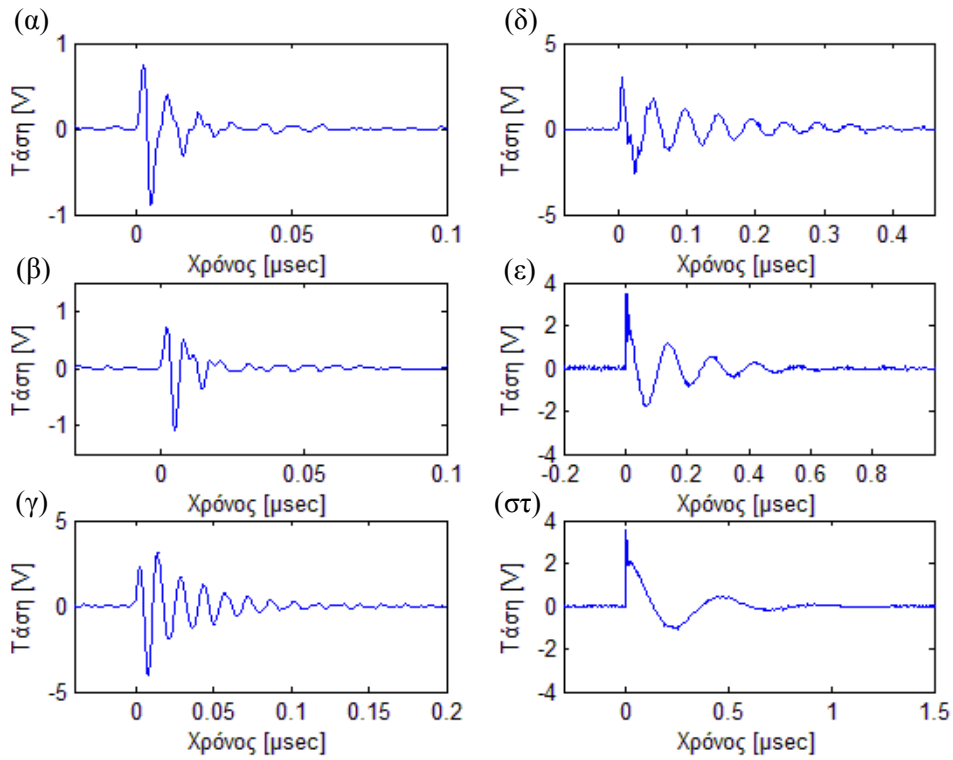
Μέτρηση Φορτίου στον Πομπό

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά παραθέτονται και συζητούνται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων που λήφθηκαν στον πομπό της πλατφόρμας επικοινωνίας και κατόπιν γίνεται σύγκριση με αυτά των προσομοιώσεων.

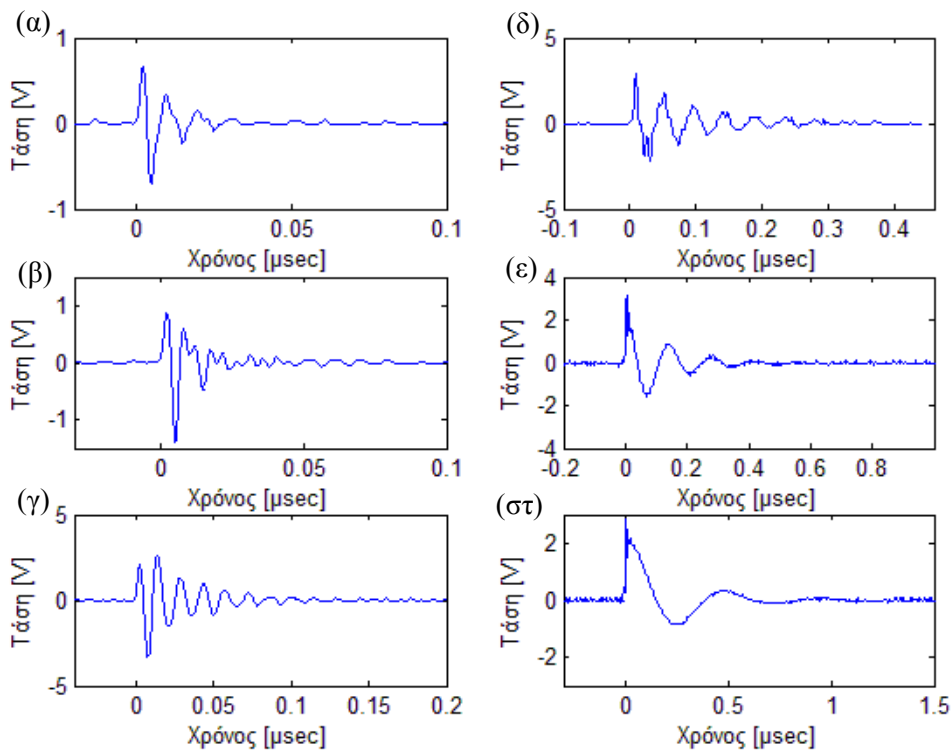
Στη πρώτη φάση της πειραματικής διαδικασίας διεξήχθησαν μετρήσεις με χρήση του παλμογράφου στα άκρα της κεραίας εκπομπής. Για τις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί των διαφορετικών τύπων κεραιών και πυκνωτών. Με διαδοχικές φορτίσεις και αποφορτίσεις του εκάστοτε πυκνωτή προέκυψαν αξιόπιστα αποτελέσματα για την λειτουργία του συστήματος της πλατφόρμας επικοινωνίας.

8.1 Κυματομορφές Πειραματικών Μετρήσεων

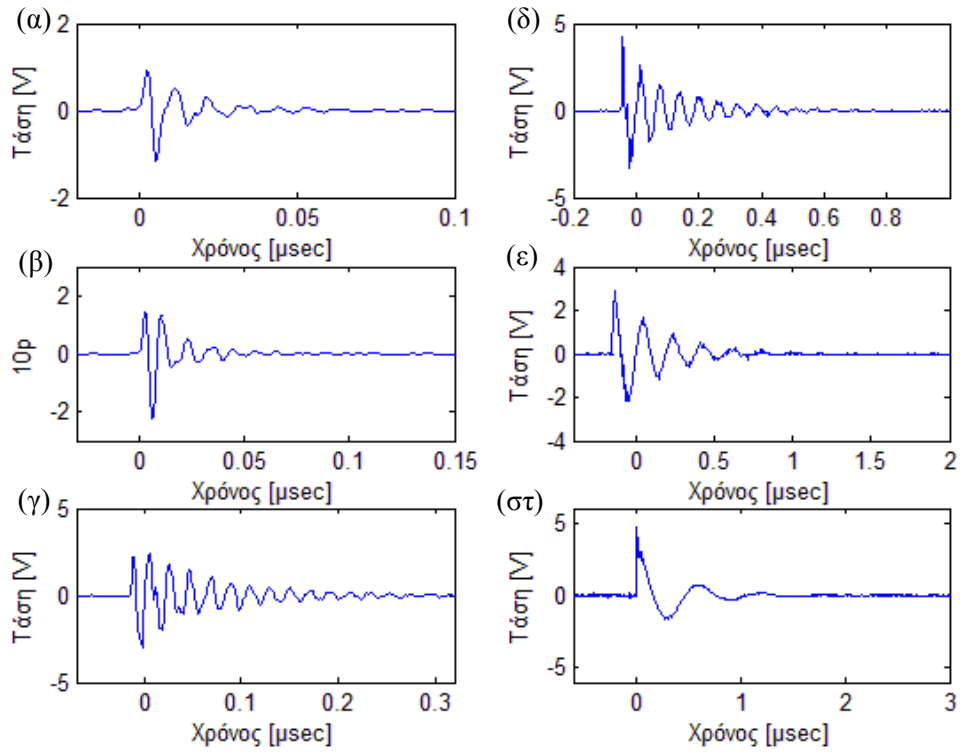
Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται με την χρήση εργαλείου MATLAB της Mathworks, οι γραφικές απεικονίσεις των κυματομορφών που προέκυψαν από κάθε μέτρηση. Όπως ήταν αναμενόμενο από την θεωρία που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται πολύ μικρές αποκλίσεις στις κυματομορφές μεταξύ των κεραιών βρόγχου που διαφέρουν στην ακτίνα διατομής.



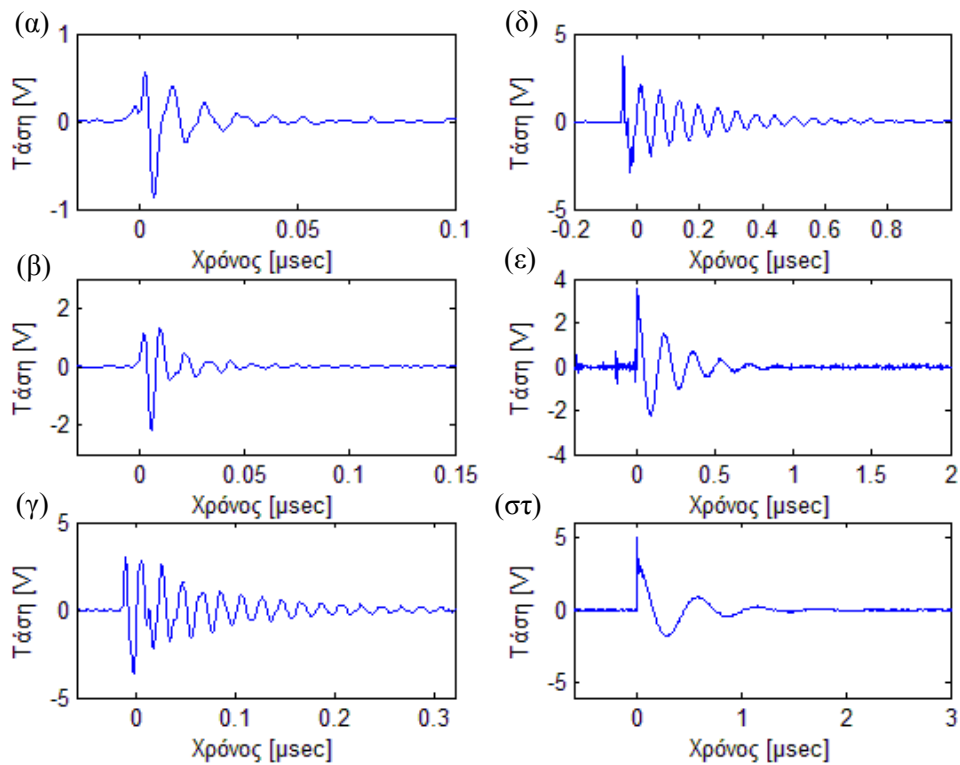
Σχ. 8.1. Κυματομορφές κεραίας ακτίνας 0.4cm και διατομής 0.5mm για χωρητικότητες πυκνωτή (α) 1pF , (β) 10pF , (γ) 100pF , (δ) 1nF , (ε) 10nF και (στ) 100nF



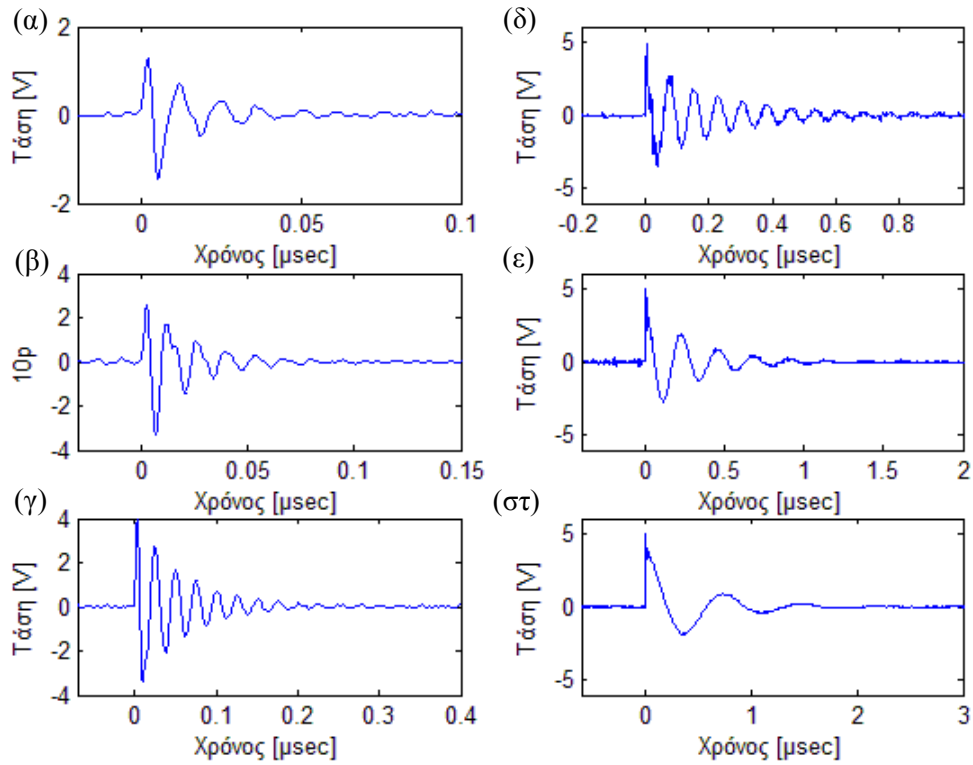
Σχ. 8.2. Κυματομορφές κεραίας ακτίνας 0.4cm και διατομής 0.75mm για χωρητικότητες πυκνωτή (α) 1pF , (β) 10pF , (γ) 100pF , (δ) 1nF , (ε) 10nF και (στ) 100nF



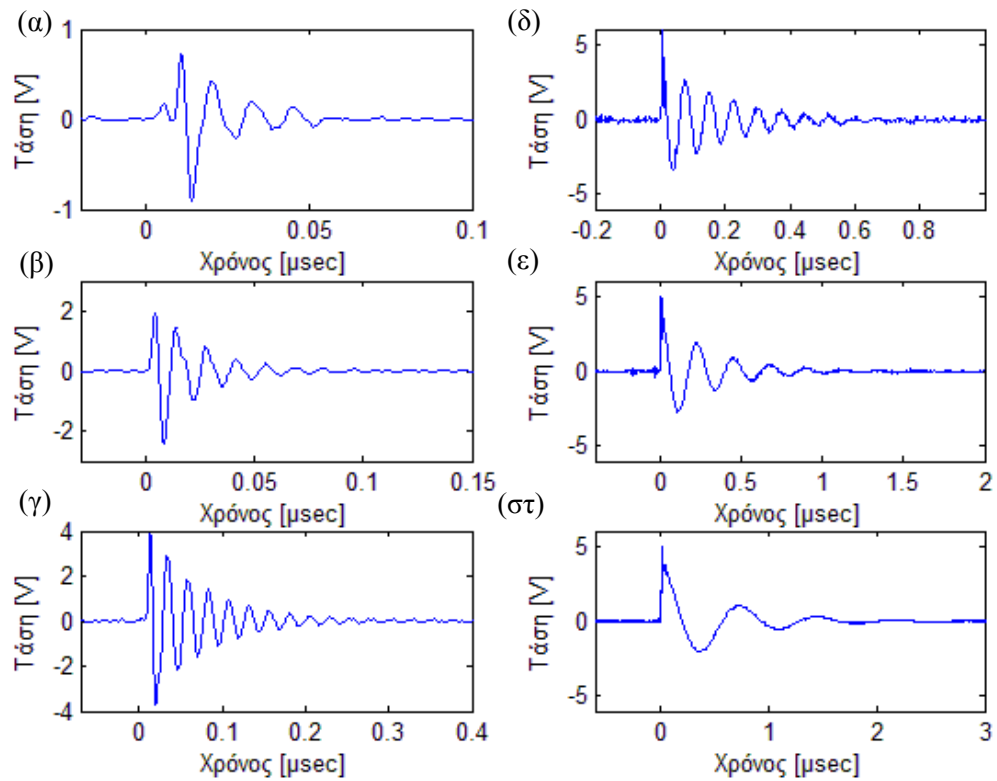
Σχ. 8.3. Κυματομορφές κεραίας ακτίνας 1.2cm και διατομής 0.5mm για χωρητικότητες πυκνωτή (α)1pF, (β)10pF, (γ)100pF, (δ)1nF, (ε)10nF και (σ)100nF



Σχ. 8.4. Κυματομορφές κεραίας ακτίνας 1.2cm και διατομής 0.75mm για χωρητικότητες πυκνωτή (α)1pF, (β)10pF, (γ)100pF, (δ)1nF, (ε)10nF και (σ)100nF



Σχ. 8.5. Κυματομορφές κεραίας ακτίνας 2cm και διατομής 0.5mm για χωρητικότητες πυκνωτή (α)1pF, (β)10pF, (γ)100pF, (δ)1nF, (ε)10nF και (στ)100nF



Σχ. 8.6. Κυματομορφές κεραίας ακτίνας 2cm και διατομής 0.75mm για χωρητικότητες πυκνωτή (α)1pF, (β)10pF, (γ)100pF, (δ)1nF, (ε)10nF και (στ)100nF

8.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

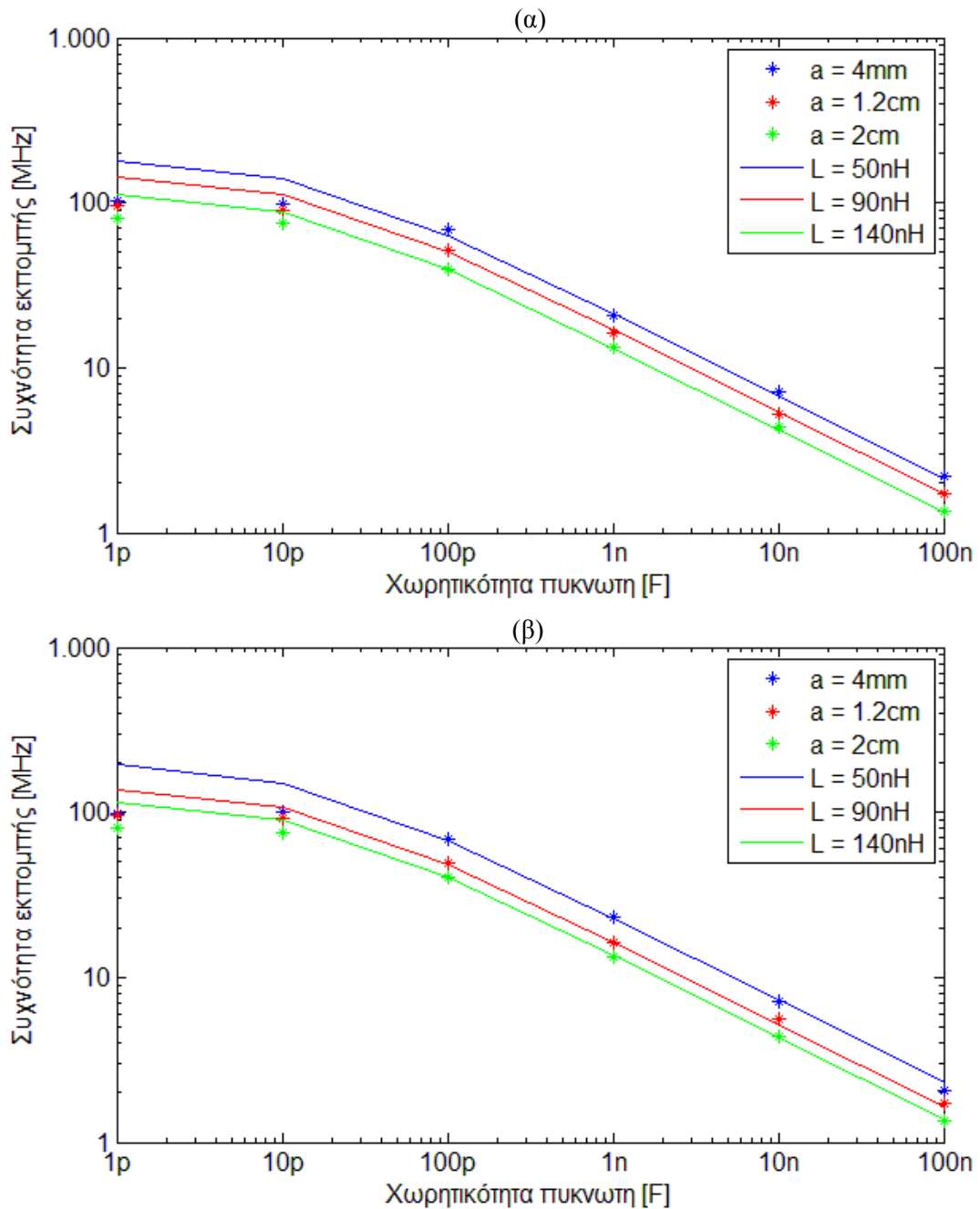
Στις παραγράφους που ακολουθούν εξετάζονται οι αποκλίσεις των πειραματικών αποτελεσμάτων από τα αποτελέσματα προσομοίωσης του θεωρητικού μοντέλου της πλατφόρμας επικοινωνίας. Για την κατά το δυνατό πιο αξιόπιστη σύγκριση θα χρησιμοποιηθούν χαρακτηριστικά μεγέθη του εκπεμπόμενου σήματος όπως είναι η συχνότητα f και ο συντελεστής ποιότητας Q .

8.2.1 Συχνότητα εκπομπής f

Η συχνότητα ταλάντωσης ενός RLC κυκλώματος αποτελεί έναν από του σημαντικότερους παράγοντες για την αξιολόγηση της λειτουργίας του. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 5.2.1, η συχνότητα προκύπτει ως συνάρτηση της χωρητικότητας του πυκνωτή και της αυτεπαγωγής του πηνίου (βλ. (5.1)), στην συγκεκριμένη περίπτωση της κεραίας βρόχου. Συγκρίνοντας επομένως τις πειραματικές μετρήσεις με τις θεωρητικές τιμές είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι αποκλίσεις του συστήματος εκπομπής, που αφορούν τις μεταβλητές που αναφέρθηκαν προηγουμένως, δηλαδή f και Q . Επιπρόσθετα, αν θεωρηθεί ότι οι αποκλίσεις στους τυποποιημένους πυκνωτές που χρησιμοποιήθηκαν είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις αναγραφόμενες τιμές, είναι δυνατό να υπολογιστούν σε κάποια κλίμακα οι αποκλίσεις των κεραίων που χρησιμοποιήθηκαν.

Αρχικά υπολογίστηκε η συχνότητα εκπομπής του κάθε συνδυασμού κεραίας – πυκνωτή από τις κυματομορφές που λήφθηκαν κατά την εκτέλεση των πειραμάτων και παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Για τον σκοπό αυτό γράφτηκε η συνάρτηση F_fft στο εργαλείο MATLAB της Mathworks (βλ. Παράρτημα Α), που υπολογίζει την συχνότητα μιας κυματομορφής μέσω του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform). Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι για να ληφθούν ακριβή αποτελέσματα για την συχνότητα ενός σήματος πρέπει η δειγματοληψία να γίνεται τουλάχιστον με διπλάσια συχνότητα από αυτή του σήματος [12]. Επομένως γνωρίζοντας ότι η συχνότητα δειγματοληψίας στον παλμογράφο δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 200MHz, οι συχνότητες εκπομπής, που είναι μεγαλύτερες των 100MHz ενδέχεται να μην υπολογίστηκαν σωστά.

Βάσει των συχνοτήτων, που υπολογίστηκαν, είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η αυτεπαγωγή που παρουσιάζει κάθε κεραία. Ο υπολογισμός έγινε επιλέγοντας από την προσομοίωση μία καμπύλη, η οποία να συμπίπτει σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό (καλύτερα) με τα σημεία που προέκυψαν από τις μετρήσεις. Όπως φαίνεται από τα Σχ. 8.1 έως Σχ. 8.6, τα αποτελέσματα για συχνότητες μικρότερες των 100MHz ταιριάζουν σχεδόν απόλυτα με τις θεωρητικές καμπύλες και επομένως το σύστημα εκπομπής λειτουργεί αποτελεσματικά, όπως αναμενόταν, στο επίπεδο της συχνότητας.



Σχ. 8.7. Προσεγγιστικός υπολογισμός αυτεπαγωγής κάθε κεραίας ακτίνας διατομής (α) 0.5 και (β) 0.7mm, με απόκλιση 10nH.

Στον πίνακα 8.1 παρατίθενται οι θεωρητικές και οι πειραματικές τιμές της αυτεπαγωγής L για κάθε πλατφόρμα επικοινωνίας που μελετήθηκε. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι διαφορές που παρουσιάζονται στις αυτεπαγωγές των κεραιών, μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών υπολογισμών, είναι αναμενόμενες, αφού οι κεραιές κατασκευάστηκαν με πολύ απλό τρόπο, χωρίς ακριβείς υπολογισμούς των διαστάσεων, και επομένως είναι φυσιολογικό να παρουσιάζονται κάποιες αποκλίσεις..

Ακτίνα (cm)	Διατομή (mm)	Αυτεπαγωγή (nH)	
		Θεωρητικοί υπολογισμοί	Πειραματικές μετρήσεις ($\pm 5nH$)
0.4	0.5	20.7	50
	0.75	20.4	50
1.2	0.5	79.1	90
	0.75	78.8	90
2	0.5	144.8	140
	0.75	144.3	140

Πίνακας 8.1 θεωρητικές και οι πειραματικές τιμές της αυτεπαγωγής (L) κάθε πλατφόρμας επικοινωνίας

8.2.2 Συντελεστής ποιότητας Q

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 5.2.4, ο συντελεστής ποιότητας είναι ένα αδιάστατο μέγεθος το οποίο δείχνει πόσες ταλαντώσεις μπορεί να εκπέμψει ο πομπός πριν εξασθενίσει πλήρως. Το μέγεθος αυτό σε ένα κύκλωμα RLC, είναι ανάλογο της συχνότητας ταλάντωσης και της αυτεπαγωγής του πηνίου, και αντιστρόφως ανάλογο της συνολικής αντίστασης. Η μελέτη ενός τέτοιου δείκτη είναι απαραίτητη για συστήματα ασύρματης μετάδοσης, αφού μπορεί να φανερώσει κατά πόσο ένα σύστημα εκπομπής έχει την δυνατότητα να εκπέμψει έναν ικανοποιητικό αριθμό ταλαντώσεων, ιδιότητα πολύ σημαντική κατά την αποστολή πληροφοριών.

Εκ πρώτης όψεως ο συντελεστής ποιότητας της πλατφόρμας επικοινωνίας φαίνεται να είναι κατά πολύ μικρότερος από αυτόν που υπολογίστηκε με βάση τους θεωρητικούς υπολογισμούς και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Παρόλα αυτά έπρεπε να υπολογιστούν οι ακριβείς τιμές του για λόγους σύγκρισης. Ο πειραματικός υπολογισμός έγινε μέσω της συνάρτησης Q που γράφηκε στο MATLAB της Mathworks (βλ. Παράρτημα Α) και βασίζεται στην παρακάτω διαδικασία:

Αρχικά θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο συντελεστής ποιότητας Q δίνεται από την σχέση (5.9), δηλαδή:

$$Q = \frac{\omega L}{R}$$

ενώ η γωνιακή ταχύτητα ω προκύπτει συναρτήσει της περιόδου f :

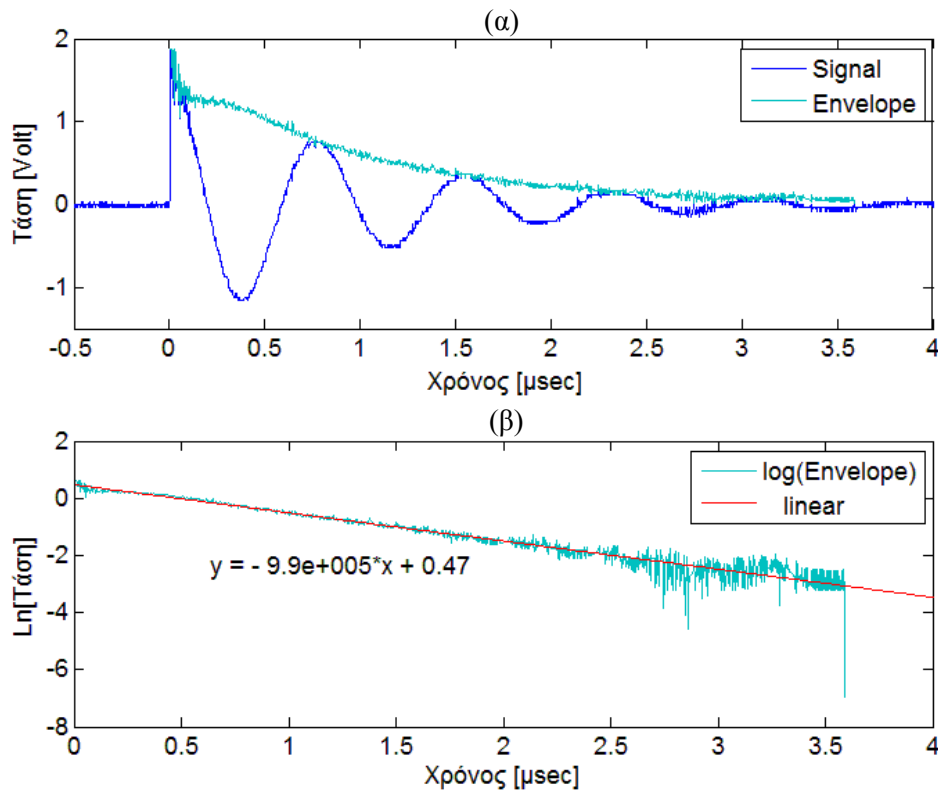
$$\omega = 2\pi f$$

Στην προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκε ότι ο υπολογισμός της συχνότητας γίνεται με την βοήθεια του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier της κυματομορφής. Αρκεί επομένως για τον υπολογισμό του Q να βρεθεί ο λόγος L/R . Ο λόγος αυτός μπορεί να προκύψει από την εξίσωση (5.13) της περιβάλλουσας του σήματος, δηλαδή:

$$A(t) = A_0 e^{-\frac{R}{2L}t}$$

Για τον υπολογισμό της περιβάλλουσας χρησιμοποιήθηκαν οι απόλυτες τιμές του μετασχηματισμού Hilbert της κυματομορφής (βλ. Σχ. 8.2.(α)). Στην συνέχεια λαμβάνοντας τον φυσικό λογάριθμο του πλάτους της περιβάλλουσας, προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση:

$$\ln[A(t)] = c_1 - \frac{R}{2L} t \quad (8.1)$$



Σχ. 8.9. Γραφική παράσταση περιβάλλουσας (α) και έρεση του λόγου $-R/2L$ (β) για κεραία ακτίνας βρόχου 2cm, ακτίνας διατομής 0,5mm και πυκνωτή 100nF.

Μέσω της συνάρτησης *polyfit* είναι δυνατόν να υπολογιστεί η εξίσωση της ευθείας που συμπίπτει όσο το δυνατόν περισσότερο με τον φυσικό λογάριθμο της περιβάλλουσας (βλ. Σχ. 8.9.(β)). Η κλίση της ευθείας αυτής ισούται με τον λόγο $-R/2L$, οπότε χρησιμοποιώντας την (5.8) προκύπτει ο συντελεστής ποιότητας Q της πλατφόρμας

επικοινωνίας για διάφορες τιμές ακτίνας βρόγχου της κεραίας, ακτίνας διατομής του αγωγού και χωρητικότητας του πυκνωτή.

Ακτίνα (cm)	Διατομή (mm)	Χωρητικότητα (F)			Q		
2	0.5	1p	10p	100p	5.13	5.68	8.02
		1n	10n	100n	10.2	4.47	2.27
	0.75	1p	10p	100p	4	6.19	9.24
		1n	10n	100n	8.65	4.51	2.46
1.2	0.5	1p	10p	100p	5.76	5.46	8.20
		1n	10n	100n	9.22	5.20	2.1
	0.75	1p	10p	100p	4.41	6.88	14.9
		1n	10n	100n	12	4.3	2.46
0.4	0.5	1p	10p	100p	3.36	3.03	8.11
		1n	10n	100n	9.13	5.38	3.06
	0.75	1p	10p	100p	3.19	2.77	6.85
		1n	10n	100n	5.2	3.09	1.69

Πίνακας 8.2. Συντελεστής ποιότητας που υπολογίστηκε από τις πειραματικές μετρήσεις.

Συγκρίνοντας τις τιμές του πίνακα 8.2 με τις θεωρητικές τιμές που προκύπτουν από την ενότητα 5.2.4 συμπεραίνεται ότι το Q είναι πολύ μικρότερο κυρίως για την περιοχή των μικρών χωρητικοτήτων. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε δύο κύρια αίτια:

A) Το πρώτο αφορά τον μη ακριβή υπολογισμό των συχνοτήτων άνω των 100MHz. Όπως φαίνεται στο Σχ. 8.2, οι συχνότητες που αφορούν μικρές χωρητικότητες πυκνωτών της τάξης των 1pF και 10pF είναι κατά πολύ μικρότερες από τις αναμενόμενες. Κάτι τέτοιο έχει σαν αποτέλεσμα τον υπολογισμό μικρότερης γωνιακής ταχύτητας ω και επομένως μικρότερου συντελεστή ποιότητας Q .

B) Το δεύτερο σχετίζεται με τη χρήση του διακόπτη *push-button* κατά την αποφόρτιση του πυκνωτή. Όταν ένας διακόπτης πιέζεται, πρακτικά το «κλείσιμο» του δεν είναι ακαριαίο όπως σε έναν ιδανικό διακόπτη, αλλά έχει κάποια μικρή χρονική διάρκεια. Όταν το μικρό χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από το μερικό μέχρι το πλήρες βραχυκύκλωμα του διακόπτη είναι συγκρίσιμο με την περίοδο του σήματος, επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την συνολική αντίσταση του κυκλώματος, η οποία με την σειρά της επηρεάζει τον συντελεστή ποιότητας

Q. Οι μικρές χωρητικότητες παρουσιάζουν μικρές περιόδους και μικρούς χρόνους αποφόρτισης. Επομένως το φαινόμενο παρουσιάζεται πιο έντονα σε αυτές τις περιπτώσεις.

9

Μέτρηση Φορτίου στον Δέκτη

Στο κεφάλαιο αυτό συζητείται το επόμενο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας, που αφορά την δυνατότητα λήψης του εκπεμπόμενου σήματος. Η αξιολόγηση της λήψης εξετάζει κατά πόσο είναι δυνατό να ληφθεί το σήμα που εκπέμπεται από την πλατφόρμα επικοινωνίας και σε ποιο βαθμό η απόσταση λήψης ή η τάση εκφόρτωσης επηρεάζουν την διαδικασία αυτή.

9.1 Επιλογή Παραμέτρων Μέτρησης

Κατά την πειραματική διαδικασία της λήψης του σήματος επιλέχθηκε προς μελέτη μία συγκεκριμένη πλατφόρμα επικοινωνίας. Ο λόγος για τον οποίο δεν δοκιμάστηκε κάθε δυνατή πλατφόρμα που θα μπορούσε να κατασκευαστεί, όπως ήδη έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι ότι κάτι τέτοιο θα ήταν εξαιρετικά χρονοβόρο και ασύμφορο. Σκοπός των πειραμάτων αξιολόγησης της λήψης του σήματος είναι να ερευνηθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν την διάδοση και λήψη του σήματος και όχι την εκπομπή του. Παρακάτω αναφέρονται οι επιλογές της κεραίας, του πυκνωτή και της τάσης εκφόρτισης.

9.1.1 Κεραία Λήψης

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κεραίας έχουν άμεση σχέση με την αντίσταση ακτινοβολίας και κατά συνέπεια με την εκπεμπόμενη ισχύ. Στην πλατφόρμα επικοινωνίας που χρησιμοποιήθηκε, η κεραία εκπομπής επιλέχθηκε να είναι ακτίνας βρόχου 2cm και ακτίνας διατομής 0.5mm. Η επιλογή έγινε με κριτήριο την όσο το δυνατό μεγαλύτερη

αντίσταση ακτινοβολίας, αφού αυτό διασφαλίζει την μεγαλύτερη εκπεμπόμενη ισχύ σήματος. Επομένως το μέγεθος της κεραίας θα πρέπει να είναι το μεγαλύτερο δυνατό (βλ. κεφ.5.2.3).

9.1.2 Πυκνωτής Κυκλώματος Λήψης

Η χωρητικότητα του πυκνωτή, που επιλέχθηκε, ήταν 100nF. Αυτό γίνεται κυρίως για πρακτικούς λόγους, αφού αν και δεν παρουσιάζει πολύ υψηλό Q (κεφ.8.2.2), λόγω της συχνότητας συντονισμού του, δεν δέχεται παρεμβολές από άλλα σήματα που εκπέμπονται στον χώρο του εργαστηρίου. Ένας ακόμη λόγος, για τον οποίο επιλέχθηκε ο μεγαλύτερος από τους έξι πυκνωτές, ήταν ότι επηρεάζεται πολύ λιγότερο από την αύξηση τις συνολικής αντίστασης εξ αιτίας του *push-button* διακόπτη, που συνδέεται σε σειρά (διαδικασία εκφόρτισης).

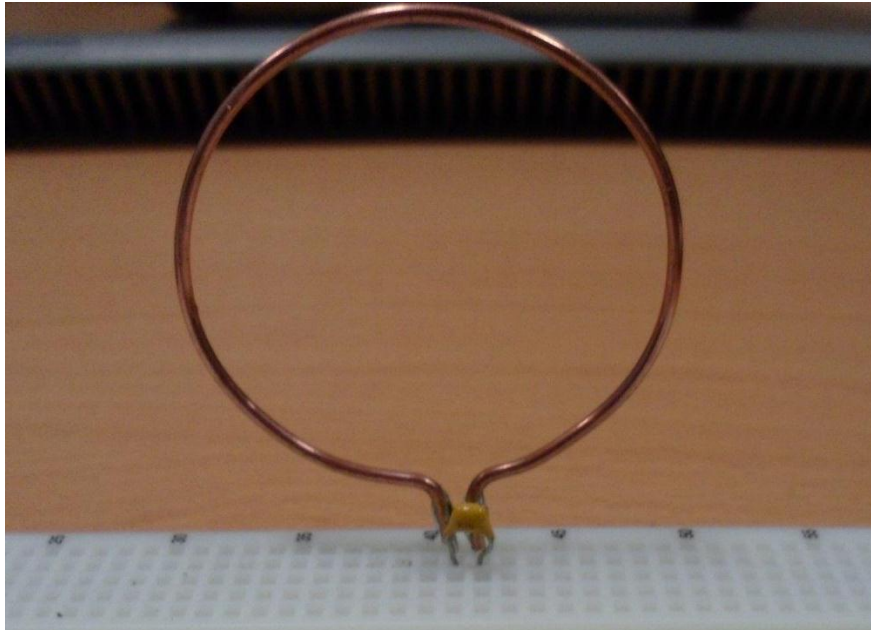
9.1.3 Τάση Εκφόρτισης

Εν αντιθέσει με τα πειράματα εκπομπής, όπου επιλέχθηκε μία μόνο τάση, 5V, στην εκτέλεση των πειραμάτων λήψης χρησιμοποιήθηκαν τάσεις εκφόρτισης 4, 6, 8 και 10V. Η αιτία, που δεν διατηρήθηκε σταθερή η τάση της πηγής, ήταν ότι παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον να παρατηρηθεί μέχρι πια απόσταση είναι δυνατόν να μεταδοθεί το σήμα για κάθε τάση από το να τεθούν όρια στην πλατφόρμα επικοινωνίας χρησιμοποιώντας μία μόνο τάση. Έτσι μπορεί να μελετηθεί η σχέση μεταξύ τάσης της πηγής και της μέγιστης δυνατής απόστασης διάδοσης του σήματος.

9.2 Κατασκευή Δέκτη

Ως κεραία λήψης επιλέχθηκε μία κεραία, που είχε τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με αυτή του πομπού. Αρχικά στα άκρα της μετρήθηκε απευθείας το φορτίο. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δεν ήταν καθόλου ικανοποιητικά, αφού η κυματομορφή στον δέκτη ήταν εμφανής μόνο από πολύ μικρές αποστάσεις.

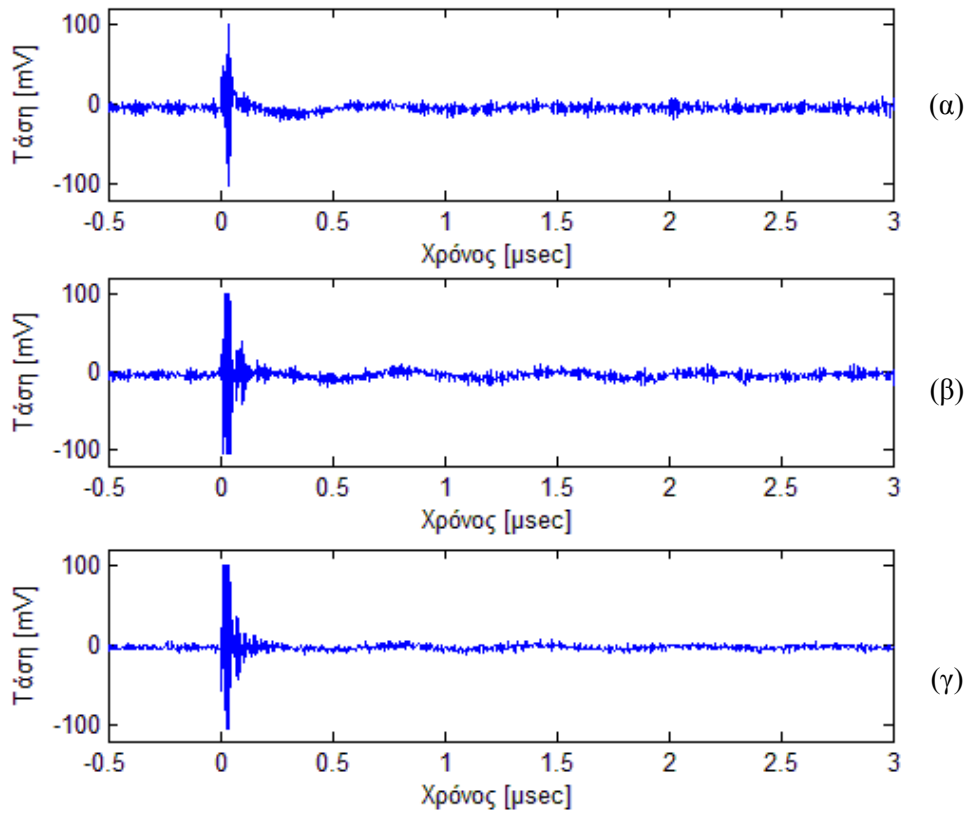
Με σκοπό την βελτίωση της απόδοσης του δέκτη, προστέθηκε παράλληλα στα άκρα της κεραίας ένας πυκνωτής ίσης χωρητικότητας με αυτόν του πομπού (βλ. Σχ. 9.1). Με τον τρόπο αυτό κατασκευάστηκε ένας ταλαντωτής ίδιας ιδιοσυχνότητας με αυτή του εκπεμπόμενου σήματος κάτι που τον έκανε πιο ευαίσθητο σε μεταβολές του σήματος εκπομπής λόγω του συντονισμού.



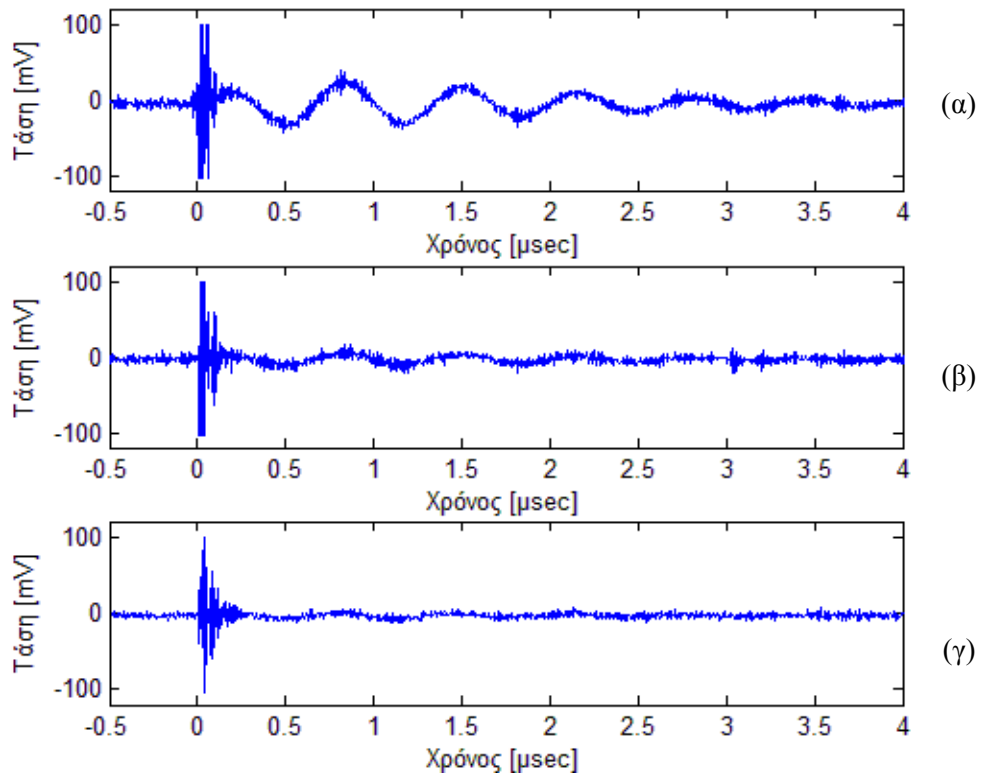
Σχ.9.1. Ο δέκτης που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία λήψης.

9.3 Παρουσίαση Κυματομορφών

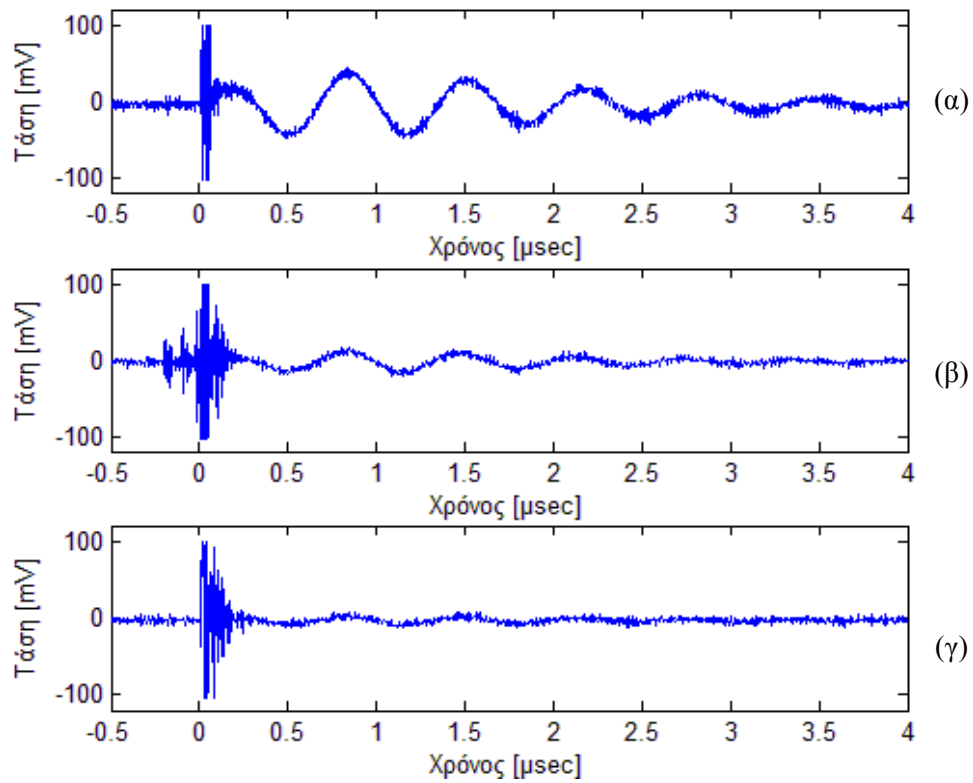
Στις επόμενες σελίδες παρατίθενται οι κυματομορφές που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία λήψης του σήματος. Αφορούν τις αποστάσεις των 10, 15 και 20cm από την κεραία εκπομπής για κάθε τάση εκφόρτωσης των 4, 6, 8 και 10V. Λαμβάνοντας όλους τους συνδυασμούς των παραπάνω αποστάσεων και τάσεων μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα που αναφέρονται στην σχέση μεταξύ της μέγιστης δυνατής απόστασης λήψης και της τάσης εκφόρτισης του πυκνωτή.



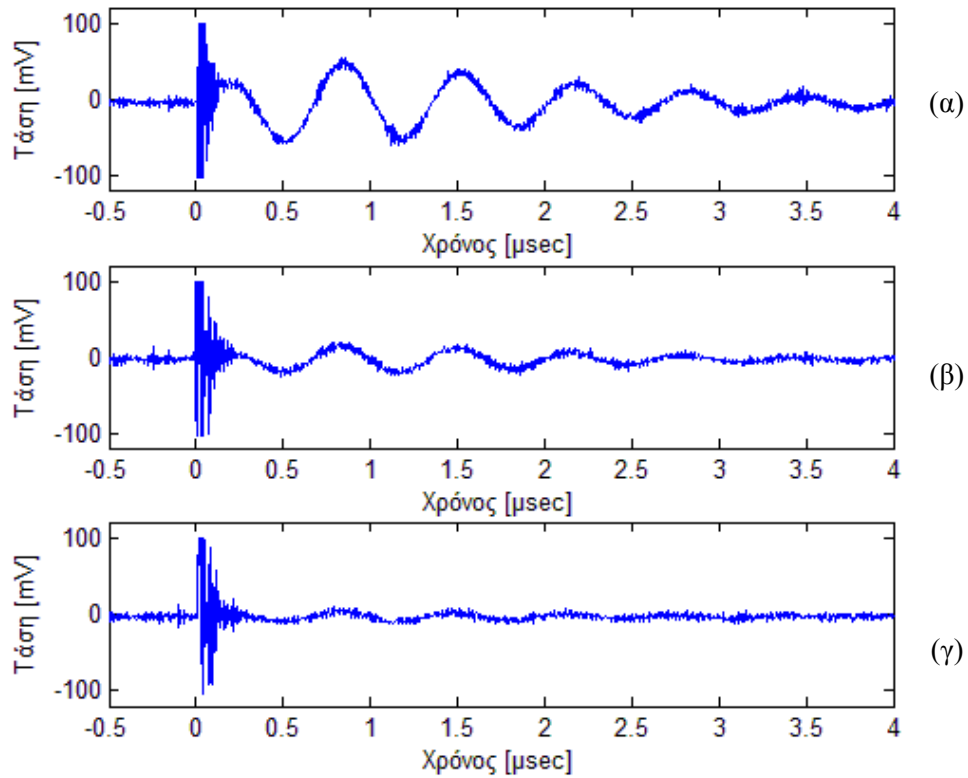
Σχ. 9.2. Κυματομορφή στον δέκτη για τάση εκφόρτισης 4V σε απόσταση (α) 10, (β) 15 και (γ) 20cm



Σχ.9.3. Κυματομορφή στον δέκτη για τάση εκφόρτισης 6V σε απόσταση (α) 10, (β) 15 και (γ) 20cm



Σχ. 9.4. Κυματομορφή στον δέκτη για τάση εκφόρτισης 8V σε απόσταση (α) 10, (β) 15 και (γ) 20cm



Σχ. 9.5. Κυματομορφή στον δέκτη για τάση εκφόρτισης 10V σε απόσταση (α) 10, (β) 15 και (γ) 20cm

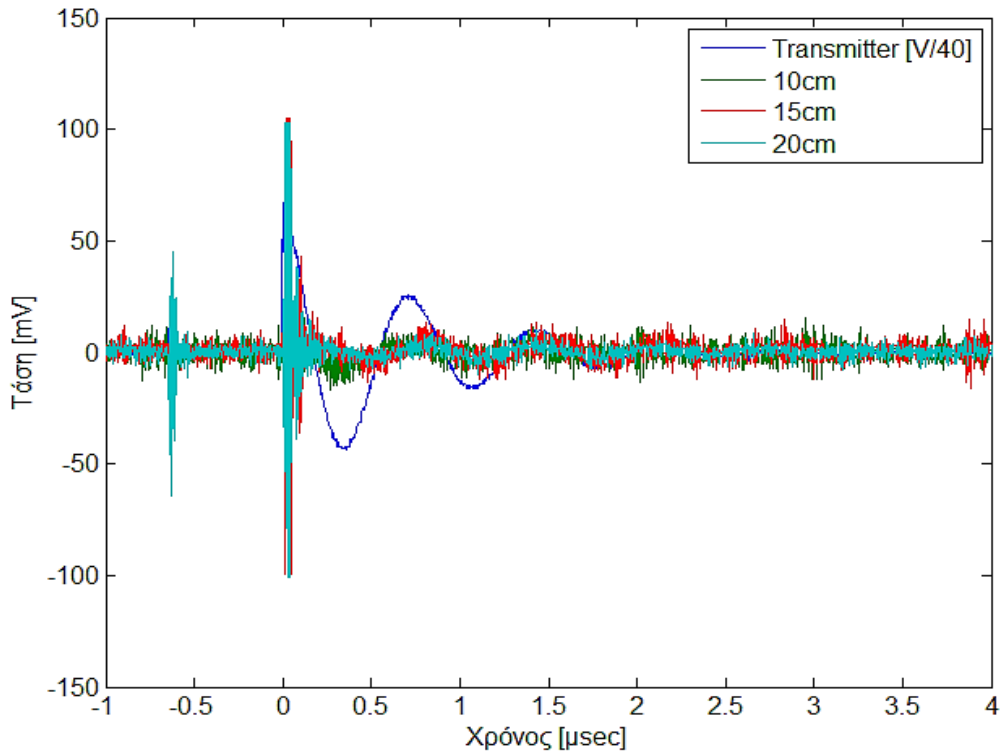
9.4 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Αρχικά στις επόμενες παραγράφους γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που λήφθηκαν στον δέκτη σε σχέση με αυτά του πομπού. Σημειώνεται ότι οι κεραίες που χρησιμοποιήθηκαν για την αποστολή και τη λήψη του σήματος ήταν απλές κυκλικές κεραίες, ενός βρόχου με ακτίνα 2cm και ακτίνα διατομής 0.5mm ενώ ο πυκνωτής που συνδέθηκε παράλληλα με την κεραία ήταν χωρητικότητας 100nF. Η συχνότητα του σήματος που διαπιστώθηκε από πειραματικές μετρήσεις (βλ. κεφ. 8) ήταν 1.34 MHz . Στην συνέχεια γίνεται η αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος του δέκτη, ώστε να φανεί κατά πόσο μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική (επιτυχής) η λήψη του σήματος.

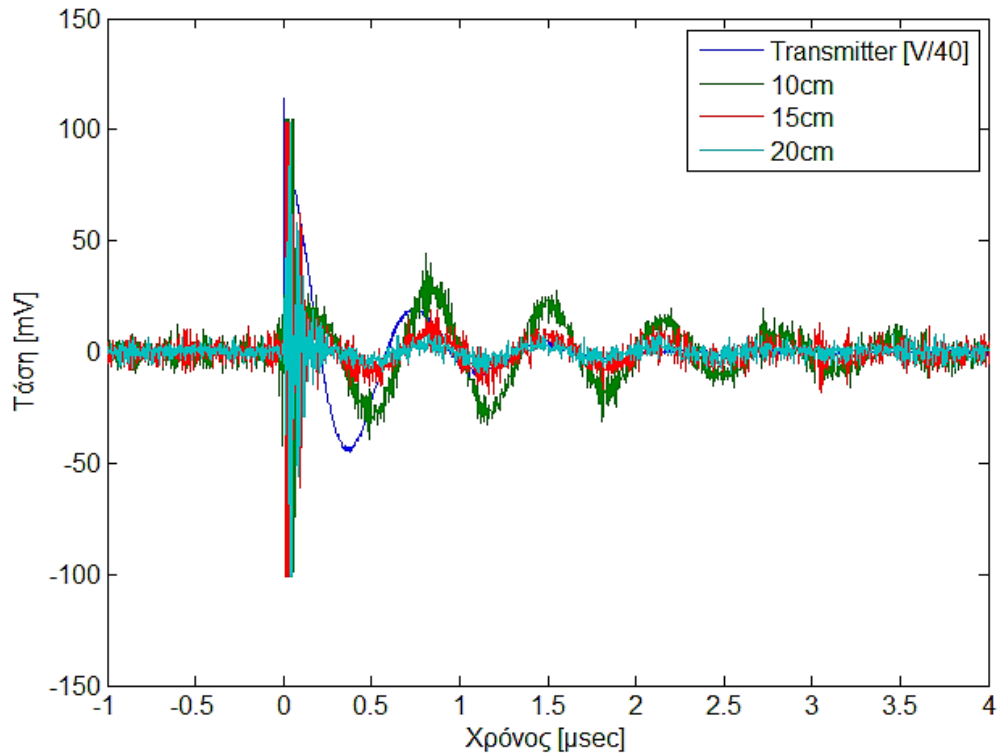
9.4.1 Μελέτη κυματομορφών

Σκοπός της σύγκρισης του σήματος λήψης με αυτό του εκπομπού γίνεται για να ελεγχθεί η ομοιότητα των σημάτων ως προς την συχνότητα f και τον συντελεστή ποιότητας Q . Αυτό είναι ένα σημαντικό κριτήριο της απόδοσης του συνολικού συστήματος εκπομπής-λήψης.

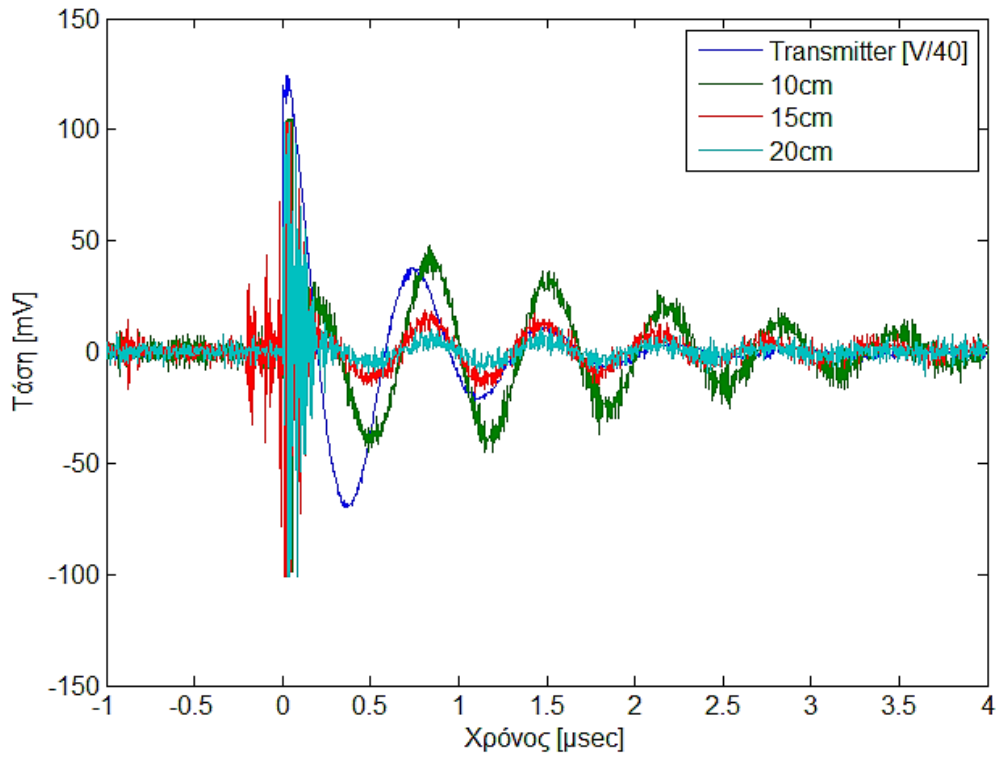
Για τον σκοπό αυτό παρατέθηκαν όλες οι κυματομορφές κάθε τάσης στην κεραία λήψης, που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα (βλ. Σχ. 9.2 – Σχ. 9.5), σε ένα διάγραμμα μαζί με τις αντίστοιχες την κεραία του εκπομπού (βλ. Σχ. 8.1 – Σχ. 8.6). Έτσι μπορεί να γίνει ορθότερα μία σύγκριση μεταξύ του σήματος στον πομπό και στον δέκτη. Ας σημειωθεί ότι για την καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων, η τάση του σήματος στον πομπό στα γραφήματα εμφανίζεται μικρότερη κατά 40 φορές αφού είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτή στον δέκτη και αλλιώς δεν θα ήταν ευδιάκριτη η παράλληλη παρουσίαση και σύγκριση τους.



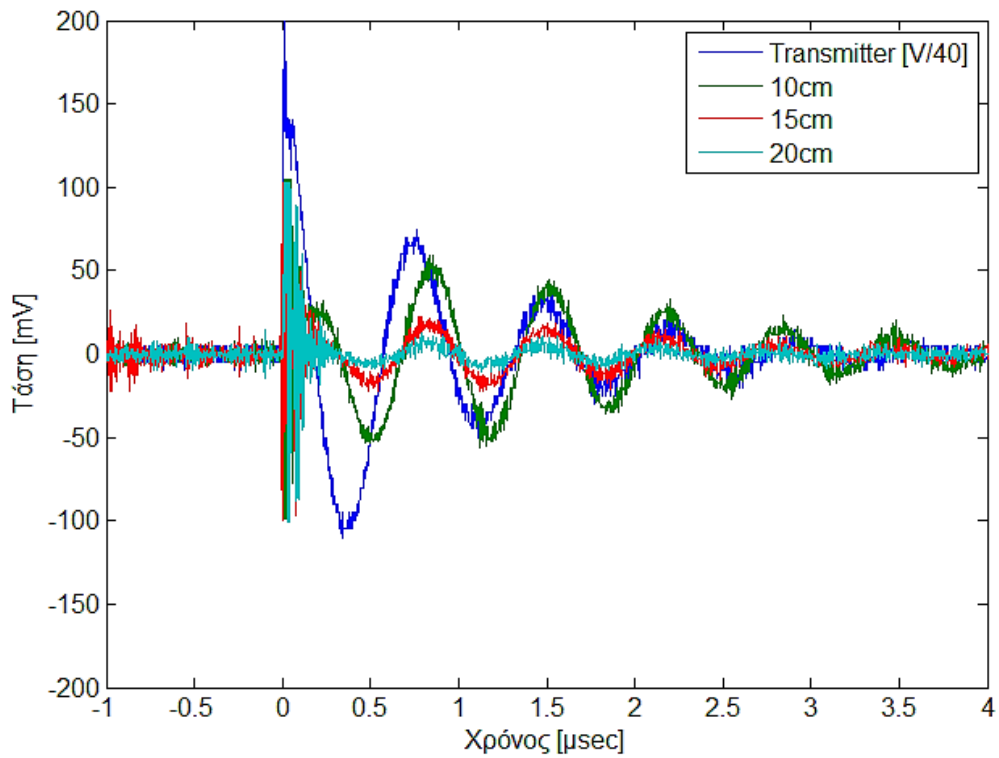
Σχ. 9.6. Κυματομορφές του σήματος στον πομπό και δέκτη για τάση εκφόρτισης 4V σε απόσταση 10, 15 και 20cm



Σχ. 9.7. Κυματομορφές του σήματος στον πομπό και στον δέκτη για τάση εκφόρτισης 6V σε απόσταση 10, 15 και 20cm



Σχ. 9.8. Κυματομορφές του σήματος στον πομπό και στον δέκτη για τάση εκφόρτισης 8V σε απόσταση 10, 15 και 20cm



Σχ. 9.9. Κυματομορφές του σήματος στον πομπό και στον δέκτη για τάση εκφόρτισης 10V σε απόσταση 10, 15 και 20cm

Συγκρίνοντας τις κυματομορφές των σημάτων στα Σχ. 9.6 – Σχ. 9.9, προκύπτει ότι υπάρχει μια μικρή χρονική καθυστέρηση στον δέκτη της τάξης των 0.25μsec. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην καθυστέρηση φάσης του λαμβανόμενου σήματος που προκαλεί ο πυκνωτής συντονισμού της κεραίας και σε ένα πολύ μικρότερο βαθμό στον χρόνο διάδοσης του σήματος (της τάξης των 0.5ns). Η προσθήκη του πυκνωτή σε συνδυασμό με την κεραία λήψης κάνει το συνολικό κύκλωμα να συμπεριφέρεται σαν ένα ζωνοδιαβατό φίλτρο (Band Pass Filter - BPF), εισάγοντας παράλληλα καθυστέρηση φάσης που εξαρτάται από την χωρητικότητα του. Έτσι υπάρχει μια σχετικά μικρή χρονική καθυστέρηση της απόκρισης του συνολικού συστήματος μέτρησης. Αν, για λόγους απλότητας, θεωρηθεί ότι αυτός ο χρόνος αφαιρείται από την κυματομορφή του δέκτη (χρονική προήγηση), τότε είναι φανερό ότι οι συχνότητες του σήματος στον πομπό και στον δέκτη συμπίπτουν.

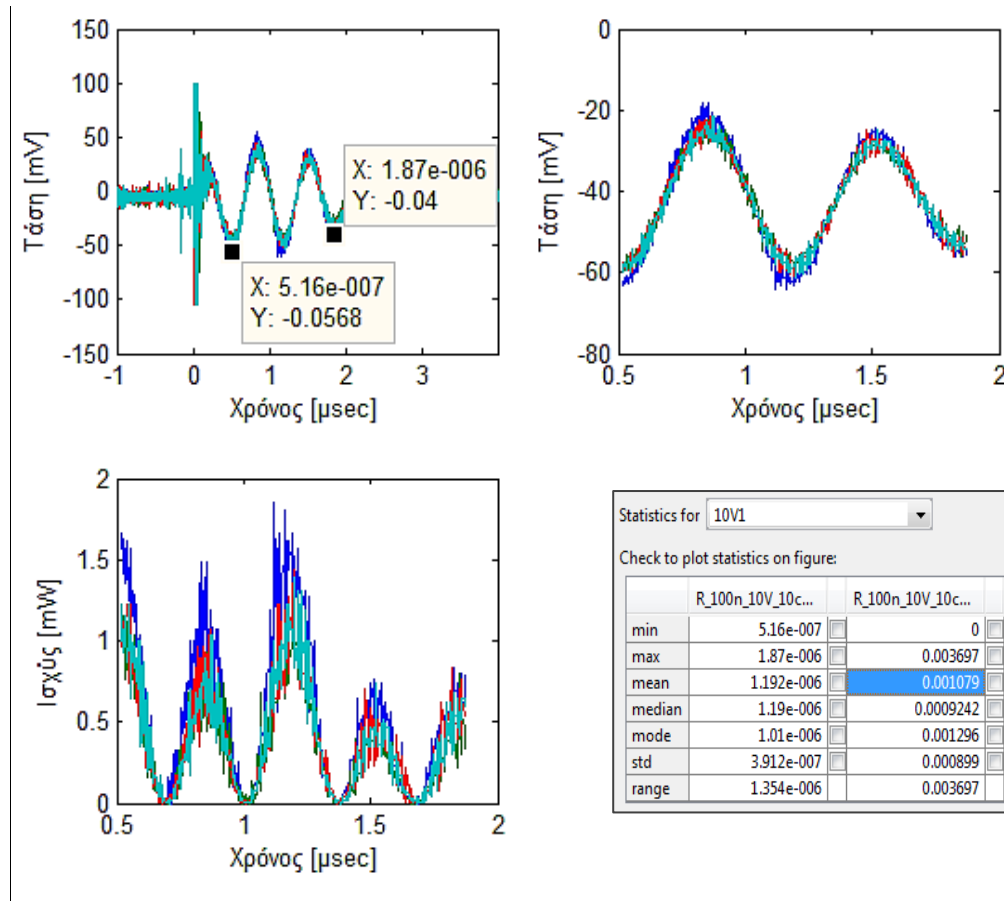
Εξετάζοντας τον συντελεστή ποιότητας Q στον δέκτη, παρατηρήθηκε να είναι αρκετά υψηλότερος από αυτόν του πομπού. Αυτό οφείλεται στην παράλληλη σύνδεση του πυκνωτή με τη κεραία. Όπως προαναφέρθηκε, η προσθήκη του πυκνωτή έκανε τον δέκτη να λειτουργεί ως ταλαντωτής με αποτέλεσμα να συντονίζεται στις συχνότητες εκπομπής αποσβένοντας τις συχνότητες παρεμβολών (ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αντίθετα με το κύκλωμα του πομπού, στον δέκτη δεν χρησιμοποιούνται διακόπτες *push-button*, οι οποίοι μειώνουν σε μεγάλο βαθμό τον συντελεστή ποιότητας Q (ενότητα 8.2.2).

9.4.2 Ισχύς σήματος

Η ισχύς του σήματος στο δέκτη είναι ίσως το σημαντικότερο μέγεθος που μελετήθηκε στο πειραματικό τμήμα της διπλωματικής εργασίας. Όπως έχει αναφερθεί, η στιγμιαία ισχύς ενός σήματος υπολογίζεται με βάση το τετράγωνο της τάσης του (ενότητα 5.2.5, (5.10)). Επίσης η μέση ισχύς μίας περιόδου υπολογίζεται διαιρώντας το ολοκλήρωμα στις συνάρτησης του σήματος για την χρονική διάρκεια μιας περιόδου με την περίοδο και εκφράζεται μαθηματικά από την (5.11). Στην περίπτωση του σήματος λήψης κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατό να γίνει με ακρίβεια, αφού η εξίσωση της κυματομορφής στον δέκτη δεν είναι γνωστή και ο υπολογισμός της είναι αρκετά περίπλοκος και πιθανότατα μη εφαρμόσιμος.

Η μέθοδος υπολογισμού της ισχύος που χρησιμοποιήθηκε είναι περισσότερο υπολογιστική βασισμένη στη προσέγγιση της κυματομορφής του λαμβανόμενου σήματος μέσω της δειγματοληψίας της. Αν υπολογισθεί η μέση τιμή της ισχύος για όλη την διάρκεια της λήψης, το αποτέλεσμα θα είναι ο υπολογισμός αρκετά χαμηλής μέσης ισχύος καθώς το σήμα αποσβένεται γρήγορα. Έτσι επιλέχθηκε μία περιοχή της κυματομορφής και συγκεκριμένα η περιοχή των δύο πρώτων περιόδων, όπου το σήμα εμφανίζονται πιο ισχυρό στην κυματομορφή λήψης. Ο υπολογισμός έγινε μέσω του εργαλείου *MATLAB* της *Mathworks*,

εμφανίζοντας σε ένα γράφημα την παράσταση του τετραγώνου της τάσης του κύματος και κατόπιν επιλέγοντας την μέση τιμή της από το εργαλείο *Data Statistics*. Για μεγαλύτερη αξιοπιστία της ακολουθούμενης μεθόδου, κάθε πείραμα επαναλήφθηκε τέσσερις φορές και ως αποτέλεσμα υπολογίστηκε η μέση τιμή των αποτελεσμάτων και των τεσσάρων πειραμάτων (βλ. Σχ. 9.10).



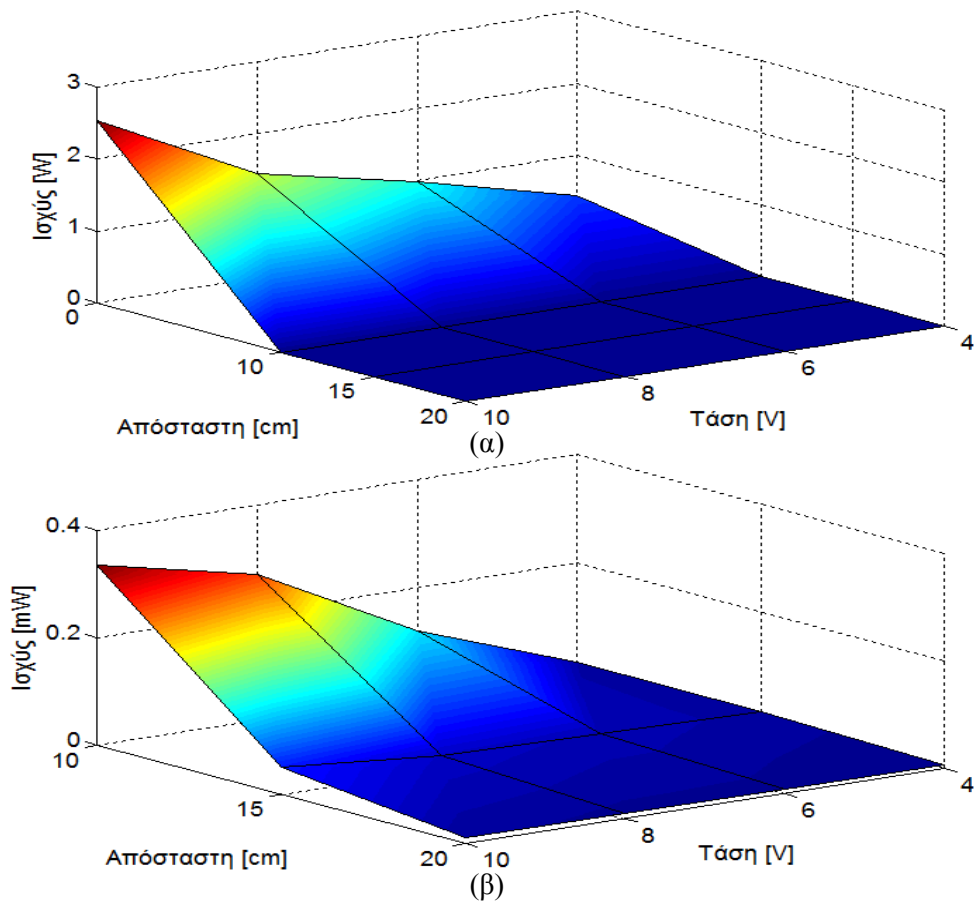
Σχ. 9.10. Διαδικασία υπολογισμού μέσης ισχύος στο δέκτη, για απόσταση 10cm και τάση 10V.

Στον πίνακα 9.1 απεικονίζονται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν σε κάθε μέτρηση ενώ στα Σχ. 9.11 και Σχ. 9.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε τρισδιάστατη γραφική μορφή και σε δισδιάστατη σε κλίμακα dB αντίστοιχα. Όπως φαίνεται από την γραφική παράσταση ο ρυθμός πτώσης της ισχύος γίνεται μεγαλύτερος όσο η τάση εκφόρτισης αυξάνεται. Η απόσβεση του εκπεμπόμενου σήματος συναρτήσει της απόστασης μπορεί να διαπιστωθεί καλύτερα στο Σχ. 9.13. όπου η εξασθένηση του σήματος παρουσιάζεται σαν ο λόγος της ακτινοβολούμενης ισχύος προς την συνολική (P_r/P_t) εκφρασμένος σε κλίμακα dB σε σχέση με την απόσταση για τις διάφορες τάσεις. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο ίδιο σχήμα η εξασθένηση του σήματος για απόσταση 20cm μειώνεται όταν και η τάση εκφόρτισης μειώνεται επίσης. Αυτό οφείλεται στην ισχύ του θορύβου που προσμετράται στην συνολική

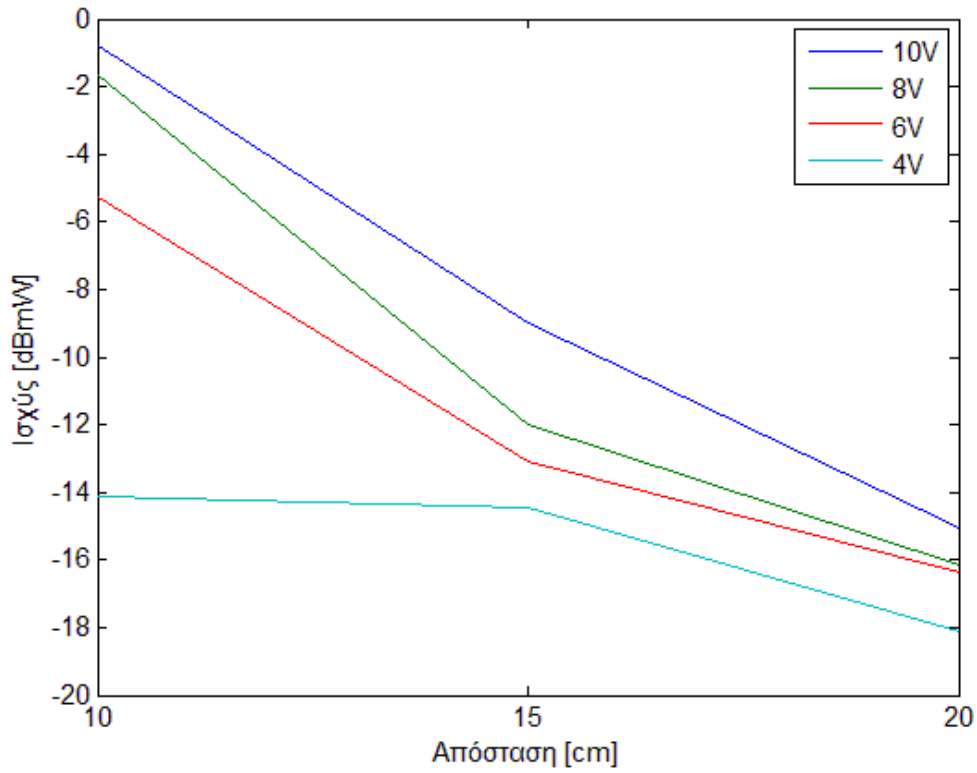
λαμβανόμενη ισχύ. Έτσι προσθέτοντας την σταθερή ισχύ του θορύβου με την ισχύ του σήματος είναι φανερό ότι σήματα μικρότερης τάσης θα επηρεαστούν περισσότερο.

		Τάση [Volt]			
		4	6	8	10
Απόσταση [cm]	0	0.43	0.98	1.44	2.53
	10	38.7μ	29.8m	68m	83.7m
	15	35.6μ	49.4μ	63.3μ	12.6m
	20	15.4μ	23.2μ	24.3μ	31.4μ

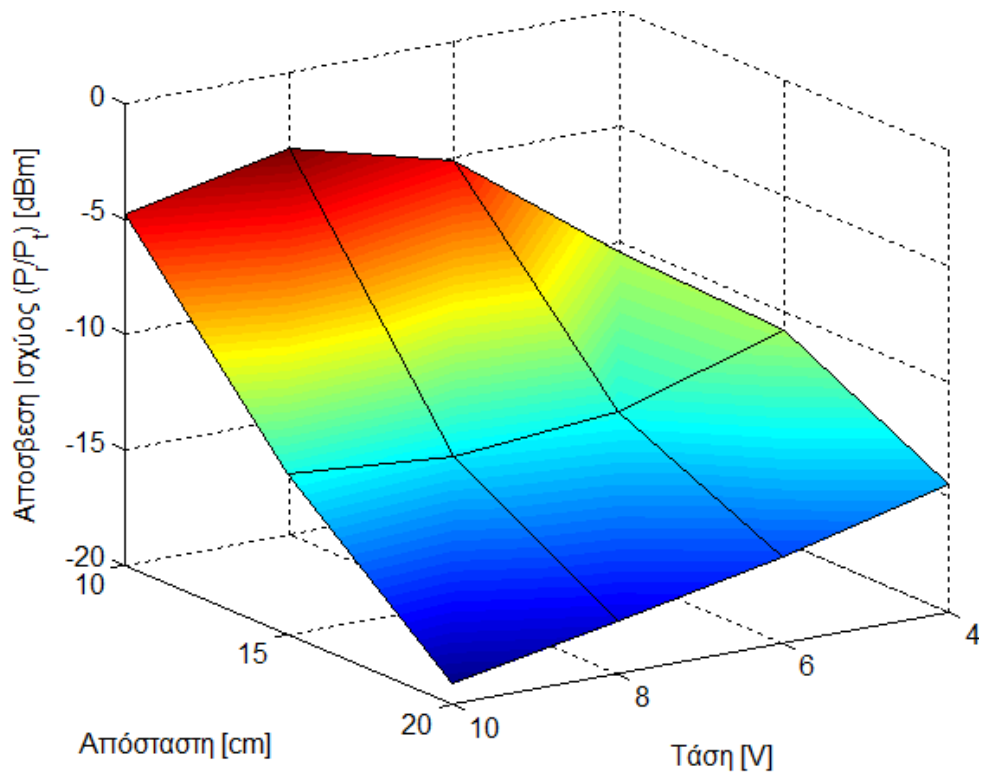
Πίνακας 9.1 Μέση ισχύς των δύο πρώτων περιόδων που παρατηρήθηκαν κατά την λήψη του σήματος στον πομπό και σε τρεις διαφορετικές αποστάσεις για τέσσερις διαφορετικές τάσεις εκφόρτισης.



Σχ.9.11. Τρισδιάστατο γράφημα ισχύος σήματος στον πομπό (0cm) και στον δέκτη για τρεις αποστάσεις και τέσσερις διαφορετικές τάσεις εκφόρτωσης (α). Ίδιο γράφημα ισχύος μόνο για τον δέκτη (β).



Σχ. 9.12. Γράφημα μέσης ισχύος στον δέκτη για τρεις αποστάσεις και τέσσερις διαφορετικές τάσεις εκφόρτισης.

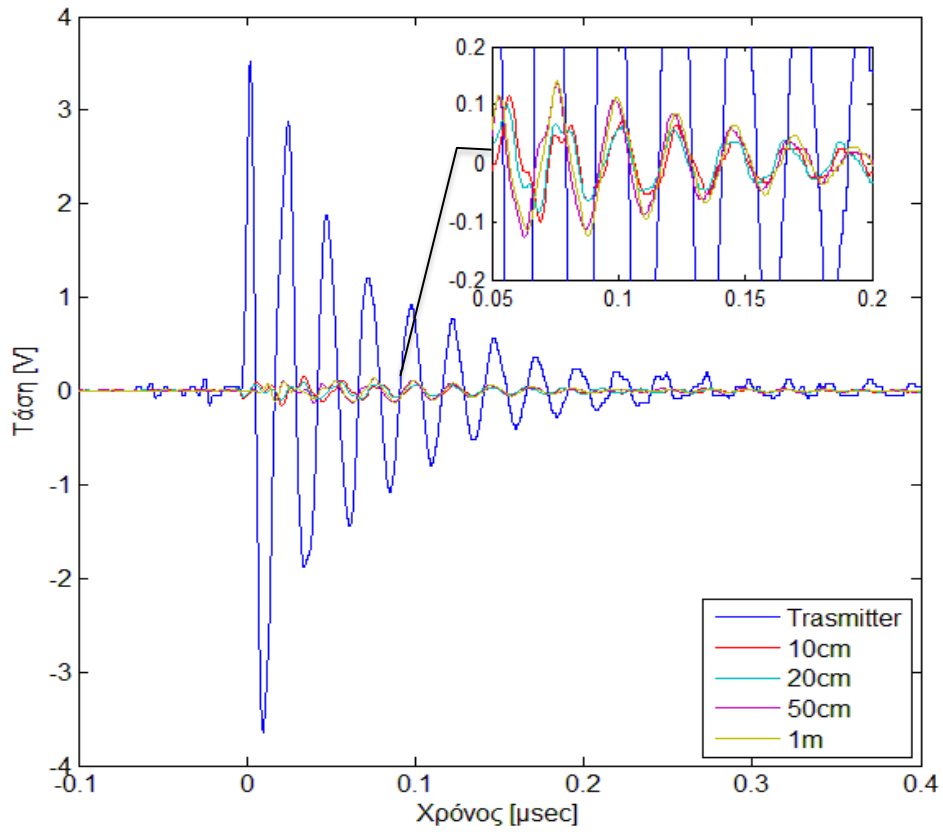


Σχ. 9.13. Τρισδιάστατο γράφημα εξασθένισης ισχύος σήματος στον δέκτη P_r/P_t για τρεις αποστάσεις και τέσσερις διαφορετικές τάσεις εκφόρτισης.

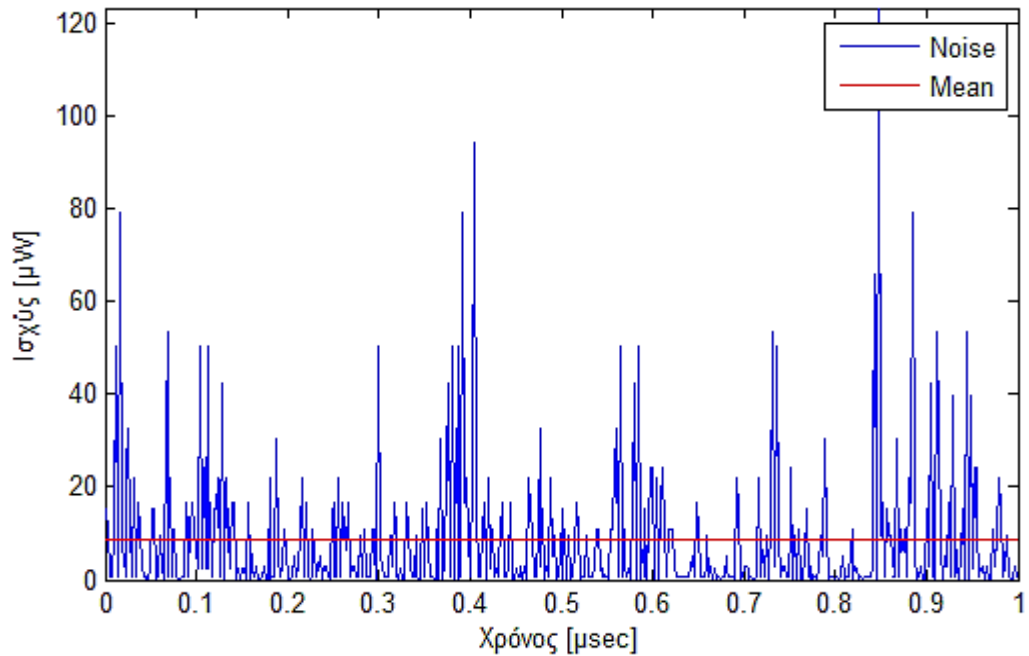
9.4.3 Ισχύς θορύβου και δυνατότητα λήψης

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας κατά την αποστολή σήματος είναι ο παρεμβαλλόμενος θόρυβος. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο θόρυβος υψηλών συχνοτήτων στο περιβάλλον του εργαστηρίου είναι αρκετά υψηλός σε σημείο που να δημιουργεί προβλήματα στις μετρήσεις του λαμβανόμενου σήματος στον δέκτη. Στο Σχ. 9.14 φαίνονται οι κυματομορφές του σήματος στον πομπό και τον δέκτη για τέσσερις διαφορετικές αποστάσεις λήψης με χρήση πυκνωτή χωρητικότητας 100pF στο κύκλωμα λήψης. Ο θόρυβος που υπεισέρχεται στην συχνότητα συντονισμού της κεραίας λήψης είναι αρκετά μεγάλος ώστε να αλλοιώνει σημαντικά το εκπεμπόμενο σήμα ακόμη και σε μικρές αποστάσεις λήψης από το σημείο εκπομπής. Η ισχύς του θορύβου μειώνεται αισθητά όταν συνδεθεί παράλληλα πυκνωτής χωρητικότητας 100nF, αφού το κύκλωμα του δέκτη δεν παρουσιάζει κάποιου είδους συντονισμό με τον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο στο περιβάλλον του εργαστηρίου, ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνει τον καλύτερο δυνατό συντονισμό με το λαμβανόμενο σήμα. Ο θόρυβος που παρατηρήθηκε κατά την λήψη σε αυτή την περίπτωση ήταν αρκετά μικρός (βλ. Σχ. 9.15), με μέση ισχύ 8.548μW ή -20.7dBm. Η ισχύς αυτή ήταν μικρότερη από όλες της τιμές που υπολογίστηκαν για το λαμβανόμενο σήμα (βλ. Πίνακας 9.1). Επομένως η λήψη σε απόσταση μέχρι 20cm μπορεί να θεωρηθεί επιτυχής αφού το σήμα μπορεί να διακριθεί από τον θόρυβο σε όλες τις περιπτώσεις. Η αύξηση της τάσης εκφόρτισης επέφερε σημαντικές διακυμάνσεις κυρίως στις κοντινότερες αποστάσεις και όχι τόσο στην απόσταση των 20cm. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, η διάκριση του σήματος έγινε κυρίως οπτικά και όχι μέσω ενός πιο ειδικευμένου συστήματος απεικόνισης που πιθανότατα θα μπορούσε να μεγεθύνει στο έπακρο αυτές τις μικρές διακυμάνσεις και να δώσει καλύτερα αποτελέσματα.

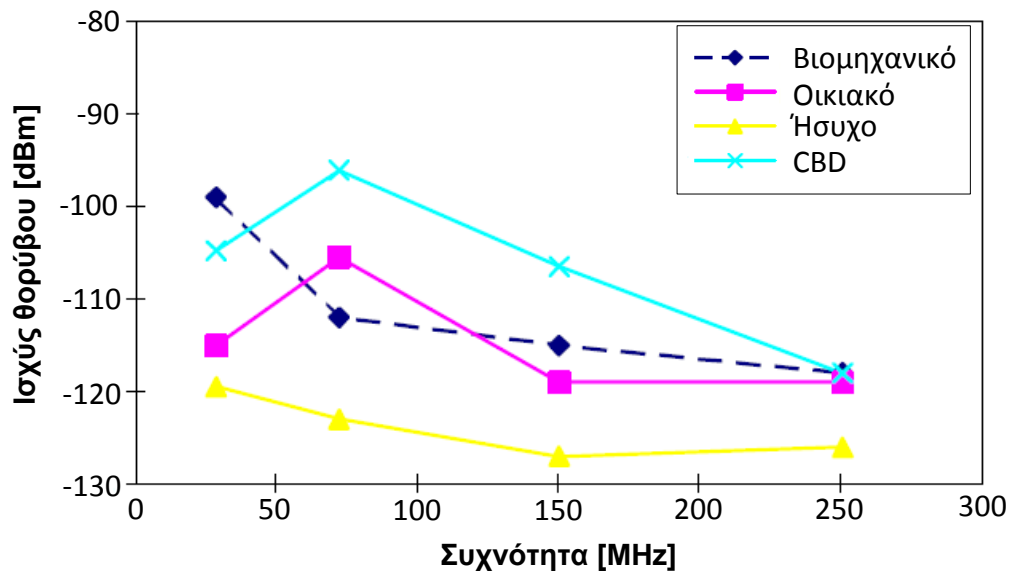
Στο Σχ. 9.16 παρατίθεται ένα τυπικό συγκριτικό γράφημα με τις μέσες ισχύεις θορύβου συναρτήσει της συχνότητας που μετρήθηκαν σε τέσσερα διαφορετικά περιβάλλοντα [13].



Σχ. 9.14. Σήμα στο εκπομπό και σε τέσσερις διαφορετικές αποστάσεις για πυκνωτή χωρητικότητας 100pF και τάση εκφόρτισης 5V



Σχ. 9.15. Διάγραμμα ισχύος θορύβου και η μέση τιμή της, που παρατηρήθηκε στον δέκτη με διάρκεια $1\mu\text{s}$.

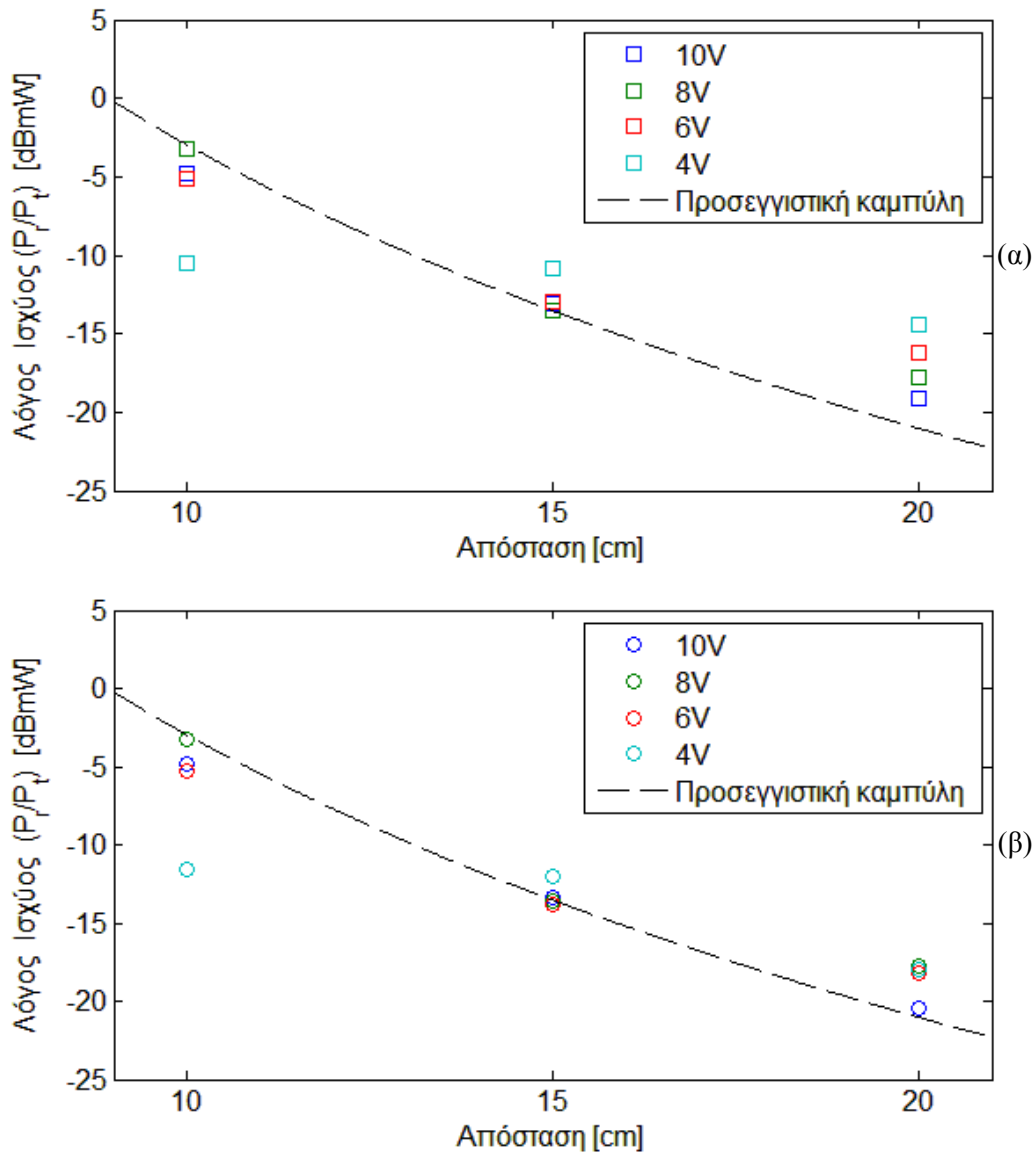


Σχ. 9.16. Μέση ισχύς θορύβου για διαφορετικά περιβάλλοντα, χρησιμοποιώντας δέκτη με εύρος ενδιάμεσης συχνότητας 10kHz και διάρκεια δειγματοληψίας 500ms.

9.4.4 Ανάκτηση της κυματομορφής του λαμβανόμενου σήματος - Φιλτράρισμα θορύβου (Signal Recovering - Noise filtering)

Έχοντας υπολογίσει την ισχύ του θορύβου μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη απεικόνιση του λαμβανόμενου σήματος, εφαρμόζοντας τεχνικές φιλτραρίσματος του θορύβου που παρεμβάλλεται. Ο σκοπός του εφαρμοζόμενου φίλτρου είναι η καλύτερη δυνατή ανακατασκευή του αρχικού σήματος μέσω της αποκοπής ανεπιθύμητων συχνοτήτων περιορίζοντας έτσι τον υπάρχοντα θόρυβο.

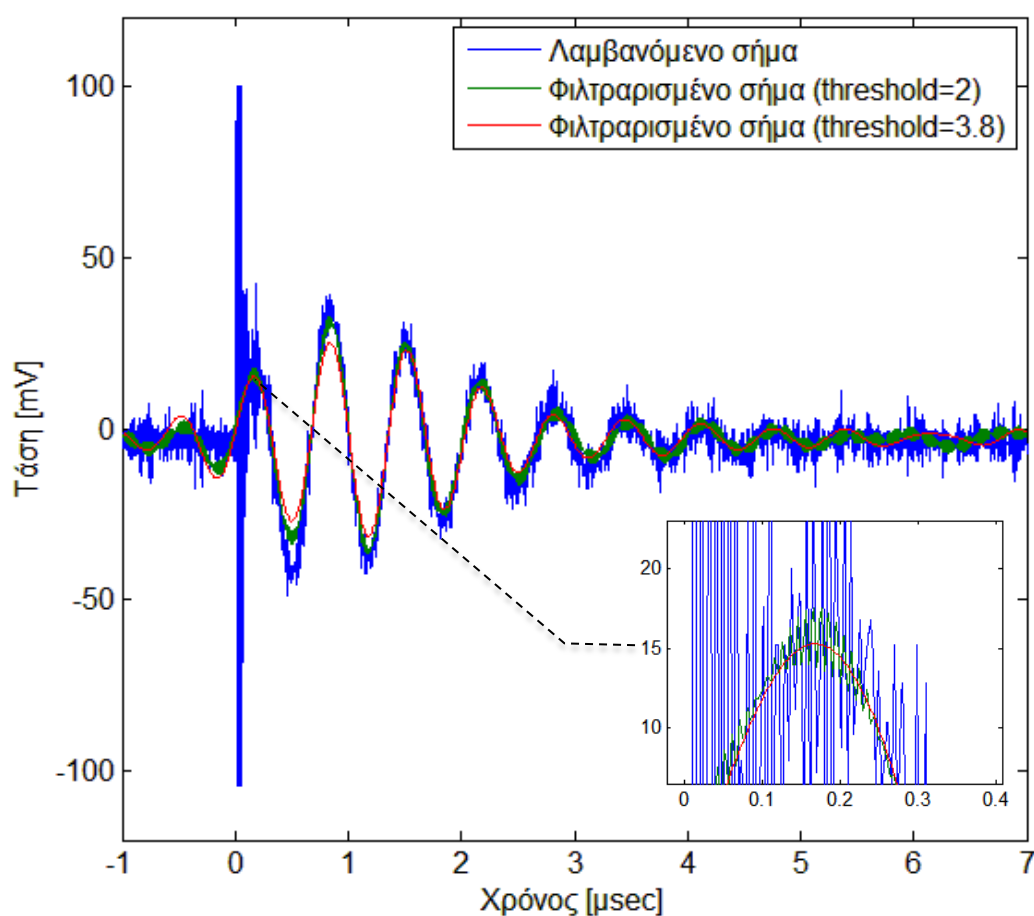
Το Σχ. 9.17. περιγράφει τον λόγο της λαμβανόμενης ισχύος προς την εκπεμπόμενη σε λογαριθμική κλίμακα (dBmW). Αρχικά, ο λόγος αυτός απεικονίζεται όπως προκύπτει από τα πειραματικά αποτελέσματα κατά την λήψη του σήματος συμπεριλαμβανομένης της μέσης ισχύος του θορύβου (βλ. Σχ. 9.17.(α)). Η διακεκομμένη γραμμή παριστάνει μια προσεγγιστική καμπύλη, που προκύπτει από υπολογισμούς με βάση την εξίσωση του κέρδους της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικού σήματος στον ελεύθερο χώρο (path gain) (βλ. ενότητα 5.2.5). Μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι τρεις ομάδες σημείων των αποστάσεων (10, 15 και 20cm) για τέσσερις διαφορετικές τάσεις (4, 6, 8 και 10V) προσεγγίζουν ικανοποιητικά την καμπύλη αυτή. Κατόπιν αφαιρώντας την μέση ισχύ του θορύβου από την συνολική ισχύ του λαμβανόμενου σήματος παρατηρείται ότι τα σημεία των προαναφερθέντων ομάδων παρουσιάζουν μικρότερες αποκλίσεις μεταξύ τους και από την προσεγγιστική καμπύλη του λόγου των ισχύων (βλ. Σχ. 9.17.(β)).



Σχ. 9.17. Λόγος ισχύος εκπεμπόμενου προς λαμβανόμενου σήματος με θορύβου (α) και αφαιρώντας τη μέση ισχύ του θορύβου (β) σε σχέση με τη προσεγγιστική καμπύλη του λόγου των ισχύων (διακεκομμένη γραμμή).

Το τελικό σήμα στο σημείο λήψης περιέχει θόρυβο χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων (βλ. Σχ. 9.6 – Σχ. 9.9). Η ανάλυση των συχνοτήτων του σήματος βοηθά στην επιλογή των συχνοτήτων έξω από την περιοχή της συχνότητας συντονισμού του δέκτη, που πρέπει να αποκοπούν. Αρχικά η συνάρτηση πραγματοποιεί ένα διακριτό μετασχηματισμό Fourier (Discrete Fourier Transform) για τον μετασχηματισμό των δεδομένων του σήματος από τον πεδίο του χρόνου στο αντίστοιχο των συχνοτήτων. Έπειτα αφαιρείται ο θόρυβος των χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων συγκεκριμένου πλάτους [16], [17]. Η συνάρτηση του φίλτρου που χρησιμοποιήθηκε βασίστηκε στο λογισμικό MATLAB της Mathworks και η ανάπτυξή της περιγράφεται στο Παράρτημα Α.

Ως ένα ενδεικτικό παράδειγμα εξετάζεται η περίπτωση του λαμβανόμενου σήματος για τάση 10V στον εκπομπό (βλ. Σχ. 9.9). Στο Σχ. 9.18. φαίνεται μια σύγκριση του σήματος όπως λαμβάνεται αρχικά (σήμα εσόδου) με το φιλτραρισμένο σήμα (σήμα εξόδου), όπως αυτό προκύπτει μετά από διαδικασία απόρριψης του θορύβου που εκτελείται από την συνάρτηση του φίλτρου. Στην συνάρτηση του φίλτρου χρησιμοποιούνται δύο τιμές κατώφλιου ($threshold=2$ και 3.8) που επηρεάζουν την έξοδο του φίλτρου μεταβάλλοντας την απόσβεσή του (βλ. Παράρτημα Α). Είναι φανερό ότι η διαδικασία του φιλτραρίσματος που εφαρμόζεται ανακτά κατά πολύ μεγάλο βαθμό την ημιτονοειδή συνιστώσα του λαμβανόμενου σήματος. Ειδικότερα για την περίπτωση όπου το κατώφλι είναι ίσο με 3.8 η κυματομορφή που προκύπτει είναι σχεδόν απαλλαγμένη από τον θόρυβο. Επομένως εφαρμόζοντας τεχνικές αποκοπής του θορύβου μέσω γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT) μπορεί να επιτευχθεί σε ένα πολύ μεγάλο βαθμό η ανάκτηση της πληροφορίας που μεταφέρεται από το σήμα εκπομπής του αισθητήρα.



Σχ. 9.18. Αρχικό λαμβανόμενο σήμα, φιλτραρισμένο λαμβανόμενο σήμα με $threshold=2$ και $threshold=3.8$.

10

Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια σύνοψη της διπλωματικής εργασίας, των αποτελεσμάτων της καθώς και συμπερασμάτων που προέκυψαν. Επιπρόσθετα συζητούνται κάποιες προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις και βελτιώσεις του συστήματος της πλατφόρμας επικοινωνίας.

10.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Στόχος της διπλωματικής εργασίας, που παρουσιάστηκε, ήταν να ελεγχθεί κατά πόσο είναι δυνατή η απευθείας αποστολή δεδομένων μέσω ηλεκτρομαγνητικών παλμών πολύ χαμηλής ενέργειας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πειραμάτων μια τέτοια απευθείας αποστολή είναι εφικτή και πολλά υποσχόμενη, μια και επιδέχεται πολλές βελτιώσεις. Αν και οι αρχικές προσδοκίες ήταν η λήψη να γίνεται σε απόσταση μέχρι 1m, κάτι το οποίο δεν συνέβη αφού η λήψη του σήματος ήταν επιτυχής μόνο μέχρι 20cm, εντούτοις τα αποτελέσματα ήταν πολύ ενθαρρυντικά. Ο λόγος είναι ότι πολλοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά τα αποτελέσματα είναι ανιχνεύσιμοι και σχετίζονται κυρίως με τον τρόπο κατασκευής (κύκλωμα εκπομπής και λήψης) και το περιβάλλον (π.χ. ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές - θόρυβος).

Οι κατασκευαστικές ατέλειες αφορούν κυρίως τη χρήση *push-button* διακοπών, την χρήση καλωδίων για την ένωση των εξαρτημάτων, καθώς και την εκτέλεση των πειραμάτων λόγω π.χ. περιορισμένης συχνότητας δειγματοληψίας του παλμογράφου. Είναι σχεδόν σίγουρο ότι τα κυκλώματα εκπομπής και λήψης του σήματος μπορούν να βελτιωθούν σε μεγάλο βαθμό

ώστε το εκπεμπόμενο σήμα που φέρει την πληροφορία να καλύπτει μεγαλύτερες αποστάσεις και ταυτόχρονα να είναι απαλλαγμένο από τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές του περιβάλλοντος. Εφόσον η επίλυση αυτών των προβλημάτων δεν παρουσιάζει κάποια ιδιαίτερη τεχνική δυσκολία, μπορεί να θεωρηθεί πως αυτή η μέθοδος αποστολής δεδομένων που μελετήθηκε είναι εφαρμόσιμη σε ζωτικούς τομείς της έρευνας και της τεχνολογίας.

10.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Ως κύρια πρόταση για επέκταση της παρούσας διπλωματικής είναι η επίλυση των προβλημάτων που αναφέρθηκαν συνοπτικά στην προηγούμενη ενότητα. Συγκεκριμένα η αντικατάσταση των διακοπών *push-button* με ημιαγωγούς οξειδίου μετάλλου, γνωστοί και ως MOSFET, θα βελτιώσει κατά πολύ τον συντελεστή ποιότητας του συστήματος, του οποίου η απόκλιση, ήταν μεγαλύτερη στα πειραματικά αποτελέσματα σε σύγκριση με τα αυτά που αναμενόταν από τους θεωρητικούς υπολογισμούς.

Ένας ακόμη παράγοντας ο οποίος επηρέασε την παρατήρηση των σημάτων, και συνεπώς τα αποτελέσματα κατά την λήψη του σήματος, ήταν ο δέκτης που χρησιμοποιήθηκε. Όπως αναφέρθηκε η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν στα 200MHz και επομένως επέτρεπε την ασφαλή παρατήρηση σημάτων συχνότητας κάτω των 100MHz. Η χρήση ενός πιο εξειδικευμένου συστήματος λήψης θα μπορούσε να δώσει καλύτερα αποτελέσματα για μεγαλύτερες αποστάσεις και μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων. Το σύστημα αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιεί μια κατευθυντική κεραία η οποία θα τοποθετείται σε ευθεία με τον πομπό καθώς και κάποιο ζωνοπερατό φίλτρο (BPF) για την αποκοπή του θορύβου στις πλευρικές συχνότητες.

Παράρτημα Α

Παρακάτω παρατίθενται το script και οι συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική.

1. theoretical_calculations.m

```
%----- Constants -----%
Co_m = 1.256*10^-6; %magnetic permeability of Copper
Co_p = 1.68*10^-8; %resistivity of Copper
m0 = 4*pi*10^-7; %magnetic permeability of air
c_osc = 13*10^-12; %oscilloscope capacitance
light = 3*10^8; %speed of light

%----- Loop antenna -----%

%radius of wire
b = 0.0005:0.00001:0.00075;

%radius of loop antenna from 1cm to 30cm
a = 0.001:0.001:0.030;

%----- Harvester ----- %
c_har = [10^-12 10^-11 10^-10 10^-9 10^-8 10^-7]';
%6 types of capacitors used in harvester

%----- Calculations -----%

%-Capacitance

%total capacitance of parallel capacitors
c = c_har+c_osc;

%meshing matrix dimensions
[a,c,b] = meshgrid(a,c,b);

%-Inductance

%inductance calculation for each radius
L = m0.*a.*(log(8*a./b-2));

%-Frequency
```

```

%calculation of Frequencies
f = 1./(2.*pi.*sqrt(c.*L));

%-Skin Effect (skin depth > 2*b => R<0)

%skin depth
s_depth = sqrt(Co_p./(pi()*f*Co_m));

if s_depth < 2*b

    %DC resistance of the wire
    Rl = (1.68*10^-8)*2*a./(b.^2);

    %total resistance including skin effect
    R = (2*a.*Co_p)./((2*b-s_depth).*s_depth);

    %relative resistance
    Rrel = R./Rl;

else
    Rl = (1.68*10^-8)*2*a./(b.^2);
    R = Rl;
end

%-Radiation

%calculating radiation resistance
Rrad = 31.171*(pi*(a.^2)).^2./(light./f).^4);

%-Q Factor

%calculating Q Factor of the circuit
Q = 2*pi*f.*L./R;

clear Co_m Co_p m0 c_osc light

```

2. *F_fft.m*

```

function [ fsignal ] = F_fft( signal )

% Define signal's amplitude and time array
x = signal(:,1);
t = signal(:,2);

% Sampling frequency
Fs = 1/(t(2)-t(1));

% Use next highest power of 2 greater than or equal to
length(x) to calculate fft
nfft = 2^(nextpow2(length(x)));

% Take fft, padding with zeros so that length(fftx) is equal
to nfft
fftx = fft(x,nfft);

```

```

% Calculate the number of unique points
NumUniquePts = ceil((nfft+1)/2);

% FFT is symmetric, throw away second half
fftx = fftx(1:NumUniquePts);

% Take the magnitude of fft of x
mx = abs(fftx);

% Scale the fft so that it is not a function of the length of
x
mx = mx/length(x);

% Take the square of the magnitude of fft of x which has been
scaled properly.
mx = mx.^2;

% odd nfft excludes Nyquist point
if rem(nfft, 2)

% Since we dropped half the FFT, we multiply mx by 2 to keep
the same energy.
    mx(2:end) = mx(2:end)*2;
else

% The DC component and Nyquist component, if it exists, are
unique and should not be multiplied by 2.
    mx(2:end -1) = mx(2:end -1)*2;
end

% This is an evenly spaced frequency vector with NumUniquePts
points.
f = (0:NumUniquePts-1)*Fs/nfft;

% Finding max power
[value,vector] = max(mx);

% Returning frequency with max power
fsignal = f(vector);
end

```

3. *Q.m*

```

function [ Qsignal ] = Q( signal )

%Calculating frequency using F_fft function
f = F_fft(signal);

%Define signal amplitude limit
v_min = 0.01;

%Input signal
x = signal(:,1);
t = signal(:,2);

```



```

%Calculating envelope of whole measuring period using hilbert
transform
Envelope(:,1) = abs(hilbert(x));
Envelope(:,2) = t;

%Define size of signal array
x_size = size(x);

%Initialise when signal ends
t_min = x_size;

%Define when signal starts as the max amplitude
[v_max,t_max] = max(x);

%Finding envelope only for signal
for i = t_max:x_size

    %Fixing envelope's max values
    if Envelope(i,1) > v_max
        Envelope(i,1) = v_max;
    end

    %Finding when signal ends using amplitude limit
    if v_min >= Envelope(i,1)
        t_min = i;
        break;
    end
end

%Resizing envelope array
Envelope = Envelope(t_max:t_min,:);

%Finding best fitting linear equation for envelopes natural
logarithm
p = polyfit(Envelope(:,2),log(Envelope(:,1)),1);

%Calculating Q factor
Qsignal = -2*pi()*f*(1/(2*p(1)));
End

```

4. Noise_filter.m

```

function [ filtered_signal ] = Noise_filter( signal )

%input noisy signal
y = signal(:,1);
x = signal(:,2);

% set noise threshold
noise_lvl = 3.8;

% Fourier transform of noisy signal
Y = fft(y);

```

```
% set numbers < noise_lvl to zero
fY = fix(Y/noise_lvl)*noise_lvl;

% inverse Fourier transform of fixed data
ifY = ifft(fY);

% remove imaginary part
cy = real(ifY);

%filtered signal
filtered_signal(:,1) = cy;
filtered_signal(:,2) = x;
End
```

Βιβλιογραφία

- [1] C. He, M. E. Kiziroglou, D. C. Yates and E. M. Yeatman, "MEMS Energy Harvester for Wireless Biosensors," in *Proc. 23rd IEEE Conference in Micro-electro-mechanical Systems (MEMS 2010)*, Hong Kong, 2010, pp. 172-175.
- [2] M. Gorlatova, P. Kinget, I. Kymissis, D. Rubenstein, X. Wang and G. Zussman, "Energy harvesting active networked tags (EnHANTs) for ubiquitous object networking," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 6, pp. 18-25, Dec. 2010.
- [3] N. Panitantom, "Ultra-Low-Energy Transmitters for Battery-Free Wireless Sensor Networks," Oregon, USA., 13 June 2011.
- [4] D. C. Yates, A. S. Holmes and A. J. Burdett, "Optimal transmission frequency for ultralow-power short-range radio links," *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, vol. 51, pp. 1405-1413, 2004.
- [5] E. M. Yeatman and M. E. Kiziroglou, "Functional Materials for Energy Applications," in *Chapter IV.3: Energy Harvesting*, Imperial College London, 2011.
- [6] P. D. Mitcheson, E. M. Yeatman, G. Kondala Rao, A. S. Holmes and T. C. Green, "Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices," IEEE, 2008.
- [7] "IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas," in *IEEE Std 145-1983*, 1983.
- [8] C. A. Balanis, σε *ΚΕΡΑΙΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗ & ΣΧΕΔΙΑΣΗ*, 2005, pp. 22-26, 108-109, 232-247.
- [9] A. P. Malvino, "ΚΕΦΑΛΑΙΟ 23 ΤΑΛΑΝΤΩΤΕΣ," in *ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ*, 2006, p. 638.
- [10] H. A. Wheeler, "Formulas for the Skin Effect," *Proceedings of the IRE*, 1942.
- [11] N. I. Μάργαρης, "7.2 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ RLC ΕΝ ΣΕΙΡΑ,"

in *ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ*, 2000, pp. 195-200.

- [12] S. Haykin, *Συστήματα Επικοινωνίας*, 1995, pp. 6,21-24,88-95.
- [13] H. G. Schantz, "A Near Field Propagation Law & A Novel Fundamental Limit to Antenna Gain Versus Size," *IEEE APS Conference*, 2005.
- [14] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," *Proc. Institute of Radio Engineers*, 1949, pp. 10-21.
- [15] K. Moody, "ELECTROMAGNETIC NOISE MONITORING," Ministry of Commerce, Wellington, 1998.
- [16] J. Verschelde, "notes on Signal Processing in MATLAB," in *Introduction to Symbolic Computation, MCS 320*, Dept of Math, Stat & SC, UIC, Spring 2007.
- [17] B. Ninness, "Spectral Analysis using the FFT," Department of Electrical and Computer Engineering, The University of Newcastle, Australia..
- [18] M. E. Kiziroglou, C. He and E. M. Yeatman, "Rolling rod electrostatic microgenerator," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 4, pp. 1101-1108, APRIL 2009.
- [19] C. C. Enz, A. El-Hoiydi, J.-. D. Decotignie and V. Peiris, "WiseNET: An Ultralow-Power Wireless Sensor Network Solution," *IEEE Computer Society*, pp. 62-70, Aug. 2004.
- [20] J. Ayers, K. Mayaram and T. Fiez, "An Ultralow-Power Receiver for Wireless Sensor Networks," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 45, pp. 1759-1769, Sep. 2010.