

**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**Εργαστήριο Τηλεπικοινωνιών και Ηλεκτρομαγνητικών**  
**Εφαρμογών**

**Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών:**  
“Ηλεκτρονικά Συστήματα Τηλεπικοινωνιών & Αυτοματισμών (ΗΣΤΑ)”

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*“Μετρήσεις επαφών διέγερσης φορέσιμων κεραιών”*

**ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ ΒΙΟΛΑΚΗΣ**

**Χανιά, Σεπτέμβριος 2022**



*Αφιερώνεται*

Στην Ελένη και στη Θεανώ Μυρσίνη

# Πρόλογος

Η παρούσα διατριβή έχει σαν αντικείμενο τη μελέτη των επαφών διέγερσης φορέσιμων κεραιών. Εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του Δρ. Θεόδωρου Καπετανάκη με τον Αν. Καθηγητή κ. Ιωάννη Ο. Βαρδιάμπαση ως σύμβουλο καθηγητή και εντάσσεται στα πλαίσια της ερευνητικής δραστηριότητας του τμήματος Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου.

Στο σημείο αυτό, ως ελάχιστο δείγμα αναγνώρισης θέλω να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον Αν. Καθηγητή κ. Ιωάννη Ο. Βαρδιάμπαση. Τον ευχαριστώ όχι μόνο για την δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία και την απόκτηση εμπειρίας και γνώσεων, αλλά και τις αξίες που μου δίδαξε με το παράδειγμα του. Θεωρώ ότι είμαι τυχερός το ότι εργάστηκα κοντά του ενώ η εμπειρία που αποκτήθηκε ήταν παραπάνω από πολύτιμη.

Από την θέση αυτή, επιθυμώ να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον Δρ. Θεόδωρο Καπετανάκη, σαν ελάχιστη ανταπόδοση για την αμέριστη συμπαράσταση του, την ουσιαστική συμβολή του και την συμπόρευση του σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της διατριβής αυτής. Τον ευχαριστώ για τον άφθονο χρόνο που κατανάλωσε, καθοδηγώντας και ενθαρρύνοντας με. Η εμπιστοσύνη με την οποία με περιέβαλλε και η αμέριστη συμπαράσταση του ήταν παραπάνω από καταλυτική.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την στήριξη της στην επιλογή μου αυτή και για την υπομονή που έδειξε όλο το διάστημα της προσπάθειας μου. Η εκπόνηση της παρούσας διατριβής θα ήταν ανέφικτη για αυτό και τους την αφιερώνω.

Χανιά, Σεπτέμβριος 2022

Ευστράτιος Βιολάκης



# Περίληψη

Η παρούσα διατριβή έχει σαν αντικείμενο τη μελέτη των επαφών διέγερσης φορέσιμων κεραιών. Η ανάπτυξη των φορέσιμων ηλεκτρονικών συσκευών και κεραιών οφείλεται στη ζήτηση για ελαφρύτερες και μικρότερες προσωπικές ηλεκτρονικές συσκευές. Η ενσωμάτωση των κεραιών στα ενδύματα καθιστά εφικτή τη χρήση ηλεκτρονικών συσκευών χαμηλότερου προφίλ χωρίς να επηρεάζεται η απόδοσή τους. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές για τις φορέσιμες κεραιές στο στρατό, στην αεροδιαστημική, στη διάσωση, στην ιατρική, στην μόδα κ.λπ. Τα πλεονεκτήματά τους περιλαμβάνουν την αυτόνομη λειτουργία και την άνεση για τους καταναλωτές. Μια φορέσιμη κεραία κατασκευάζεται συνήθως από εύκαμπτα αγώγιμα υλικά που εγγυώνται τα χαρακτηριστικά των ενδυμάτων (μαλακά και εύκαμπτα). Η πρόκληση των φορέσιμων κεραιών είναι ο συμβιβασμός μεταξύ αυτών των χαρακτηριστικών και της ηλεκτρομαγνητικής απόδοσης.

Μετά τη κατασκευή της, μία φορέσιμη κεραία συνήθως εξετάζεται με Vector Network Analyzer (VNA) ή άλλο τοπικό εξοπλισμό μέτρησης μικροκυμάτων για να αξιολογηθούν οι ιδιότητές της. Οι μετρήσεις γίνονται συνήθως συνδέοντας το ένα άκρο ενός ομοαξονικού καλωδίου στον εξοπλισμό μέτρησης και το άλλο άκρο στο στοιχείο που έχει επιλεγεί για μέτρηση. Στις άκαμπτες κεραιές η σύνδεση με τον VNA γίνεται με την συγκόλληση ενός μεταλλικού συνδέσμου SMA. Σε ένα κλωστοϋφαντουργικό όμως σύστημα όπου τα στοιχεία πρέπει να είναι εύκαμπτα και άνετα στη χρήση, τέτοιοι άκαμπτοι σύνδεσμοι αποτελούν πρόβλημα. Οι τεχνικές προσάρτησης εξωτερικού εξοπλισμού στο σύστημα δεν προσφέρουν τη δυνατότητα αφαίρεσή τους όταν πρέπει να πλυθεί το ύφασμα. Για αυτό το λόγο απαιτούνται επαφές που επιτρέπουν την εύκολη αποσύνδεση των ηλεκτρονικών.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι επαφές διέγερσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις φορέσιμες κεντημένες κεραιές. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις ιδιότητες και στην εξέλιξη των φορέσιμων κεντημένων κεραιών, παρουσιάζονται τα RF χαρακτηριστικά και οι επιδόσεις των αγώγιμων υφασμάτων καθώς και οι τεχνικές διαμόρφωσης τους. Στο ίδιο κεφάλαιο μελετάται η επίδραση της πυκνότητας και της κατεύθυνσης κινήματος των αγώγιμων νημάτων. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η επίδραση του ανθρώπινου σώματος στη λειτουργία των φορέσιμων κεραιών. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ιδιότητες των επαφών που χρησιμοποιούνται στις φορέσιμες κεντημένες κεραιές και γίνεται μια εισαγωγή στο λογισμικό CST. Στο τέταρτο κεφάλαιο δίνονται οι μετρήσεις όλων των παραμέτρων που πραγματοποιήθηκαν με VNA σε γραμμές μεταφοράς οι οποίες διέθεταν διαφορετικές επαφές. Το πέμπτο κεφάλαιο περιέχει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της γραμμής μεταφοράς στο λογισμικό CST και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις και την προσομοίωση.



# ABSTRACT

Development in wearable electronics and antennas is driven by the demand for lighter and smaller personal electronic devices. Integrating antenna into garments allow lower-profile and more portable electronics to be practical without affecting their performance. There are a number of applications for wearable antenna including military, aerospace, rescue, medicine, fashion, etc. Advantages include hands-free operation and comfort to consumers. A wearable antenna is normally made by flexible conductive materials which guarantee the textile characteristics of clothing (soft and flexible).The challenge of wearable antennas is the compromise between these textile characteristics and the antenna electromagnetic performance.

After manufacturing, a wearable antenna is usually tested with a Vector Network Analyzer (VNA) or other standard microwave measurement equipment to evaluate its properties. Measurements are usually made by connecting one end of a coaxial cable to the measurement equipment and the other end to the element selected for measurement. In rigid antennas the connection to the VNA is made by soldering an SMA metal connector. However, in a textile system where the elements must be flexible and comfortable to use, such rigid connectors are a problem. Techniques for attaching external equipment to the system do not offer the possibility of removing them when the fabric needs to be washed. For this reason, contacts are required that allow easy disconnection of the electronics.

In this paper, the contacts that can be used in wearable embroidered antennas are considered. The first chapter refers to the properties and evolution of wearable embroidered antennas, presents the RF characteristics and performance of conductive fabrics and their forming techniques. In the same chapter, the effect of the density and embroidery direction of the conductive yarns is studied. In the second chapter, the influence of the human body on the operation of the wearable antennas is presented. In the third chapter the properties of the contacts used in the wearable embroidered antennas are presented and an introduction to the CST software is given. In the fourth chapter the measurements of all parameters carried out with VNA on transmission lines which had different contacts are given. The fifth chapter presents the results of the simulation of the transmission line in the CST software and the conclusions drawn from the measurements and the simulation.





# Περιοχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	Εισαγωγή	
1.1	RF χαρακτηριστικά αγώγιμων υφασμάτων	2
1.2	RF επιδόσεις αγώγιμων υφασμάτων	7
1.3	Τεχνικές διαμόρφωσης αγώγιμων υφασμάτων	9
1.4	Επίδραση της πυκνότητας και της κατεύθυνσης κεντήματος	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	Επιρροή του ανθρώπινου σώματος στη λειτουργία των φορέσιμων κεραιών	
2.1	Μετατόπιση συχνότητας, υποβάθμιση απόδοσης και παραμόρφωση της ακτινοβολίας	13
2.2	Ανάλυση SAR για την αξιολόγηση των επιδόσεων της κεραίας όταν αυτή βρίσκεται κοντά στο ανθρώπινο σώμα	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	Επαφές μικροκυματικών συσκευών	
3.1	Μετάβαση από άκαμπτη σε εύκαμπτη συσκευή	18
3.2	Εισαγωγή στο πρόγραμμα CST Studio Suite	19
3.3	Επαφές υπερήχων	21
3.4	Κεντημένες επαφές	25
3.5	Επαφές συγκόλλησης αντίστασης	26
3.6	Επαφές συγκόλλησης	26
3.7	Επαφές αγώγιμης κόλλας	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	Μετρήσεις παραμέτρων των επαφών φορέσιμων κεραιών	
4.1	Παράμετρος S11	30
4.2	Παράμετρος S21	43
4.3	VSWR	48
4.4	Χάρτης Smith	56
4.5	Διάγραμμα γραμμικής απόκλισης φάσης	66
4.6	Διάγραμμα group delay	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	Προσομοίωση της γραμμής μεταφοράς στο CST	
5.1	Σχεδίαση της γραμμής μεταφοράς	82
5.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης	84
5.3	Συμπεράσματα	87
	Βιβλιογραφία	89



# Σύμβολα

## Κεφάλαιο 2:

SAR	Ειδικός ρυθμός απορρόφησης
W	Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια
$\rho$	Πυκνότητα
dV	Όγκος βιολογικού ιστού
E	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου
$\sigma$	Ηλεκτρική αγωγιμότητα ιστού
$\epsilon$	Μιγαδική διηλεκτρική σταθερά
$\epsilon_0$	Μιγαδική σχετική διηλεκτρική σταθερά
$\tan\delta$	Εφαπτομένη απωλειών

## Κεφάλαιο 3:

$f_r$	Συχνότητα συντονισμού
$S_{11}$	Παράμετρος σκέδασης
$f_L$	Χαμηλή συχνότητα συντονισμού
$f_H$	Υψηλή συχνότητα συντονισμού
BW	Εύρος ζώνης συχνοτήτων
SWR	Λόγος στάσιμου κύματος
X	Μιγαδική αντίσταση

## Κεφάλαιο 4:

$S_{21}$	Παράμετρος σκέδασης
VSWR	Λόγος τάσης στάσιμου κύματος
GD	Καθυστέρηση ομάδας

# Σ χ ή μ α τ α

Σχήμα 1-1: Σχηματική παρουσίαση διαφορετικών τεχνικών επιμετάλλωσης για τη δημιουργία ηλεκτρικά αγώγιμων υφασμάτων

Σχήμα 1.2: Ηλεκτρική αγωγιμότητα ως συνάρτηση της σταθεράς του Young

Σχήμα 1.3: Ηλεκτρική αγωγιμότητα στερεών υλικών

Σχήμα 1.4: Προσανατολισμός κεντήματος

Σχήμα 3.1: Φορέσιμη κεραία αναδιπλωμένου διπόλου

Σχήμα 3.2: Σχεδίαση κεραίας στο CST

Σχήμα 3.3: Παράμετρος σκέδασης S11

Σχήμα 3.4: Παράμετρος VSWR

Σχήμα 3.5: Group delay

Σχήμα 3.6: Χάρτης Smith

Σχήμα 4.1: Παράμετροι σκέδασης

Σχήμα 4.2: Επαφή φορέσιμης κεραίας

Σχήμα 5.1: Γραμμή μεταφοράς που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση στο CST

Σχήμα 5.2: Γραμμή μεταφοράς στο πρόγραμμα CST

# Πίνακες

Πίνακας 1-1: Σύγκριση διηλεκτρικών υφασμάτων

Πίνακας 2.1 Ηλεκτρικές ιδιότητες ιστών

Πίνακας 3.1: Διαστάσεις κεραίας αναδιπλωμένου διπόλου D5

Πίνακας 3.2: Πίνακας μετρήσεων με VNA της κεραίας αναδιπλωμένου διπόλου D5

Πίνακας 5.1: Διαστάσεις γραμμής μεταφοράς που χρησιμοποιήθηκε στο CST.

Πίνακας 5.2: Σύγκριση τυπικών τεχνολογιών για τη διασύνδεση αγωγών ενσωματωμένων σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή

Η πρόοδος των τεχνολογιών κατασκευής αγώγιμων υλικών οδήγησε στην δημιουργία νέων εύκαμπτων και άνετων έξυπνων συσκευών. Η έρευνα στον τομέα των διαδραστικών υφασμάτων συστημάτων έχει επικεντρωθεί στις φορέσιμες κλωστοϋφαντουργικές κεραίες (wearable textile antennas) οι οποίες εξασφαλίζουν άνεση στον χρήστη χάρη στην ευκαμψία, στην προσαρμοστικότητα και στο μειωμένο βάρος παρά την ανομοιογένεια του υποστρώματος. Οι εφαρμογές τους ποικίλουν σε διάφορους τομείς όπως στην ιατρική για την παρακολούθηση της υγείας, στη σωματική άσκηση, στις υπηρεσίες διάσωσης έκτακτης ανάγκης και στην επιβολή του νόμου[1].

Το κέντημα (embroidery) έχει αποδειχθεί ως η πιο αποτελεσματική τεχνική για την υλοποίηση φορέσιμων κεραιών. Είναι μια προηγμένη σύγχρονη τεχνική που επιτρέπει την ενσωμάτωση αγώγιμων ηλεκτρικών διαύλων σε υφασμάτινα υποστρώματα, τη μαζική παραγωγή ενδυμάτων και την εφαρμογή εξατομικευμένων σχεδίων. Αυτό οφείλεται στη διαθεσιμότητα της τεχνολογίας κατασκευής, στην αποτελεσματική χρήση των ακριβών εξειδικευμένων ασημένιων νημάτων και στην επαναληψιμότητα των γεωμετριών και των διατάξεων [2],[3]. Τα σχέδια των κεραιών μπορούν να κατασκευαστούν με ψηφιοποιημένες μηχανές κεντήματος, δεν απαιτείται κόλλα, τα σχέδια είναι αισθητικά και ενσωματώνονται στα ρούχα.

Τα υφάσματα φορέσιμων κεραιών μπορούν να αισθάνονται, να αντιδρούν και να προσαρμόζονται ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες ή τα ερεθίσματα και χωρίζονται σε ενεργά και παθητικά με βάση την ευαισθησία, το επίπεδο νοημοσύνης τους και την αντίδρασή τους στα ερεθίσματα. Οι αισθητήρες είναι το νευρικό σύστημα για την ανίχνευση των εξωτερικών σημάτων και οι ενεργοποιητές ενεργούν με βάση τα ανιχνευμένα σήματα είτε απευθείας είτε μέσω κεντρικής μονάδας ελέγχου [4].

Οι κύριοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό της κεραίας είναι η ποιότητα, η αντοχή και η ευκαμψία των αγώγιμων νημάτων, η ακρίβεια της μηχανής κεντήματος, η πυκνότητα ραφής και η κατεύθυνση του υφάσματος. Οι προκλήσεις κατασκευής που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι η εύρεση κατάλληλου αγώγιμου νήματος, η κατεύθυνση και η πυκνότητα ραψίματος. Για να εξασφαλιστεί η λειτουργικότητα πρέπει οι φορέσιμες κεραίες να είναι φιλικές προς τον χρήστη, άνετες, ευέλικτες, ανθεκτικές, φθηνές, χαμηλού βάρους και συμπαγείς [5].

Υψηλότερη απόδοση της κεραίας μπορεί να επιτευχθεί με την εξασφάλιση παράλληλης ροής ρεύματος στην κατεύθυνση του νήματος. Όσο μικρότερη είναι η απόσταση μεταξύ των νημάτων τόσο υψηλότερη είναι η απόδοση της κεραίας. Τα ρεύματα στις κεντημένες κεραίες προτιμούν να ρέουν κατά μήκος των νημάτων, επομένως οι κεντημένες φορέσιμες κεραίες προσφέρονται για γραμμικές κεραίες όπως δίπολα και σπείρες [6].

Η απόδοση της κεραίας εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους όπως η αγωγιμότητα του στοιχείου ακτινοβολίας, οι ιδιότητες και το υλικό του υποστρώματος, το εύρος συχνοτήτων και η τεχνική κατασκευής. Η απολαβή κεραίας (gain), η απόδοση (efficiency) και το εύρος ζώνης (bandwidth) αυξάνονται με την αύξηση της αγωγιμότητας του στοιχείου ακτινοβολίας ενώ μειώνονται με την αύξηση του συντελεστή διηλεκτρικών απωλειών του υποστρώματος (loss tangent) [7]. Χαμηλή διηλεκτρική σταθερά ( $\epsilon_r$ ) του υποστρώματος ελαχιστοποιεί τα επιφανειακά κύματα και βελτιώνει το εύρος ζώνης [8].

Όσον αφορά τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τα στοιχεία ακτινοβολίας (patch) στις φορέσιμες κεραίες αυτά μπορούν να είναι από χαλκό, αλουμίνιο, ασήμι ενώ για τα διηλεκτρικά



στοιχεία (substrate) μπορούν να είναι πολυμερή, χαρτί, αφρός, πλαστικό, ύφασμα [9]. Οι υφασμάτινες κεραίες επηρεάζονται περισσότερο από την υγρασία σε σχέση με τις μη-υφασμάτινες. Όταν απορροφάται η υγρασία τότε αυξάνεται η διαπερατότητα και αυτό προκαλεί μετατόπιση της συχνότητας συντονισμού προς χαμηλότερες συχνότητες [10]. Η τεχνολογία των κεντημένων φορέσιμων κεραιών χρησιμοποιεί ειδικά αγώγιμα νήματα τα οποία πρέπει να έχουν την κατάλληλη αντίσταση και ευκαμψία ώστε να αποφεύγονται τα ανεπιθύμητα σπασίματα που μπορεί να προκαλέσουν οι υψηλές πιέσεις των μηχανών.

Το ανθρώπινο σώμα έχει πολύ υψηλή σχετική διαπερατότητα και ένα μέρος της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας απορροφάται και ένα άλλο μέρος ανακλάται από αυτό όταν μία κεραία βρίσκεται σε επαφή μαζί του. Η παρουσία του αυξάνει τις απώλειες επιστροφής (return loss), ελαττώνει την απόδοση της κεραίας και την κατευθυντικότητα ενώ μετατοπίζει τη συχνότητα συντονισμού προς χαμηλότερες συχνότητες. Οι απώλειες επιστροφής εκφράζουν την αποτελεσματικότητα της μεταφοράς ισχύος από ένα μέσο προς την κεραία και δίνονται σε dB. Η ελάχιστη τιμή για την οποία θεωρείται ότι έχουμε καλή λειτουργία είναι -10dB οπότε σε αυτή την περίπτωση το 90% της ενέργειας χρησιμοποιείται από την κεραία για να συντονιστεί στην επιθυμητή συχνότητα.

## 1.1 RF χαρακτηριστικά αγώγιμων υφασμάτων

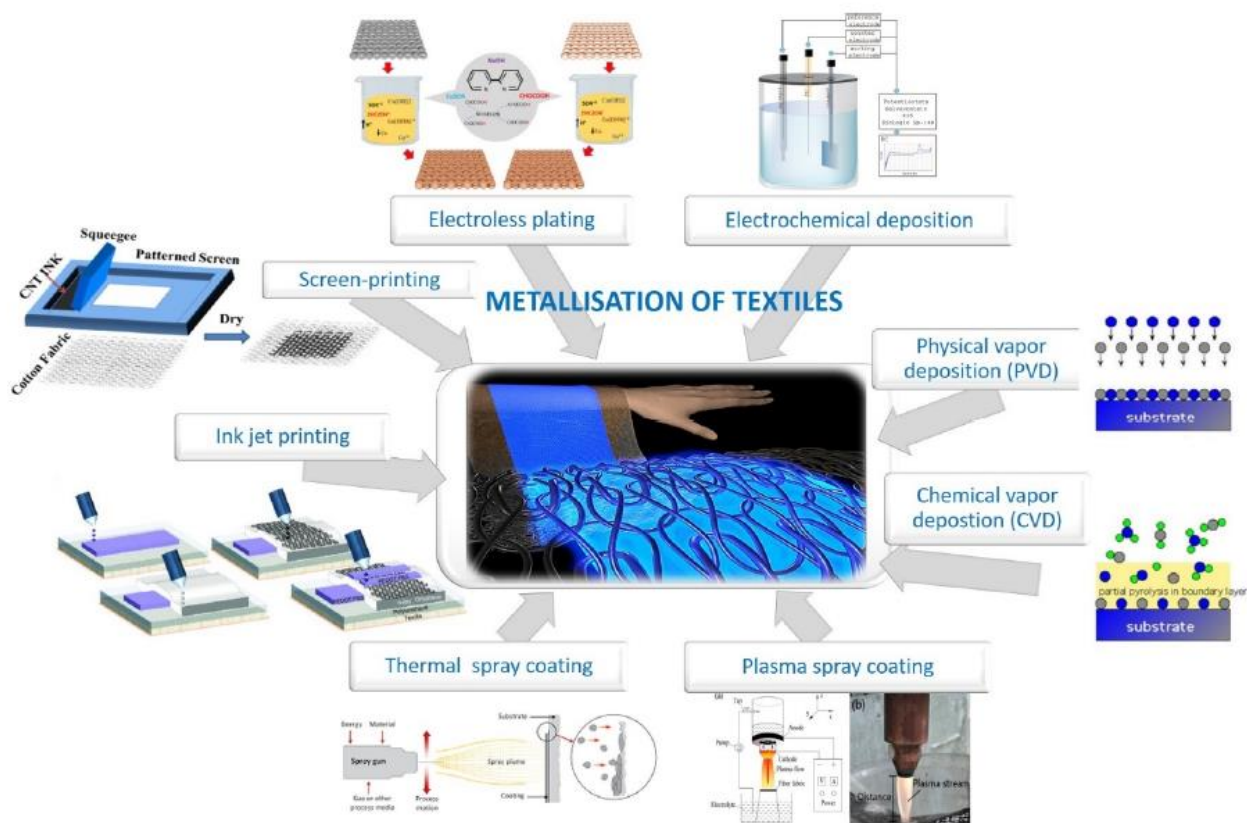
Τα έξυπνα υφάσματα και οι εφαρμογές τους βρίσκονται σε δραστική άνοδο καθώς η ζήτηση για αυτά αυξάνεται με την εμφάνιση νέων ινών και καινοτόμων τεχνολογιών επεξεργασίας. Επιπλέον υπάρχει η απαίτηση για πλενόμενα, εύκαμπτα, ελαφριά και στιβαρά ηλεκτρονικά υφάσματα. Αυτά τα χαρακτηριστικά εξαρτώνται από τις ιδιότητες του βασικού υλικού, από τη διαχείριση του μετά την κατασκευή και από τις τεχνικές ολοκλήρωσης. Το έξυπνο ύφασμα μπορεί να αναπτυχθεί με την εφαρμογή ενός αγώγιμου στοιχείου στην επιφάνεια ενός υφασμάτινου υποστρώματος μέσω επιμετάλλωσης, εκτύπωσης, επίστρωσης και άλλων τεχνικών ή δημιουργώντας ένα υπόστρωμα από μέταλλα και αγώγιμα πολυμερή μέσω της δημιουργίας ινών και κατασκευή νημάτων και υφασμάτων με αυτά. Επιπλέον, αγώγιμες ίνες νήματος μπορούν επίσης να ενσωματωθούν σε συμβατικά υφαντικά υποστρώματα κατά την κατασκευή με πλέξιμο ή ύφανση.

Τα έξυπνα υφάσματα είναι λειτουργικά υφαντικά υλικά που αλληλεπιδρούν ενεργά με το περιβάλλον τους, δηλαδή ανταποκρίνονται ή προσαρμόζονται σε αλλαγές που συμβαίνουν σε αυτό [13]. Ενσωματώνουν υψηλό επίπεδο νοημοσύνης και ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες: παθητικά, ενεργητικά και πολύ ενεργά [14]. Μπορούν να κατασκευαστούν με ενσωμάτωση ηλεκτρονικών υλικών, αγώγιμων πολυμερών, υλικών αλλαγής φάσης και άλλων ηλεκτρονικών αισθητήρων και τμημάτων εξοπλισμού επικοινωνίας.

Τα ηλεκτρικά αγώγιμα υφάσματα χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές έξυπνων υφαντικών υλικών. Τα συμβατικά κλωστοϋφαντουργικά υλικά είναι συνήθως μονωτικά υλικά, όπου δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για έξυπνες εφαρμογές κλωστοϋφαντουργίας οι οποίες απαιτούν ηλεκτρική αγωγιμότητα. Είναι δυνατή η παραγωγή ηλεκτρικά αγώγιμου υφάσματος με ενσωμάτωση μεταλλικών συρμάτων, αγώγιμων πολυμερών ή άλλων αγώγιμων ενώσεων στη δομή του υφάσματος σε διαφορετικά στάδια κατασκευής. Για να προσδώσουν αγωγιμότητα, μη υφαντικά σύρματα μεταλλικών νημάτων κατασκευασμένα από ασήμι, ανοξείδωτο χάλυβα, νικέλιο, αλουμίνιο και χαλκό μπορούν να εισαχθούν στην κλωστοϋφαντουργική δομή.

Τα μέταλλα παρέχουν υψηλή αγωγιμότητα που είναι πολύ σημαντικό για ορισμένες έξυπνες εφαρμογές κλωστοϋφαντουργίας αλλά αυξάνει το βάρος του υλικού και επηρεάζει την ευελιξία τους. Επιπλέον, ορισμένα μέταλλα είναι επιρρεπή στη διάβρωση. Εκτός από τη χρήση μετάλλου, αγώγιμα υφάσματα με βάση το μέταλλο μπορούν επίσης να παραχθούν με επίστρωση μεταλλικού μελανιού στην επιφάνεια τους αλλά αυτά έχουν περιορισμούς στη διαδικασία πλήσης. Αυτό οδηγεί στην αναζήτηση εναλλακτικών αγώγιμων ενώσεων για την παραγωγή αξιόπιστων αγώγιμων υφασμάτων με καλύτερη ευελιξία. Τα αγώγιμα υλικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως αγώγιμα μελάνια με βάση τον άνθρακα, αγώγιμα πολυμερή, εγγενώς αγώγιμα πολυμερή και αγώγιμα πολυμερή σύνθετα υλικά [15].

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί αρκετές τεχνικές σχετικά με το πώς μπορεί να εφαρμοστεί η αγωγιμότητα σε εύκαμπτες επιφάνειες: (i) τα υφάσματα υφαινούνται ή πλέκονται από αγώγιμα νήματα, (ii) οι επιφάνειες είναι ραμμένες ή κεντημένες με αγώγιμα νήματα, (iii) ειδική επεξεργασία απόκτησης αγωγιμότητας, δηλαδή χημική επίστρωση, επιφανειακή επιμετάλλωση (π.χ. νανοσωματίδια χαλκού (Cu), αργύρου (Ag) ή νικελίου (Ni) (NPs)), εναπόθεση από αγώγιμα υλικά πλήρωσης (μαύρος άνθρακας ή νανοσωλήνες άνθρακα) και επίστρωση αγώγιμων πολυμερών επιτυγχάνοντας μεγάλη κλίμακα παραγωγή φορητών ηλεκτρονικών κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων [16]. Στην παρακάτω **Εικόνα 2.1** δίνονται διαφορετικές τεχνικές επιμετάλλωσης για τη δημιουργία ηλεκτρικά αγώγιμων υφασμάτων.



**Εικόνα 1.1:** Σχηματική παρουσίαση διαφορετικών τεχνικών επιμετάλλωσης για τη δημιουργία ηλεκτρικά αγώγιμων υφασμάτων: ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση, ηλεκτροχημική εναπόθεση, φυσική και χημική εναπόθεση ατμών, επίστρωση πλάσματος, θερμική επίστρωση, εκτύπωση inkjet, screen printing [17].

Στην ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση παρατηρείται εναπόθεση μιας επίστρωσης μετάλλου σε ένα υπόστρωμα χωρίς τη χρήση εξωτερικής πηγής ενέργειας και είναι σχετικά φθηνότερη σε σύγκριση με άλλες μεθόδους. Για να πραγματοποιηθεί, πρέπει πρώτα να καθαριστεί το ύφασμα με χημικό καθαριστικό και μετά να βυθιστεί στο διάλυμα επιμετάλλωσης. Με την μέθοδο αυτή ο χρήστης έχει πολύ περισσότερο έλεγχο της διαδικασίας [18].

Η ηλεκτροχημική εναπόθεση ενός λεπτού στρώματος ανηγμένων μεταλλικών ιόντων επάνω σε ηλεκτρικά αγωγίμα υποστρώματα οδηγούν σε μεταλλική επίστρωση επιφανειών. Το υπόστρωμα πρέπει να καθαριστεί πριν από την ηλεκτρολυτική επίστρωση αφαιρώντας τις ακαθαρσίες, με αποτέλεσμα την αποτελεσματική προσκόλληση των μεταλλικών σωματιδίων στην επιφάνεια. Η διαδικασία επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους, όπως η διεπαφή επίστρωσης-περιβάλλοντος, η διεπαφή επίστρωσης-υποστρώματος και το ίδιο το υλικό επίστρωσης. Έχει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι άλλων τεχνικών, όπως ο έλεγχος της μορφολογίας και του πάχους προσαρμόζοντας τις παραμέτρους εναπόθεσης (π.χ. συγκέντρωση και σύνθεση ηλεκτρολυτών, χρόνος εναπόθεσης, πυκνότητα εφαρμοζόμενου ρεύματος). Επιπλέον, η διαδικασία απαιτεί χαμηλό κόστος εξοπλισμού για μια οικονομικά προσιτή διαδικασία. Το κύριο μειονέκτημα είναι ότι το υπόστρωμα που προορίζεται για επίστρωση θα πρέπει να είναι ηλεκτρικά αγωγίμο. Δεδομένου ότι τα υφάσματα συνήθως λειτουργούν ως φυσικοί μονωτές, είναι απαραίτητο να γίνουν αγωγίμα πριν από την εναπόθεση [19].

Η φυσική εναπόθεση ατμών έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες τεχνικές εναπόθεσης μεταξύ των οποίων είναι η υψηλή καθαρότητα, η αποτελεσματικότητα και η φιλικότητα προς το περιβάλλον, η χρήση υποστρωμάτων στη μορφή κυρίως καθαρών αερίων και μετάλλων αντί των ακριβών, πολύπλοκων και συνήθως τοξικών χημικών ενώσεων, η δυνατότητα παραγωγής σύνθετων επιστρώσεων και απεριόριστες δυνατότητες στον τομέα της παραγωγής. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η ανεπαρκής πρόσφυση των εναποτιθέμενων στρωμάτων λόγω ανομοιογένειας των υφασμάτων επιφανειών, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε έλλειψη ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε μεγαλύτερες περιοχές [20].

Τα στάδια της διαδικασίας στην χημική εναπόθεση ατμών περιλαμβάνουν τη μεταφορά πρόδρομων μορίων στον αντιδραστήρα, τη διάχυση τους στην επιφάνεια, την προσρόφηση τους στην επιφάνεια και χημικές αντιδράσεις στην επιφάνεια όπως αποσύνθεση μορίων, ενσωμάτωση σε στερεό στρώμα, ανασυνδυασμός μοριακών υποπροϊόντων και εκρόφηση στην αέρια φάση. Όταν ρέουν τα αέρια πάνω από την επιφάνεια του θερμαινόμενου υποστρώματος, η προκύπτουσα χημική αντίδραση σχηματίζει μία στερεή φάση που εναποτίθεται στο υπόστρωμα και η θερμοκρασία μπορεί να επηρεάσει την αντίδραση σημαντικά [21].

Η διαδικασία επίστρωσης με ψεκασμό πλάσματος περιλαμβάνει τον ψεκασμό ενός υποστρώματος με τηγμένο ή ημιλιωμένο υλικό για τη δημιουργία μιας σκληρής επίστρωσης που προστατεύει από την οξείδωση και τη φθορά από τη διάβρωση που προκαλείται από περιβαλλοντικές συνθήκες και συνθήκες λειτουργίας. Οι επικαλύψεις είναι πυκνές και ισχυρές, καθιστώντας την επίστρωση πλάσματος μια ευνοϊκή επιλογή. Οι επικαλύψεις ψεκασμού πλάσματος εφαρμόζονται χρησιμοποιώντας μια διαδικασία υψηλής θερμοκρασίας που περιλαμβάνει την έγχυση κονιοποιημένου υλικού επικάλυψης σε φλόγα πλάσματος. Το υλικό θερμαίνεται γρήγορα και στη συνέχεια επιταχύνεται προς το υπόστρωμα. Μόλις φτάσει στην επιφάνεια αρχίζει να κρυσταλλώνεται, σχηματίζοντας μια σκληρή επίστρωση στο υπόστρωμα. Οι υψηλές θερμοκρασίες που εμπλέκονται στην επίστρωση πλάσματος επιτρέπουν τη χρήση κεραμικών και άλλων υλικών που έχουν υψηλό σημείο τήξης [22].

Η θερμική επίστρωση είναι μια αναδυόμενη και πολλά υποσχόμενη τεχνική επίστρωσης, όπου λιωμένες ή θερμαινόμενες ενώσεις ψεκάζονται σε διαφορετικές επιφάνειες με μορφή σταγονιδίων υπό πίεση αέρα, όπου στερεοποιούνται και συνδέονται κατά την επαφή, σχηματίζοντας ανθεκτική επίστρωση. Αυτή η τεχνική παρέχει παχύρρευστες επιστρώσεις σε μεγαλύτερη επιφάνεια και με υψηλότερο ρυθμό εναπόθεσης, σε σύγκριση με άλλες διαδικασίες

επίστρωσης όπως η ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση, η PVD και η CVD. Για αυτούς τους λόγους, η επίστρωση ψευκασμού έχει πρόσφατα αποκτήσει μεγάλο ενδιαφέρον για την κατασκευή ευέλικτων φορέσιμων αγώγιμων υφασμάτων. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στον ρυθμό ξήρανσης, στον έλεγχο των ρεολογικών ιδιοτήτων των πρώτων υλών και στις ιδιότητες διαβροχής των κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων. Επειδή αμφισβητείται ο ακριβής έλεγχος η ευρεία εφαρμογή της είναι περιορισμένη. Ερευνητές [23] χρησιμοποίησαν έναν συνδυασμό επικάλυψης με ψευκασμό με άλλες τεχνικές και πρότειναν μία ελεγχόμενη και γρήγορη μεταλλική τεχνική επίστρωσης συνδυάζοντας εναπόθεση ψευκασμού και ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση επιτυγχάνοντας ένα ομοιόμορφο και πυκνό αγώγιμο ύφασμα [24].

Εκτύπωση inkjet είναι η άμεση εφαρμογή μελανιών με χρήση συσκευής άμεσης γραφής (κίνηση ακροφυσίου ελεγχόμενη από λογισμικό) και έχει πρόσφατα χρησιμοποιηθεί ευρέως για τη κατασκευή αγώγιμων ηλεκτρονικών κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων. Η διαδικασία έχει γίνει πολύ ελκυστική σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες εκτύπωσης (λιθογραφία, μεταξοτυπία), αφού δεν απαιτείται μάσκα ή οθόνη. Επιπλέον, συνήθως καταναλώνεται το αγώγιμο μελάνι ελάχιστα, και η επιθυμητή διάταξη μπορεί να παραχθεί σε συντομότερο χρόνο σε σύγκριση με την μεταξοτυπία. Οι διαμορφωμένες τελικές δομές τυπώνονται σε υποστρώματα και έχουν υψηλή ανάλυση, αφού το πάχος του στρώματος μειώνεται, καθιστώντας αυτή τη μέθοδο κατάλληλη για εύκαμπτα και ελαστικά υφάσματα. Από περιβαλλοντική άποψη η όλη διαδικασία δεν απαιτεί σκληρά χημικά και δεν παράγει απόβλητα [25].

Το screen printing είναι μία από τις πιο απλές, αποδοτικές και χαμηλού κόστους τεχνικές εκτύπωσης για την προσαρμογή αγώγιμων κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων. Η διαδικασία βασίζεται στην εκτύπωση μιας αγώγιμης πάστας μέσω ενός λεπτού πλέγματος με σχέδια μέσω ενός μάκτρου που κινείται πάνω από το πλέγμα με κατάλληλη ταχύτητα και πίεση, πιέζοντας την αγώγιμη πάστα στην επιφάνεια του υφάσματος. Η χρήση της έχει πολλά πλεονεκτήματα καθώς απαιτούνται λιγότερα στάδια εκτύπωσης και η εφαρμοζόμενη πίεση συμπίεσης βελτιώνει την διείσδυση και πρόσφυση του μελανιού στο υφαντικό υπόστρωμα [26].

Όσον αφορά της φορέσιμες κεραίες, υπάρχουν διαφορετικές μέθοδοι για την κατασκευή, όπως το screen printing, το inkjet printing και η χρήση αγώγιμων υφασμάτων. Τα πλεονεκτήματα των κεραίων που κατασκευάζονται με screen printing είναι η ταχύτητα παραγωγής, το χαμηλό κόστος και το ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε μαζική παραγωγή. Σχετικά υψηλή ανάλυση και ευλύγιστο μοτίβο επιτυγχάνονται πιο εύκολα σε ύφασμα [27].

Ένα σημαντικό στοιχείο για την ανάπτυξη μίας κεραίας είναι η επιλογή του κατάλληλου διηλεκτρικού υλικού το οποίο πρέπει να εξισορροπήσει ανάμεσα σε απαιτήσεις όπως ευελιξία, ανθεκτικότητα, πάχος και διηλεκτρική απώλεια. Για παράδειγμα, τα ασύρματα δίκτυα περιοχής σώματος (WBAN) απαιτούν κεραία ελαφριά, να ενσωματώνεται εύκολα στα ρούχα, ευέλικτη και φθηνή. Για αυτές τις εφαρμογές, προτιμάται το ελαφρύ, φθηνό διηλεκτρικό ύφασμα. Η ανθεκτικότητα είναι μια άλλη σημαντική παράμετρος κατά την επιλογή υφαντικών υλικών. Ο Πίνακας 2.1 δείχνει μια σύγκριση μεταξύ διαφορετικών διηλεκτρικών.

Material	Permittivity ( $\epsilon_r$ )	Loss tangent ( $\tan\delta$ )
Denim	1.40	0.16
Denim	1.40	0.07
Leather	2.95	0.006
Denim	1.70	0.014
Denim	1.80	0.07
Velcro	1.34	
Denim	1.8–2.0	
Denim (black)	1.8	
Velcro	1.37	
Felt	1.38	0.023
Fleece	1.17	0.0035
Moleskin	1.45	0.05
Panama	2.12	0.018
Silk	1.75	0.012
Tween	1.69	0.0084
Perspex	2.57	0.008
PTFE	2.05	0.0017
Polystyrene foam	1.02	0.00009
Felt	1.36	0.016
Fleece	1.2	0.004
Neoprene rubber	5.2	0.025
Silk	1.2	0.54
Cotton	1.54	0.058
Leather—different types	1.8–2.4	0.049–0.071
Cordura <sup>®</sup>	1.90	0.0098
Cotton	1.60	0.0400
100% Polyester	1.90	0.0045
Quartzel <sup>®</sup> fabric	1.95	0.0004
Cordura/Lycra <sup>®</sup>	1.50	0.0093

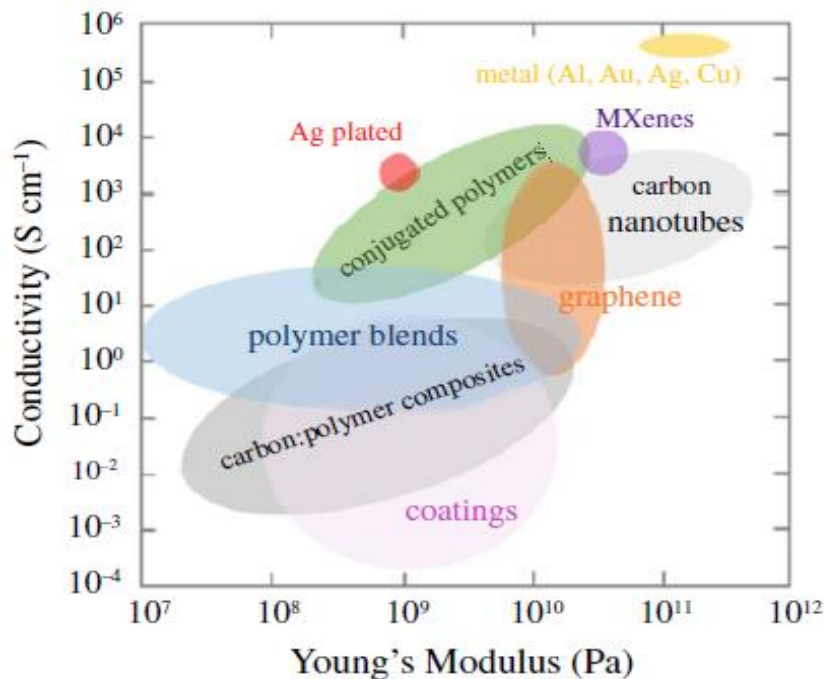
**Πίνακας 1.1:** Σύγκριση διηλεκτρικών υφασμάτων [28],[29],[30],[31],[32],[33],[34],[35],[36],[37].

Τα αγώγιμα υφάσματα χρειάζονται γενικά και για τις δύο ιδιότητες τους αντιστατικές και αγώγιμες. Μία σημαντική ποσότητα των υφαντικών υλικών είναι η επιφάνεια αντίστασης (Surface Resistance) η οποία έχει τιμές μεταξύ 10-100 Ohm/sq [38]. Μια θεμελιώδη αρχή του σχηματισμού αγώγιμων ινών είναι η ικανότητα διασποράς και μεταφοράς του ηλεκτρικού φορτίου.

## 1.2 RF επιδόσεις αγώγιμων υφασμάτων

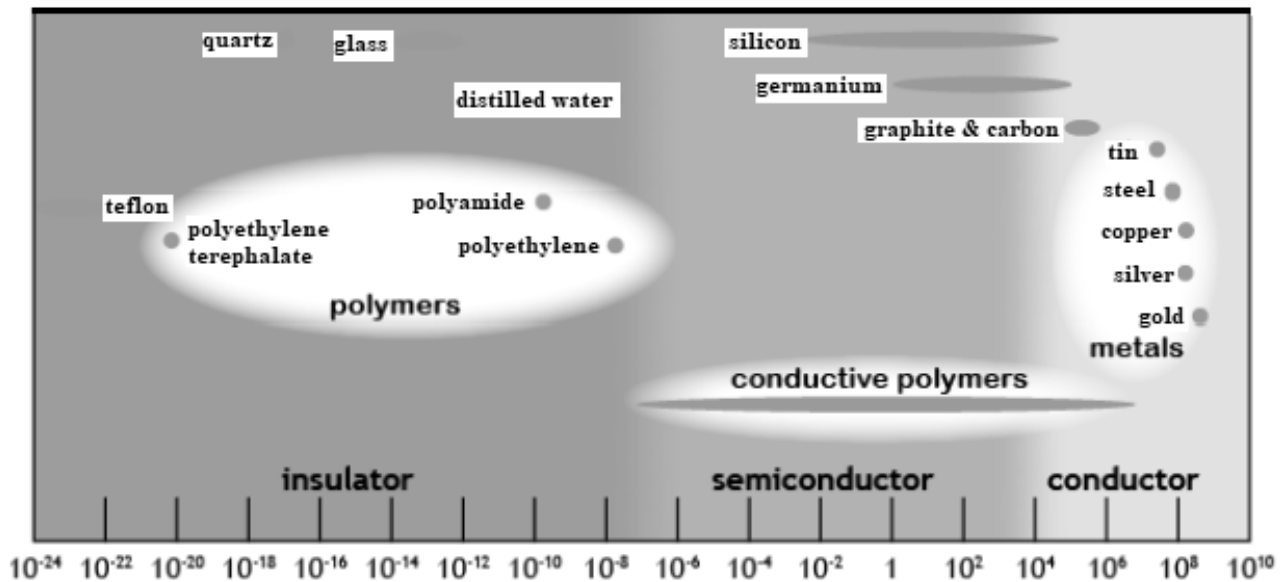
Μέταλλα, των οποίων η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι περίπου  $5 \times 10^5$  S/cm μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία διακοσμητικών σχεδίων σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα. Τα ηλεκτρονικά κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα που χρησιμοποιούνται ήδη σήμερα περιλαμβάνουν επιστρώσεις από επιμεταλλωμένο ασήμι ή από ίνες ενσωματωμένου λεπτού ανοξείδωτου χάλυβα, και χάρη στις πρόσφατες εξελίξεις υπάρχουν πλέον νέες αναδυόμενες εφαρμογές. Για την υλοποίηση αγώγιμων υφασμάτων με όλες τις προβλεπόμενες λειτουργίες, θα χρειαστεί να χρησιμοποιηθεί μια ευρύτερη ομάδα υλικών που όχι μόνο περιλαμβάνει ηλεκτρικούς αγωγούς, αλλά επίσης ημιαγωγούς και ηλεκτροχημικά ενεργά υλικά.

Υπάρχει ένας αριθμός υλικών όπως συζευγμένα πολυμερή, αλλότροπα υλικά άνθρακα, συμπεριλαμβανομένων των νανοσωλήνων άνθρακα και του γραφενίου, που μπορούν άμεσα να εισαχθούν σε αγώγιμες ή ημιαγώγιμες ίνες. Το αποτέλεσμα είναι οι ίνες να εμφανίζουν υψηλή αγωγιμότητα, αλλά και υψηλό συντελεστή Young (**Εικόνα 2.2**), το οποίο τα καθιστά ακατάλληλα για κατασκευή εύκαμπτων υφασμάτων, αφού τα εύθραυστα υλικά σπάνε κατά τη διαδικασία πλεξίματος. Μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες μπορούν να αποσυνδεθούν αναμειγνύοντας το (ημι)αγώγιμο υλικό με μονωτικό πολυμερές. Νανოსύνθετα άνθρακα καθώς και μείγματα συζευγμένων και μονωτικών πολυμερών επιτρέπουν την πρόσβαση σε όλο το φάσμα της μηχανικής συμπεριφοράς από ελαστικό έως όλκιμο και σκληρό (**Εικόνα 2.2**), αν και σε αντίκτυπο της υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, η οποία τυπικά περιορίζεται σε περίπου 10 S/cm.



**Εικόνα 1.2:** Ηλεκτρική αγωγιμότητα ως συνάρτηση της σταθεράς του Young (ιδιότητα του υλικού που εκφράζει πόσο εύκολα μπορεί να τεντωθεί και να παραμορφωθεί) για ηλεκτρικά αγώγιμες ίνες ή νήματα με βάση μέταλλα (κίτρινο), MXenes (μεταλλικά καρβίδια υψηλής μεταλλικής αγωγιμότητας) (μωβ), νανοσωλήνες άνθρακα (ανοιχτό γκρι), γραφένιο (πορτοκαλί), σύνθετα υλικά αλλοτροπικού άνθρακα και πολυμερούς (σκούρο γκρι), συζευγμένα πολυμερή (πράσινο), μείγματα αγώγιμου και μονωτικού πολυμερούς (μπλε), μονωτικές ίνες ή νήματα με αγώγιμο πολυμερές (ροζ) και νήματα με επικάλυψη Ag (κόκκινο) [39],[40],[41].

Η κλίμακα ηλεκτρικής αγωγιμότητας στερεών υλικών (**Εικόνα 1.3.**) δείχνει ότι οι τιμές αγωγιμότητας των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων αγώγιμων υφασμάτων εμπίπτουν σε περιοχή κάτω από  $10^{-7}$  S/m, που αντιστοιχεί στους καλύτερους μονωτές. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα αγώγιμα υλικά, παρουσιάζουν πολύ υψηλότερες τιμές: από  $10^7$  S/m για τον χάλυβα έως  $10^9$  S/m για χαλκό και ασήμι.



**Εικόνα 1.3:** Ηλεκτρική αγωγιμότητα στερεών υλικών (S/m)[42]

Η επιφανειακή ειδική αντίσταση των υφασμάτων μπορεί να χωριστεί σε:

- i. υλικά θωράκισης EMI/RFI: λιγότερο από  $10^4 \Omega$ .
- ii. αγώγιμα υφάσματα: λιγότερο από  $10^6 \Omega$ .
- iii. στατικά υλικά: από  $10^6$  έως  $10^{12} \Omega$ .
- iv. αντιστατικά υφάσματα: από  $10^{10}$  έως  $10^{12} \Omega$ .
- v. μονωτικά υφάσματα άνω των  $10^{12} \Omega$ .

Πολλές συνθετικές ίνες που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή αγώγιμων υφασμάτων είναι μονωτές με ειδική αντίσταση περίπου  $10^{15} \Omega$ , τιμή πολύ υψηλότερη από τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε υλικά ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης. Για παράδειγμα, τα καλύτερα ποιοτικά αντιστατικά-ηλεκτροστατικά ρούχα πρέπει να έχουν ειδική επιφανειακή αντίσταση μεταξύ  $10^5 \Omega$  και  $10^9 \Omega$ . Τα αντιστατικά και ηλεκτροστατικά υφάσματα έχουν ειδική αντίσταση μεταξύ  $10^9 \Omega$  και  $10^{13} \Omega$  και για υφάσματα που διαχέουν στατικό φορτίο μεταξύ  $10^2 \Omega$  και  $10^6 \Omega$  και για υλικά θωράκισης μικρότερη από  $10^2 \Omega$ .

Επειδή τα απλά πολυμερή υλικά είναι ηλεκτρικά μη αγώγιμα, η επιφανειακή αντίσταση τέτοιων υλικών είναι συνήθως υψηλότερη από  $10^{12} \Omega$ . Έτσι τα ηλεκτρόνια μπορούν εύκολα να συσσωρευτούν στην επιφάνεια του πολυμερούς και να δημιουργήσουν υψηλή τάση σε σύντομο χρονικό διάστημα, η οποία μπορεί να καταστρέψει μηχανικά στοιχεία ή ακόμα και να προκαλέσει έκρηξη. Οι διαδικασίες για την παραγωγή αγώγιμων πολυμερών μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες: διεργασίες με τις οποίες το ίδιο το πολυμερές παράγεται ως αγώγιμο και διεργασίες όπου αγώγιμα σωματίδια (σκόνες μετάλλων, ίνες, κ.λπ.) εισάγονται στη μήτρα του πολυμερούς κατά τη διαδικασία κατασκευής [43].



### 1.3 Τεχνικές διαμόρφωσης αγώγιμων υφασμάτων

Από τη μικροσκοπική έως τη μακροσκοπική κλίμακα, το ύφασμα αποτελείται από ίνες και νήματα. Το πρώτο είναι το βασικό στοιχείο της ύλης των υφασμάτων, ενώ το δεύτερο είναι ένα ενδιάμεσο υλικό μεταξύ ινών και υφασμάτων, που αποτελείται από συμπλεγμένες ίνες. Και τα δύο συστατικά μπορούν να γίνουν αγώγιμα εφαρμόζοντας διαφορετικές τεχνικές όπως το πλέξιμο, η ύφανση και το κέντημα.

Οι διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για τα έξυπνα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα είναι οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιούνται για τα κανονικά υφάσματα. Ένα πλεκτό ύφασμα είναι φτιαγμένο από ένα μόνο νήμα που τυλίγεται συνεχώς για να δημιουργήσει ένα σχήμα πλεξούδας και με τη χρήση βελόνας συνδέονται μια σειρά από νήματα. Αυτή η τεχνολογία κατασκευής έχει πολλά πλεονεκτήματα όπως άνεση στο δέρμα, χαμηλό βάρος και υψηλή ελαστικότητα. Μάλιστα το πλεκτό ύφασμα είναι ελαφρώς πιο ελαστικό σε πλάτος παρά σε μήκος, αλλά αν τεντωθεί πάρα πολύ μπορεί να χάσει το σχήμα του. Ένα άλλο πρόβλημα αφορά τις ενδιάμεσες επαφές μεταξύ των νημάτων που μπορούν να δημιουργήσουν διακυμάνσεις στην ηλεκτρική αντίσταση [44].

Τα πλεκτά υφάσματα παρέχουν ελαστικότητα και έλεγχο θερμοκρασίας και έτσι προτιμώνται σε αντίστοιχες εφαρμογές που απαιτείται θερμότητα και άνεση παρόλο που συρρικνώνονται όταν πλένονται συχνά. Τα υφάσματα που παράγονται σε επίπεδη ή σωληνοειδή μορφή, είναι εξαιρετικά ελαστικά. Χάρη στην υψηλή τιμή τάσης κατά την κατασκευή, τα υφάσματα έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και είναι λιγότερο πιθανό να συρρικνωθούν κατά το πλύσιμο, καθώς και να χάσουν το χρώμα τους. Τα πλεκτά υφάσματα και τα υφαντά παράγονται μαζικά χρησιμοποιώντας τη πλεκτομηχανή ή την μηχανή αργαλειού, αντίστοιχα [45].

Μια άλλη τεχνική είναι το κέντημα (embroidery), που αποτελεί μια διακόσμηση από αγώγιμα σχέδια επάνω σε υφασμάτινη επιφάνεια. Αυτή παρουσιάζει ενδιαφέρον στον τομέα των έξυπνων κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων λόγω της δυνατότητας τοποθέτησης του υλικού βάσης προς όλες τις κατευθύνσεις και όχι σε προκαθορισμένες. Έτσι μπορεί να επιτευχθεί ενισχυμένη επαφή ανάμεσα στο δέρμα και στο ηλεκτρόδιο [46],[47].

Μη υφασμάτινα υποστρώματα κατασκευάζονται συχνά από υψηλής ποιότητας ίνες με ανθεκτικές ιδιότητες που μπορούν μετατρέψουν ένα δισδιάστατο υπόστρωμα σε τρισδιάστατο προϊόν. Λειτουργούν ως ένθετα, επιθέματα ή ως στηρίγματα για υποστήριξη στο εξωτερικό κέλυφος σε υφάσματα ή χρησιμοποιούνται ως επενδύσεις. Επιπλέον, η επιφάνεια, η δομή, η πυκνότητα, το πορώδες και το πάχος των μη υφασμάτινων υποστρωμάτων μπορούν να ελεγχθούν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παραγωγής με ταχύτερο και φθηνότερο τρόπο.

Ωστόσο, τα υφασμάτινα είναι πιο άνετα στη χρήση καθώς είναι πιο εύκαμπτα και αναπνέουν από τα μη υφασμάτινα, τα οποία εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και την υγρασία [48]. Όλες οι τεχνολογίες κατασκευής που περιγράφονται παραπάνω (ύφανση, πλέξιμο και κέντημα) έχουν πολλά μειονεκτήματα όπως πολύπλοκες διαδικασίες παραγωγής, περιορισμούς σε τύπο υφασμάτων και η αναπόφευκτη βλάβη των φυσικών ιδιοτήτων των υφασμάτων. Για αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν τεχνολογίες εκτύπωσης, όπως screen printing, inkjet και flexographic για τη δημιουργία αγώγιμων σχεδίων στο υφαντικό υπόστρωμα επιτρέποντας την μείωση του κόστους παραγωγής αλλά και την παραγωγή μεγάλης κλίμακας. Ένα μειονέκτημα των μεθόδων εκτύπωσης είναι ότι η απόδοση εξαρτάται από τη διείσδυση του μελανιού στο υπόστρωμα, επομένως βελτιστοποιείται όταν η επιφάνεια είναι λεία και επίπεδη, και έτσι το μελάνι δεν διασκορπίζεται στην εσωτερική επιφάνεια του υποστρώματος. Άλλη μία πρόκληση είναι η ανθεκτικότητα του τυπωμένου σχεδίου σε παρατεταμένη χρήση [49].

Η παραδοσιακή διαδικασία κεντήματος (embroidery) δημιουργεί αισθητικά σχήματα χρησιμοποιώντας χρωματιστές κλωστές σε ένα υλικό ύφασμα βάσης. Με τη χρήση ειδικών αγώγιμων νημάτων, φορέσιμες κεραιές μπορούν να κεντηθούν στο βασικό ύφασμα. Η τεχνολογία έχει προχωρήσει τόσο ώστε μια ψηφιακή εικόνα να μπορεί απευθείας με τη χρήση μηχανής και τη



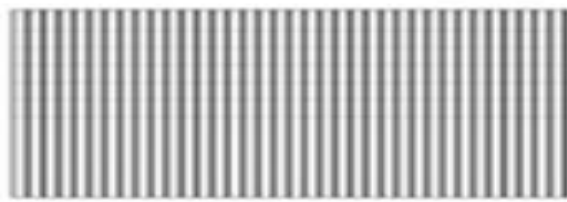
βοήθεια υπολογιστή να αποτυπωθεί πάνω σε ύφασμα. Τα αγώγιμα νήματα πρέπει να επιδεικνύουν κατάλληλη ευκαμψία και αντοχή ώστε να μην σπάνε από τις υψηλές τάσεις που εφαρμόζονται.

Μόλις τα αγώγιμα νήματα χαρακτηριστούν τότε είναι ευκολότερο να βρεθούν τεχνικές για τη βελτίωση της απόδοσης της φορέσιμης συσκευής όπως για παράδειγμα χρησιμοποιώντας υψηλότερη πυκνότητα ραφής. Τα αγώγιμα νήματα με υψηλή αντίσταση αποδίδουν φτωχό συντελεστή S21 σε μετρήσεις γραμμών μεταφοράς [50]. Μετά τον χαρακτηρισμό των αγώγιμων νημάτων και του υφασμάτινου υποστρώματος, ακολουθεί το σχέδιο της κεντημένης υφασμάτινης κεραίας. Απαιτείται μια λεπτομερής μέθοδος προσομοίωσης για τη μοντελοποίηση των επιδράσεων της κατεύθυνσης και της φύσης των νημάτων [51].

Η τεχνική κεντήματος πλεονεκτεί σε σύγκριση με άλλες μεθόδους επειδή εφαρμόζεται για μαζική παραγωγή ενδυμάτων με ενσωματωμένες συσκευές. Καθώς τα ρεύματα στις κεντημένες κεραίες προτιμούν να ρέουν κατά μήκος των νημάτων και όχι από νήμα σε νήμα, προσφέρονται για την κατασκευή γραμμικών κεραιών όπως δίπολα ή σπείρες. Ο σχεδιασμός των σπειρών ή των δίπολων σε αντίθεση με τις patch κεραίες απαιτεί μειωμένο μήκος νήματος και ως εκ τούτου μειωμένο κόστος. Οι ηλεκτρονικές μηχανές κεντήματος επιτρέπουν τη δημιουργία επαναλαμβανόμενων γεωμετριών. Καθώς δεν απαιτείται μάσκα, η τεχνική κεντήματος μπορεί να φτιάξει μοναδικά αντικείμενα κατά παραγγελία ενώ η χρήση κόλλας δεν είναι πάντα προϋπόθεση για τη σύνδεση των υφασμάτινων στρωμάτων μεταξύ τους και αυτό μπορεί να βελτιώσει το πλύσιμο ενός ρούχου με ενσωματωμένη κεραία [52].

## 1.4 Επίδραση της πυκνότητας και της κατεύθυνσης κεντήματος

Τόσο η κατεύθυνση της βελονιάς όσο και η πυκνότητα της μπορεί να είναι πολύ σημαντικές για την λειτουργία μίας φορέσιμης κεραίας. Ο κάθετος προσανατολισμός του νήματος (**Εικόνα 2.4.i**) είναι η προτιμώμενη κατεύθυνση για τον πρώτο ρυθμό ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματα δείχνουν καλύτερη απόδοση για κεραίες μεγαλύτερης πυκνότητας βελονιάς. Κεραίες με διαγώνια κατεύθυνση βελονιάς (**Εικόνα 2.4.ii**) τείνουν να αποδίδουν καλύτερα από τις κεραίες με οριζόντια κατεύθυνση (**Εικόνα 2.4.iii**). Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο ότι υπάρχει μια συνιστώσα του ρεύματος που ρέει προς την προτιμώμενη κατεύθυνση. Οι συχνότητες συντονισμού για την οριζόντια και διαγώνια κατεύθυνση είναι χαμηλότερα από αυτές για την κάθετη κατεύθυνση βελονιάς. Πιθανές αιτίες για αυτό το φαινόμενο μπορεί να είναι η αύξηση του μήκους διαδρομής του ρεύματος και η πιθανή αυξημένη αυτεπαγωγή και χωρητικότητα που προκαλούνται από την ανισότροπη φύση του αγωγού [53].



**Εικόνα 1.4.i:** Κάθετος προσανατολισμός



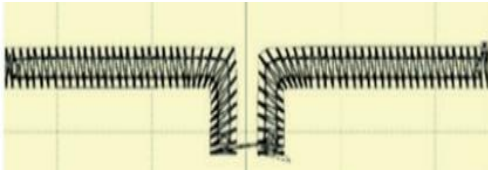
**Εικόνα 1.4.ii** Διαγώνιος προσανατολισμός



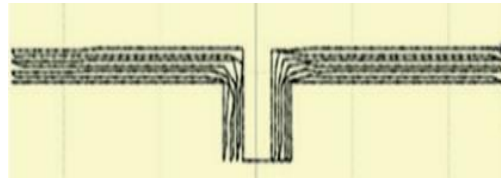
**Εικόνα 1.4.iii** Οριζόντιος προσανατολισμός

Το satin μοτίβο κεντήματος (**Εικόνα 2.4.iv**) ταιριάζει πολύ σε στενές στήλες και σχήματα και ταιριάζει με τη γεωμετρία του διπόλου με ακρίβεια. Η απόσταση βελονιάς ανταποκρίνεται στην απόσταση μεταξύ δύο διεισδύσεων βελόνας στην ίδια πλευρά μιας στήλης. Για στενές στήλες οι βελονιές είναι στενές και επομένως απαιτούνται λιγότερες βελονιές για να καλυφθεί το ύφασμα. Σε περιοχές με πολύ στενές στήλες, λιγότερο πυκνές βελονιές απαιτούνται επειδή η υπερβολική διείσδυση της βελόνας μπορεί να καταστρέψει το δείγμα του υφάσματος. Όσο μεγαλύτερο είναι το κενό μεταξύ των βελονιών, τόσο μικρότερη είναι η πυκνότητα [54].

Ένα δεύτερο μοτίβο γεμίσματος είναι το contour (**Εικόνα 2.4.v**). Αυτή η τεχνική κεντήματος δημιουργεί μια ψευδαίσθηση κίνησης σε αντίθεση με το μοτίβο satin. Δημιουργεί σειρές βελονιών κατά μήκος του σχήματος του διπόλου. Ο αριθμός των γραμμών βελονιάς είναι σταθερός, επομένως η ραφή είναι πιο πυκνή για στενότερες γεωμετρικές κεραίας [54].



**Εικόνα 1.4.iv:** Satin μοτίβο κεντήματος



**Εικόνα 1.4.v:**Contour μοτίβο κεντήματος

Η απόδοση μίας κεντημένης φορέσιμης κεραίας όσον αφορά τον συντελεστή ανάκλασης, το εύρος ζώνης, το κέρδος, την κατευθυντικότητα και την απόδοση εξαρτάται από την απόσταση των βελονιών (stitch spacing) των αγώγιμων νημάτων. Η στενότερη απόσταση βελονιάς μπορεί να βελτιώσει την ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ τους και βελτιώνει την απόδοση της κεραίας [55]. Η πρόκληση είναι να εξισορροπηθεί η απαιτούμενη αποτελεσματικότητα με το κόστος. Το κύριο πλεονέκτημα της τεχνικής του κεντήματος σε σχέση με την ύφανση και το πλέξιμο είναι ότι η αντίσταση (sheet resistance) μπορεί να ρυθμιστεί ελέγχοντας την απόσταση μεταξύ των βελονιών, το μήκος της βελονιάς, την κατεύθυνση βελονιάς και το σχέδιο βελονιάς [56].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Επιρροή του ανθρώπινου σώματος στη λειτουργία των φορέσιμων κεραιών

#### 2.1 Μετατόπιση συχνότητας, υποβάθμιση απόδοσης και παραμόρφωση της ακτινοβολίας

Οι φορέσιμες κεραιές τοποθετούνται σε κοντινή απόσταση από το ανθρώπινο σώμα. Αυτή η κατάσταση διαμορφώνει υψηλή διηλεκτρική σταθερά και απώλεια, τα οποία επιφέρουν επιζήμιες και επιβλαβείς επιπτώσεις στην αποτελεσματικότητα και την εμπέδηση της εισόδου της κεραιάς. Το ανθρώπινο σώμα έχει αντίκτυπο στα χαρακτηριστικά εμπέδησης των γραμμών μεταφοράς. Προκαλεί δυσκολία προσαρμογής, εναλλαγές ηλεκτρικού μήκους και αύξηση απωλειών. Αυτά τα αποτελέσματα προκαλούνται από τα χαρακτηριστικά του ανθρώπινου σώματος τα οποία επιδεικνύουν υψηλή αγωγιμότητα και υψηλή διαπερατότητα.

Η ηλεκτρομαγνητική σύζευξη μεταξύ της κεραιάς και του ανθρώπινου ιστού επηρεάζει την συχνότητα συντονισμού, την απόδοση και το κέρδος [57]. Ταυτόχρονα, η ακτινοβολία της κεραιάς έχει δυσμενείς επιπτώσεις στο ανθρώπινο σωματικό ιστό. Μία από τις προκλήσεις στην ανάπτυξη μοντέλων για τη δοκιμή φορέσιμων κεραιών είναι το γεγονός ότι οι άνθρωποι ιστοί είναι πολύπλοκα πολυστρωματικά υλικά που έχουν μεγάλου εύρους ηλεκτρικές ιδιότητες εξαρτώμενες από τη συχνότητα. Επιπλέον, αυτές οι ιδιότητες ποικίλλουν ανάλογα με την ηλικία και διαφέρουν από το ένα άτομο στο άλλο.

Η μη ιονίζουσα ακτινοβολία έχει την ικανότητα και επαρκή ενέργεια για την αύξηση της θερμοκρασίας των κυττάρων και για την κινητοποίηση τους. Η άνοδος της θερμοκρασίας έχει σημαντικό αντίκτυπο στους ανθρώπινους ιστούς, με αποτέλεσμα τη διηλεκτρική θέρμανση. Αυτό το θερμικό αποτέλεσμα είναι η επακόλουθη επίδραση της ακτινοβολίας μικροκυμάτων, γεγονός που προκαλείται από τη θέρμανση του διηλεκτρικού υλικού μέσω των περιστροφών των πολικών μορίων που προκαλεί το ΗΜ πεδίο [58].

Η διαπερατότητα των ανθρώπινων ιστών ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του (δέρμα, λίπος, μυς, κ.λπ.) και τη συχνότητα λειτουργίας. Αυτές οι διακριτές τιμές διαπερατότητας και αγωγιμότητας επηρεάζουν την ισχύ που απορροφάται από το σώμα και ως εκ τούτου μειώνουν την ακτινοβολία απόδοσης της κεραιάς. Έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει αυξημένη απώλεια ακτινοβολίας όταν η κεραιά τοποθετείται στο στήθος σε σύγκριση με όταν τοποθετείται στον άνω βραχίονα. Επιπλέον, η γεινίαση της κεραιάς με το σώμα χαμηλώνει το συντελεστή Q της κεραιάς ενώ η κεραιά φαίνεται να είναι ηλεκτρικά μεγαλύτερη και να ακτινοβολεί σε χαμηλότερες συχνότητες σε σύγκριση με τον ελεύθερο χώρο [59].

Καθώς οι φορητές κεραιές εφαρμόζονται σε ζωντανούς οργανισμούς, μηχανικές παραμορφώσεις όπως η κάμψη είναι αναπόφευκτες κατά τη χρήση υφασμάτων ή ελαστικών υλικών. Είναι γνωστό ότι η κάμψη της κεραιάς προς κάποια συγκεκριμένη κατεύθυνση υποβαθμίζει την απόδοσή της [60]. Αυτό δεν αφορά μόνο την μετατόπιση της συχνότητας συντονισμού, αλλά επηρεάζει επίσης την πόλωση της κεραιάς, ειδικά όταν απαιτείται κυκλική πόλωση [61].

Παρατηρείται ότι η κάμψη της κεραίας έχει ισχυρή επίδραση στο συντελεστή S11 οδηγώντας σε μετατόπιση της συχνότητας συντονισμού και σε μεταβολή της ελάχιστης τιμής του. Μία από τις τεχνικές για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων αυτών είναι η εξασφάλιση λειτουργίας ευρείας ζώνης. Επίσης, μπορούν να σχεδιαστούν όσο το δυνατόν πιο συμμετρικές ώστε να επηρεάζονται ελάχιστα παρά το γεγονός ότι είναι λυγισμένες σε διαφορετικές κατευθύνσεις [62].

## 2.2 Ανάλυση SAR για την αξιολόγηση των επιδόσεων της κεραίας όταν αυτή βρίσκεται κοντά στο ανθρώπινο σώμα

Η φύση του ανθρώπινου σώματος καθιστά την κεραία λιγότερο αποδοτικό ακτινοβολητή λόγω αδυναμίας προσαρμογής της σύνθετης αντίστασης μεταξύ κεραίας και γραμμής μετάδοσης. Όταν οι κεραίες τοποθετούνται στο ανθρώπινο σώμα, η κάμψη έχει ως αποτέλεσμα την μετατόπιση της συχνότητας συντονισμού καθώς και την μείωση της απόδοσης. Το ανθρώπινο σώμα λειτουργεί ως απορροφητής του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μειώνοντας έτσι την μέγιστη απολαβή των κεραίων.

Ο δείκτης SAR (specific absorption coefficient) εκφράζει τον ρυθμό με τον οποίο η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια (W) απορροφάται από ανθρώπινο βιολογικό ιστό όγκου (V) και πυκνότητας ρ όταν αυτός εκτίθεται στην ακτινοβολία μιας κεραίας και υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέση:

$$SAR = \frac{d}{dt} \left( \frac{dW}{\rho dV} \right) \quad (2.1)$$

Ο δείκτης μπορεί να υπολογιστεί και από την παρακάτω σχέση (2) στην οποία (E) είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στον ανθρώπινο ιστό και σ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του ιστού (S/m):

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad (2.2)$$

Για τον έλεγχο της πιθανότητας υψηλών τοπικών τιμών, ο μέγιστος επιτρεπόμενος δείκτης καθορίζεται σε 1g ή 10g ιστού. Τα γενικά επιτρεπόμενα όρια έκθεσης είναι 1.6W/Kg και 2W/kg για ιστό 1g και 10g αντίστοιχα [11]. Στα προγράμματα προσομοιώσεων λειτουργίας κεραίων το ανθρώπινο σώμα προσεγγίζεται ως ένας κύβος με τέσσερα στρώματα ανθρώπινων ιστών τα οποία είναι δέρμα, λίπος, μύες και κόκκαλα. Οι ιστοί με μεγαλύτερη ποσότητα νερού παρουσιάζουν μεγαλύτερη επιδεκτικότητα και αγωγιμότητα. Όταν τα μικροκύματα διαδίδονται μέσα στους ιστούς αυτούς τότε εμφανίζεται μεγαλύτερη εξασθένηση λόγω αυξημένης απορρόφησης. Μία τεχνική που χρησιμοποιείται για την αύξηση της απόδοσης της κεραίας προτείνει την εισαγωγή ενός αποστάτη (spacer) ανάμεσα στην κεραία και στο ανθρώπινο σώμα [12]. Το υλικό υποστρώματος είναι πολύ σημαντικό καθώς αν παρουσιάζει μικρές απώλειες τότε υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα για αυξημένη απόδοση κεραίας.

Για την αύξηση του εύρους ζώνης της κεραίας ακολουθούνται μέθοδοι όπως παχύτερο υπόστρωμα, υπόστρωμα μικρότερης διηλεκτρικής σταθεράς, εισαγωγή slots. Το εύρος ζώνης και το μέγεθος είναι συγκρουόμενες ποσότητες στις κεραίες. Κατά το σχεδιασμό θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι αυξάνοντας το πάχος του υποστρώματος, αυξάνεται το εύρος ζώνης αλλά αυξάνεται και το μέγεθος της κεραίας.

Εξ 'ορισμού η τιμή του SAR, εξαρτάται από παράγοντες όπως η συχνότητα λειτουργίας, η ένταση του εκάστοτε πεδίου, η απόσταση ανάμεσα στην κεραία και το σώμα του χρήστη, αλλά και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του εκτιθέμενου σώματος. Οποιαδήποτε αλλαγή στους παραπάνω παράγοντες, προκαλεί αντίστοιχη αλλαγή στην θερμοκρασία των βιολογικών ιστών, διότι η απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας προκαλεί αλλαγές στην θερμοκρασία. Το ανθρώπινο σώμα έχει την δυνατότητα να προσαρμοστεί και να διαχειριστεί την επιπλέον ενέργεια που απορροφά χωρίς ιδιαίτερη αλλαγή στην θερμοκρασία λόγω της λειτουργίας της ομοιόστασης.

Η σύσταση των ιστών και ειδικά το πάχος του λιπώδους ιστού διαφέρει σημαντικά από άνθρωπο σε άνθρωπο, αλλά ακόμα και στον ίδιο άνθρωπο δεν παραμένει σταθερό με την πάροδο του χρόνου καθώς μπορεί να αυξομειωθεί η μάζα του. Το μακρινό πεδίο της κεραίας επηρεάζεται επίσης από την ηλικία και το φύλο του κάθε ανθρώπου, όπως επίσης και από το μέγεθος του σώματος του, το σχήμα και τη στάση του. Οι κινήσεις του σώματος αλλάζουν επίσης συνεχώς το περιβάλλον της κεραίας. Είναι γνωστό ότι κάθε αλλαγή στην διηλεκτρική σταθερά ή στην ειδική αγωγιμότητα των υλικών που βρίσκονται στο κοντινό πεδίο της κεραίας αλλάζει τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας της.

Οι ιστοί περιέχουν τόσο μονωτικά υλικά (λιπίδια), όσο και ηλεκτρικά φορτία (ιόντα), και μπορούν να θεωρηθούν ως ασθενώς αγωγίμα μέσα (διηλεκτρικά). Η αλληλεπίδραση των συστατικών τους στοιχείων με την προσπίπτουσα ΗΜ ακτινοβολία σε κυτταρικό και μοριακό επίπεδο, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη διάδοση, εξασθένηση, ανάκλαση κ.α. των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ΗΜ) εντός και εκτός του ανθρώπινου σώματος. Εξαιτίας της παραπάνω αλληλεπίδρασης προκύπτουν οι ηλεκτρικές ιδιοτήτων των βιολογικών ιστών όπου η γνώση τους κρίνεται απαραίτητη προκειμένου να κατανοηθεί η αλληλεπίδρασή τους με τα προσπίπτοντα ΗΜ κύματα, και να καταστεί δυνατή η ανάλυση της μετάδοσης και απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η ανταλλαγή ενέργειας στους βιολογικούς ιστούς πραγματοποιείται είτε μέσω ελευθέρων φορτίων, είτε μέσω διπολικών μορίων (π.χ. μορίων νερού). Παρουσία ενός χρονικά μεταβαλλόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, τα ελεύθερα φορτία επιταχύνονται οδηγώντας στην ανάπτυξη ρεύματος και απωλειών αντίστασης, ενώ τα διπολικά μόρια επαναπροσανατολίζονται (πόλωση διπόλων).

Όταν μία κεραία λειτουργεί σε κοντινή απόσταση από το ανθρώπινο σώμα, αποσυντονίζεται και κάποιο ποσοστό της διαθέσιμης ισχύος ανακλάται προς τα πίσω και απορροφάται από το σώμα, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερες τιμές του δείκτη (SAR) [63]. Ανακριβείς διηλεκτρικές ιδιότητες προκαλούν σφάλματα σε διάφορες παραμέτρους, όπως στα διαγράμματα ακτινοβολίας, στις Η/Μ κατανομές κλπ. Μέχρι τώρα πολλών ειδών αριθμητικά ομοιώματα έχουν αναπτυχθεί που χρησιμοποιούνται είτε για θεωρητικές αναλύσεις είτε για υπολογιστικές προσομοιώσεις. Σε θεωρητικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται απλής μορφής ομοιώματα, που ονομάζονται και θεωρητικά ομοιώματα. Επιπλέον, για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών των κεραιών κοντά στο ανθρώπινο σώμα σε πραγματικές συνθήκες χρησιμοποιούνται πιο ρεαλιστικές προσεγγίσεις, όπως τα υψηλής ανάλυσης ανθρώπινα ομοιώματα [64].

Το ανθρώπινο σώμα διαμορφώνεται πολλές φορές ως μοντέλο κυβικού σώματος στα λογισμικά προσομοίωσης, αποτελούμενο από 4 στρώματα ιστών ανθρώπινου σώματος που είναι το δέρμα, το λίπος, ο μυς και τα οστά. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Tissue	$\epsilon_r$	Tan $\delta$	$\rho$	Thickness (mm)
Skin	33.6	0.378	1100	1.7
Fat	4.8	0.204	916	8
Muscle	46.2	0.370	1041	10
Bone	8.9	0.417	1990	3.3

**Πίνακας 2.1** Ηλεκτρικές ιδιότητες ιστών με το αντίστοιχο πάχος για μοντέλο ανθρώπινου σώματος σε στρώσεις [65].

Οι επιδράσεις των φαινομένων που παρατηρούνται στα ελεύθερα φορτία και στα διπολικά μόρια του ανθρώπινου σώματος, στη συνολική ένταση του πεδίου ορίζονται με τη βοήθεια της μιγαδικής διηλεκτρικής σταθεράς:

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad (2.3)$$

όπου:

$\epsilon_0$  είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού

$\epsilon_r$  είναι η μιγαδική σχετική διηλεκτρική σταθερά, που ορίζεται ως:

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j \epsilon_r'' \quad (2.4)$$

όπου:

$\epsilon_r'$  είναι σχετική διηλεκτρική σταθερά του υλικού και περιγράφει την επίδραση του εκάστοτε υλικού επί του ηλεκτρικού πεδίου και

$\epsilon_r'' = \sigma/\omega \epsilon_0$  είναι ο παράγοντας των εκτός φάσης απωλειών, όπου  $\omega$  είναι η γωνιακή συχνότητα του ΗΜ πεδίου, και  $\sigma$  η αγωγιμότητα του υλικού που περιγράφει την εξασθένιση του κύματος κατά τη μετάβαση μέσα από το υλικό μέσο.

Η εμφανιζόμενη απωλειών ορίζεται ως:

$$\tan\delta = \epsilon_r''/\epsilon_r' \quad (2.5)$$

και δείχνει τη συνιστώσα των ηλεκτρικών ιδιοτήτων που επηρεάζει, κατά κύριο λόγο, το ηλεκτρικό πεδίο. Η σχετική διηλεκτρική σταθερά ( $\epsilon_r'$ ) και η αγωγιμότητα ( $\sigma$ ) κυριαρχούν στις υψηλές και χαμηλές συχνότητες, αντίστοιχα. Βάσει των παραπάνω τύπων (3.1) και (3.2), η μιγαδική διηλεκτρική σταθερά των βιολογικών ιστών υπολογίζεται ως:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r' - j \sigma/\omega \quad (2.6)$$

Ο Ειδικός Ρυθμός Απορρόφησης (SAR) είναι το μέγεθος που συνδέεται με την απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τους βιολογικούς ιστούς και βάσει των οποίων έχουν καθοριστεί ασφαλή όρια έκθεσης για συχνότητες ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας υψηλότερες από 1 MHz. Εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως:

- Τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας (συχνότητα, πόλωση, ένταση).
- Τα χαρακτηριστικά του βιολογικού αντικειμένου, τη γεωμετρία (μέγεθος και σχήμα) και την εσωτερική δομή του.
- Την απόσταση της πηγής εκπομπής της ακτινοβολίας και των βιολογικών αντικειμένων.
- Τις ιδιότητες της γύρω περιοχής που ακτινοβολεί η κεραία.

Ο Ειδικός Ρυθμός Απορρόφησης (SAR) είναι η απορροφούμενη ισχύς σε W/kg κατά μέσο όρο σε έναν δεδομένο όγκο. Ο όγκος αυτός κινείται γύρω από την κεραία και η μέγιστη τιμή καταγράφεται.

Η ισχύς που απορροφάται από τους βιολογικούς ιστούς του ανθρώπινου σώματος κατά την πρόσπτωση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος εξαρτάται από την αγωγιμότητα  $\sigma$  των ιστών [S/m] και από την ένταση  $|E|$  του ηλεκτρικού πεδίου [V/m] εντός των βιολογικών ιστών. Η απορροφούμενη ισχύς σχετίζεται προφανώς με το ηλεκτρικό πεδίο, κατά τρόπο ώστε οι μέγιστες τιμές του ρυθμού ειδικής απορρόφησης (Specific Absorption Rate, SAR) να καταγράφονται στις περιοχές όπου προκύπτουν οι μέγιστες τιμές ηλεκτρικού πεδίου.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## Επαφές μικροκυματικών συσκευών

### 3.1 Μετάβαση από άκαμπτη σε εύκαμπτη συσκευή

Τα σύγχρονα ανθεκτικά προϊόντα υπόκεινται σε απαιτητικές συνθήκες λειτουργίας και χρειάζεται ποικιλία ποιοτικών ηλεκτρικών επαφών για βελτιωμένη απόδοση και διάρκεια ζωής σε διάφορες εφαρμογές. Η ανάγκη βελτίωσης της απόδοσης τους, οδηγεί σήμερα την πλειοψηφία των τεχνολογικών εξελίξεων. Η ζήτηση για ποιοτικές ελαφριές ηλεκτρικές επαφές εξελίσσεται ταχέως και αυξάνεται διαρκώς στην κατασκευή μεγάλης ποικιλίας ανθεκτικών προϊόντων για τον πελάτη, ώστε να διασφαλίζεται η συνεπής λειτουργία και η μέγιστη διάρκεια ζωής αυτών των προϊόντων. Ο κύριος σκοπός των ηλεκτρικών επαφών είναι να επιτρέπουν το ηλεκτρικό ρεύμα χωρίς καμία διακοπή σε όλη τη διεπαφή [66].

Η επαφή επηρεάζεται εύκολα από το εξωτερικό περιβάλλον, με αποτέλεσμα τη λειτουργική υποβάθμιση της ή ακόμη και την πλήρη αστοχία της. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να μελετηθεί η απόδοση της κάτω από διάφορες συνθήκες. Η αντίσταση της επαφής είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση μίας συσκευής στη βιομηχανία ημιαγωγών ενώ η αύξησή της θα επηρεάσει άμεσα την αξιοπιστία του σήματος που μεταδίδεται.

Η ηλεκτρική διασύνδεση των εξαρτημάτων είναι πολύ δύσκολη αφού η μηχανική συμπεριφορά του υφάσματος πρέπει να διατηρηθεί και η δυνατότητα πλυσίματος πρέπει να είναι εγγυημένη. Οι διασυνδέσεις είναι ηλεκτροαγώγιμες και πρέπει να είναι σε επαφή με κάποιο είδος τροφοδοσίας. Η διασύνδεση των εξαρτημάτων μπορεί να γίνει ράβοντας ή κεντώντας ένα αγωγίμο νήμα από ένα στοιχείο στο επόμενο. Αν τα συνδετικά νήματα αποτελούν μέρος του υφάσματος τότε επιτυγχάνονται πιο συμπαγείς συνδέσεις με λιγότερα στάδια κατασκευής, που σημαίνει μικρότεροι χρόνοι παραγωγής και χαμηλότερο κόστος.

Στα αρχικά στάδια εξέλιξης των ηλεκτρονικών υφασμάτων, απλά χάλκινα σύρματα προσαρτώνταν μετά την παραγωγή του ρουχισμού. Αργότερα, διαφορετικές μέθοδοι άρχισαν να χρησιμοποιούνται όπως κέντημα του νήματος, ηλεκτροαγώγιμα υφάσματα, αγωγίμο μελάνια, αγωγίμο ταινίες, αγωγίμο κόλλες [67]. Άλλη μέθοδος είναι η προσθήκη αγωγιμότητας όταν το ρούχο είναι ακόμα επίπεδο ύφασμα. Οι απώλειες αγωγιμότητας στις διασυνδέσεις έχουν κυρίως χημικές και μηχανικές αιτίες. Εάν η διασύνδεση είναι κατασκευασμένη από κόλλα ή μελάνι, το υπεριώδες φως μπορεί να είναι αρκετά ενεργητικό ώστε να αλλάξει χημικά το πολυμερές, μπορεί να έχει παρεμβολή στην αγωγιμότητα ή να κάνει το πολυμερές να καταρρεύσει. Οξυγόνο, νερό, διαλύτες και άλλες χημικές ουσίες μπορούν επίσης να αντιδράσουν με τις διασυνδέσεις. Τα οξέα, οι βάσεις όπως και άλλα ηλεκτροαγώγιμα ρευστά μπορούν να διαβρώσουν τους αγωγούς και να δημιουργήσουν βραχυκύκλωμα. Μηχανικά, τα αγωγίμο υλικά μπορούν να σπάσουν και υλικά όπως οι ίνες άνθρακα και ο πολύ λεπτός χαλκός είναι εύθραυστα και σπάνε εύκολα ενώ άλλα υλικά όπως οι εύκαμπτες πλακέτες κυκλωμάτων είναι ευαίσθητα. Τα νήματα από ανοξείδωτο χάλυβα είναι μηχανικά πολύ δυνατά και έχουν μικρό πρόβλημα με την μηχανική τριβή.

### 3.2 Εισαγωγή στο πρόγραμμα CST Studio Suite

Το CST (Computer Simulation Technology) Studio Suite είναι ένα πακέτο λογισμικού ανάλυσης 3D υψηλής απόδοσης για το σχεδιασμό, την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση ηλεκτρομαγνητικών στοιχείων και συστημάτων. Τα θέματα της ανάλυσης περιλαμβάνουν την απόδοση κεραιών και φίλτρων, την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και τις παρεμβολές, την έκθεση του ανθρώπινου σώματος σε πεδία ΗΜ, τις ηλεκτρομηχανικές επιδράσεις σε κινητήρες και γεννήτριες και τις θερμικές επιδράσεις σε συσκευές υψηλής ισχύος.

Προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, διευκολύνοντας συντομότερους κύκλους ανάπτυξης και μειωμένο κόστος. Η προσομοίωση επιτρέπει στους μηχανικούς να πειραματιστούν με εικονικά πρωτότυπα ακόμη και στα πρώτα στάδια της διαδικασίας σχεδιασμού, να συγκρίνουν την απόδοση διαφορετικών διαμορφώσεων και να βελτιστοποιήσουν τα προϊόντα τους. Η προσομοίωση μπορεί να μειώσει τον αριθμό των φυσικών πρωτοτύπων που απαιτούνται και να συντομεύσει τη διαδικασία ανάπτυξης, μειώνοντας τόσο το κόστος όσο και τον χρόνο διάθεσης στην αγορά. Τα προϊόντα μπορούν να προσομοιωθούν ως μέρος ενός ρεαλιστικού συστήματος, να αναλυθεί η εγκατεστημένη απόδοσή τους και να επαληθευτεί ότι πληρούν την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) και τα όρια έκθεσης. Η απόδοση της συσκευής μπορεί να βελτιστοποιηθεί, πιθανά ζητήματα συμμόρφωσης να εντοπιστούν και να μετριαστούν νωρίς στη διαδικασία σχεδιασμού, ο αριθμός των απαιτούμενων φυσικών πρωτοτύπων μπορεί να μειωθεί και να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος αποτυχιών δοκιμών και ανακλήσεων.

Η ανάλυση πεδίου χρόνου (time domain) βασίζεται στην τεχνική πεπερασμένης ολοκλήρωσης (FIT) που περιγράφει τις εξισώσεις του Maxwell σε ένα χώρο πλέγματος χρόνου, ενώ η ανάλυση πεδίου συχνότητας (frequency domain) βασίζεται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Το πρόγραμμα επιλύει αριθμητικά τις εξισώσεις Maxwell με στόχο την εύρεση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στο χώρο και στο χρόνο και είναι ειδικά σχεδιασμένο για υψηλές συχνότητες (στην περιοχή των μικροκυμάτων). Για το σκοπό αυτό διαθέτει διάφορους αλγορίθμους επίλυσης κατάλληλους για προσομοίωση διαφορετικών τύπων προβλημάτων. Αυτοί είναι:

- i. Transient Solver: Εκτελεί προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου. Είναι κατάλληλος ιδιαίτερα για μεγάλο εύρος συχνοτήτων, αλλά και για διατάξεις με μεγάλες διαστάσεις. Χρησιμοποιείται επίσης για την προσομοίωση μεταβατικών φαινομένων.
- ii. Frequency solver: Εκτελεί προσομοίωση στο πεδίο των συχνοτήτων. Είναι κατάλληλος κυρίως όταν το εύρος ζώνης που ενδιαφέρει είναι μικρό. Τα αποτελέσματά του αφορούν τη μόνιμη κατάσταση.
- iii. Eigenmode Solver: Υπολογίζει ιδιοσυχνότητες για όλη τη διάταξη. Είναι κατάλληλος για τη μελέτη μικροκυματικών κοιλοτήτων και μικροκυματικών φίλτρων.
- iv. Integral Equation solver / Asymptotic solver: Είναι κατάλληλοι για ηλεκτρικά μεγάλες διατάξεις. Τυπική εφαρμογή τους είναι ο υπολογισμός των στοιχείων ακτινοβολίας κεραιών.
- v. Thermal Stationary/Transient Solvers: Κατάλληλοι για τη μελέτη κατανομής θερμικού φορτίου στις μικροκυματικές διατάξεις.

Η σχεδίαση της διάταξης γίνεται σε τρεις διαστάσεις. Η διάταξη θεωρείται ότι αποτελείται από διαφορετικά συστατικά στοιχεία (components), κάθε ένα από τα οποία μπορεί να αποτελείται από διαφορετικά στερεά σώματα (solids). Για κάθε στοιχείο μπορεί να επιλεγεί το υλικό από το οποίο αποτελείται, είτε από μια πληθώρα υλικών από τη βιβλιοθήκη υλικών, είτε δηλώνοντας τις ηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού. Για γεωμετρικά απλά σώματα, ο απλούστερος τρόπος σχεδίασης βασίζεται στη χρήση απλών γεωμετρικών σωμάτων (ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, σφαίρα, κύλινδρος, κ.α.). Για τη σχεδίαση πιο πολύπλοκων σωμάτων, παρέχεται η δυνατότητα διενέργειας

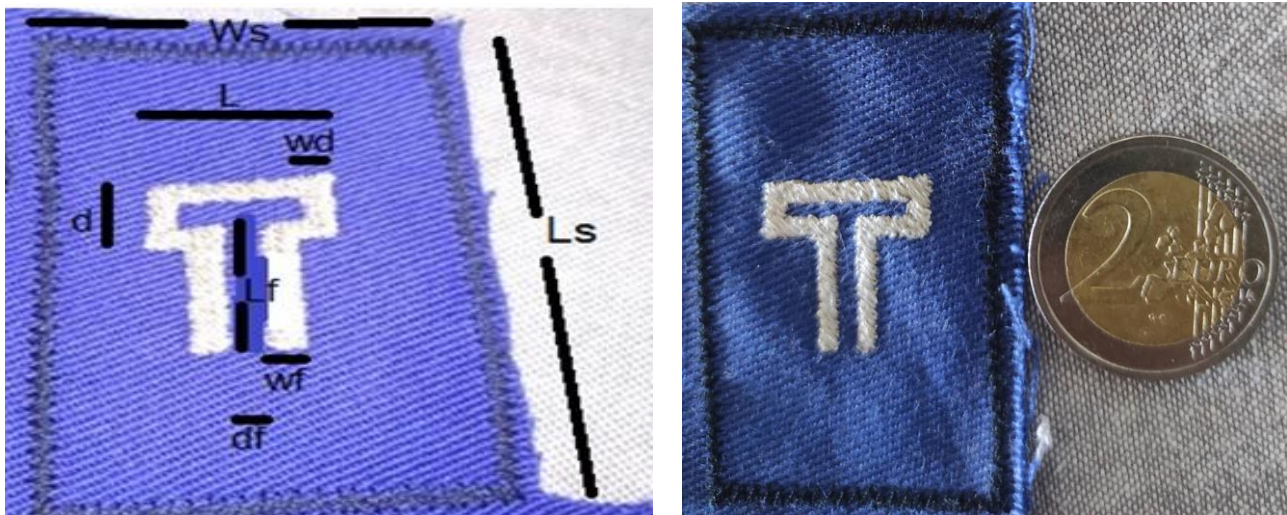
δυναμικών πράξεων ανάμεσα σε στερεά σώματα (add, subtract, intersect, insert). Επιπλέον, είναι δυνατή η χρήση των περισσότερων μεθόδων που συναντάει κανείς σε προγράμματα τρισδιάστατης σχεδίασης, όπως η μέθοδος της προβολής μιας επιφάνειας (extrude), η περιστροφή μιας επιφάνειας για τη δημιουργία στερεού εκ περιστροφής (rotate), κ.α. Έτσι, μπορεί κανείς να σχεδιάσει πρακτικά οποιαδήποτε διάταξη.

Ο χώρος υπολογισμού καθορίζεται αυτόματα από τις μέγιστες διαστάσεις των στοιχείων που απαρτίζουν τη διάταξη. Οι κατάλληλες οριακές συνθήκες στις διεπιφάνειες μεταξύ διαφορετικών υλικών λαμβάνονται αυτόματα. Οι αντίστοιχες οριακές συνθήκες όμως στα όρια του χώρου υπολογισμού θα πρέπει να οριστούν από το χρήστη. Ο χώρος υπολογισμού διακριτοποιείται στις τρεις διαστάσεις σχηματίζοντας ένα πλέγμα τριών διαστάσεων. Οι παράμετροι που καθορίζουν τη διακριτοποίηση του χώρου (πλέγμα) είναι καθοριστικές για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και είναι προσβάσιμες από το μενού Mesh. Παρόμοια διακριτοποίηση γίνεται και στο πεδίο του χρόνου. Αυτή όμως λαμβάνεται αυτόματα με βάση τη διακριτοποίηση που έχει επιλεγεί στο χώρο και με κριτήριο την ευστάθεια της μεθόδου υπολογισμού.

Όλες οι ρυθμίσεις προσομοίωσης καθορίζονται από το μενού Solve. Αυτές περιλαμβάνουν το επιθυμητό εύρος συχνοτήτων, τις οριακές συνθήκες, το υλικό υποβάθρου, τον καθορισμό της διέγερσης της διάταξης αλλά και των σημείων ανίχνευσης/μέτρησης ποσοτήτων. Από το ίδιο μενού γίνεται και η επιλογή και εκτέλεση του επιθυμητού αλγορίθμου. Τα αποτελέσματα τοποθετούνται στο δένδρο πλοήγησης, ταξινομημένα ανάλογα με το πλήθος των διαστάσεων σε 1D, 2D/3D results. Τα αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν σε μορφή ASCII, αλλά και σε μορφή εικόνας ή βίντεο. Οι επιλογές απεικόνισης των αποτελεσμάτων βρίσκονται στο μενού Results. Το ίδιο μενού παρέχει και δυνατότητα περαιτέρω επεξεργασίας των αποτελεσμάτων και υπολογισμού φυσικών ποσοτήτων.

### 3.2 Μετρήσεις με VNA και προσομοιώσεις με CST

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι μετρήσεις που έγιναν σε φορέσιμες κεραιές αναδιπλωμένου διπόλου και γίνεται σύγκριση τους με αυτές που προέκυψαν από το λογισμικό πρόγραμμα CST. Στην παρακάτω **Εικόνα 3.1** απεικονίζεται ένα δείγμα από φορέσιμη κεραιά ραμμένη σε ύφασμα nomex. Στην εικόνα φαίνονται και τα σύμβολα που επιλέχθηκαν για τις διαστάσεις της.



**Εικόνα 3.1:** Φορέσιμη κεραιά αναδιπλωμένου διπόλου

Οι κεραιές που εξετάστηκαν ήταν οι D5 και D15. Στη συνέχεια δίνονται οι διαστάσεις των κεραιών, οι μετρήσεις με τον VNA και οι προσομοιώσεις με το CST. Οι διαστάσεις της D5 είναι οι παρακάτω:

ID	Μήκος, L (mm)	Πλάτος, d (mm)	Πλάτος γραμμής, $W_d$ (mm)	Άνοιγμα γραμμής τροφοσίας, $d_f$ (mm)	Πλάτος γραμμής τροφοσίας, $W_f$ (mm)	Μήκος γραμμής τροφοσίας, $L_f$ (mm)	Μήκος υποσ/τος $L_s$ (mm)	Πλάτος υποσ/τος $W_s$ (mm)	Κατανάλωση νήματος (m)	Αριθμός ραφών
D5	15,00	6,00	2,00	2,47	1,75	12,73	52	32,5	2,18	534 / 1286

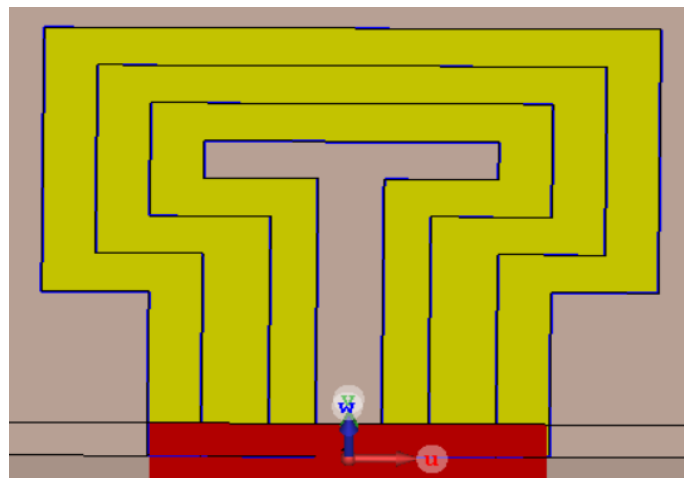
**Πίνακας 3.1:** Διαστάσεις κεραιάς αναδιπλωμένου διπόλου D5

Οι μετρήσεις με τον VNA έδωσαν τις παρακάτω τιμές:

ID	D5
<b>1st Resonance</b>	
$f_r$ (GHz)	3,592
$S_{11}$ (dB)	-46,25
$f_L$ (GHz) @ $S_{11}=-10$ dB	3,565
$f_H$ (GHz) @ $S_{11}=-10$ dB	3,69
BW (MHz)	125
SWR @ $f_r$	1,047
Re (Z) @ $f_r$	49,2
Im (Z) @ $f_r$	1,5
X(Z)@ $f_r$	67,36pH
<b>2nd Resonance</b>	
$f_r$ (GHz)	3,849
$S_{11}$ (dB)	-44,31
$f_L$ (GHz) @ $S_{11}=-10$ dB	3,795
$f_H$ (GHz) @ $S_{11}=-10$ dB	3,883
BW (MHz)	88
SWR @ $f_r$	1,04
Re (Z) @ $f_r$	50
Im (Z) @ $f_r$	0,7
X(Z)@ $f_r$	60,13pH

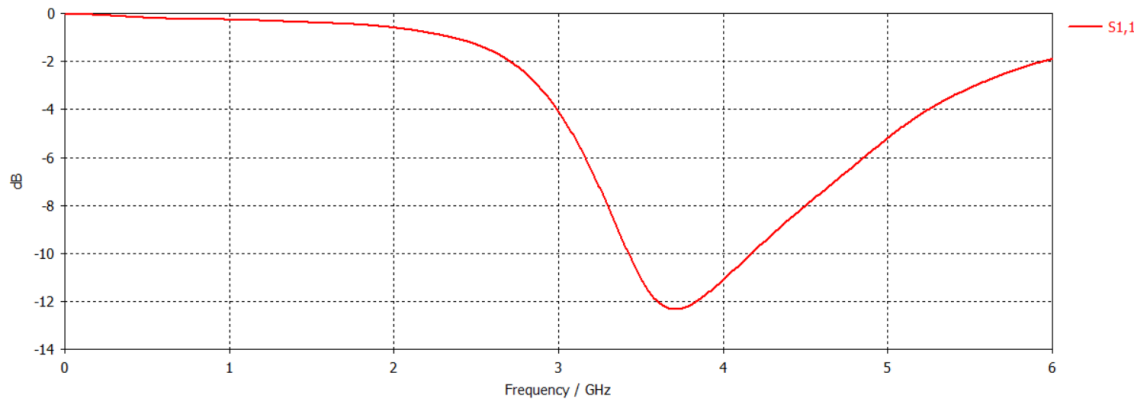
**Πίνακας 3.2:** Πίνακας μετρήσεων με VNA της κεραίας αναδιπλωμένου διπόλου D5

Στο λογισμικό CST σχεδιάστηκε η κεραία με τις ίδιες διαστάσεις που έχει η πραγματική κεραία οπότε η εικόνα που προέκυψε ήταν η ακόλουθη:

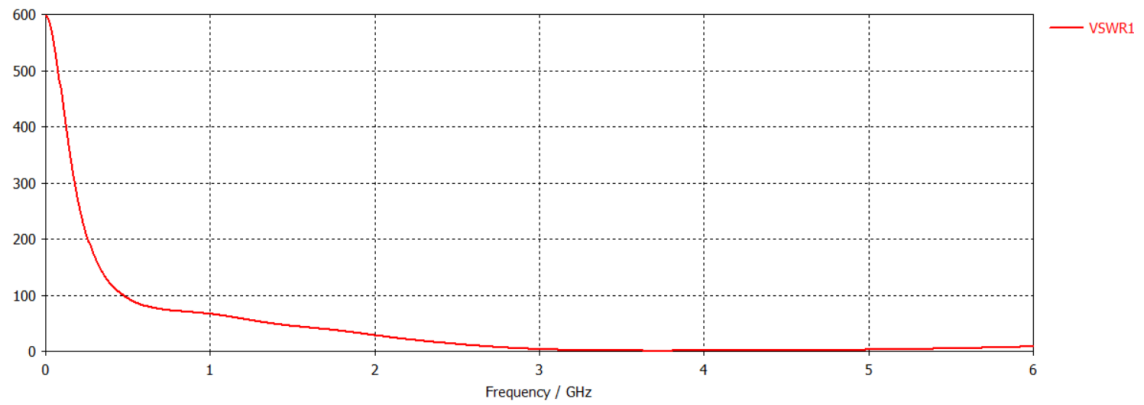


**Εικόνα 3.2:** Σχεδίαση κεραίας στο CST

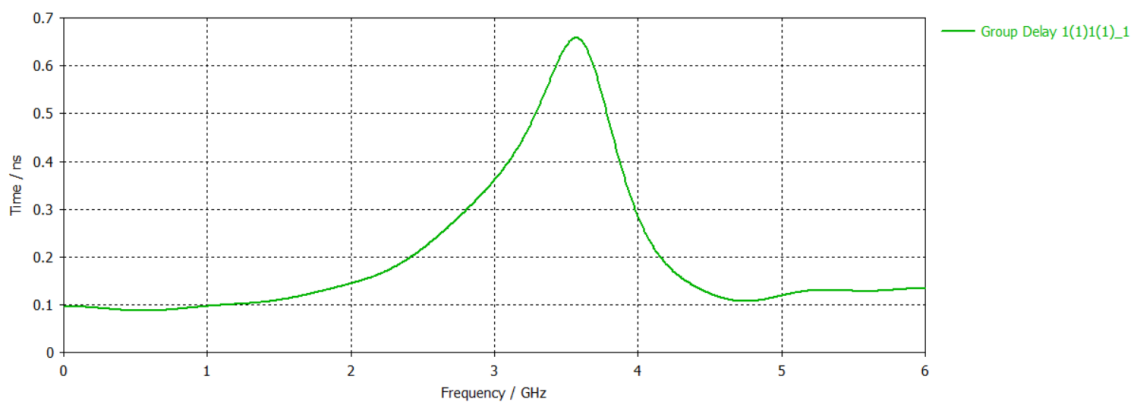
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης:



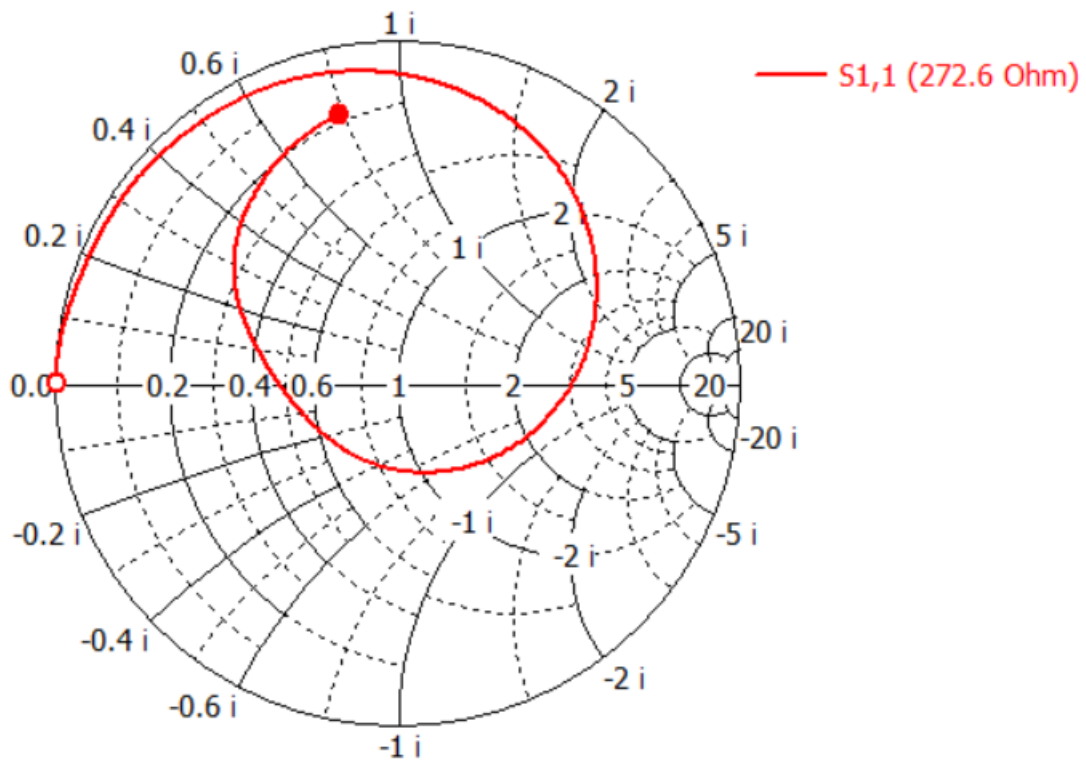
**Εικόνα 3.3:** Παράμετρος σκέδασης S11



**Εικόνα 3.4:** Παράμετρος VSWR



**Εικόνα 3.5:** Group delay



Εικόνα 3.6: Χάρτης Smith

### 3.3 Επαφές υπερήχων

Η πρόοδος των ηλεκτρονικών και των σχετικών οργάνων οδηγεί τη μαζική παραγωγή ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών ειδών και οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην ανάπτυξη της τεχνολογία συγκόλλησης. Καθώς υπάρχει έντονη ζήτηση για αυξημένη πυκνότητα των εξαρτημάτων και των διασυνδέσεων τους, συνεχίζει να προοδεύει η τεχνολογία κόλλησης. Για δεκαετίες, η διαδικασία συγκόλλησης μετάλλων με υπερήχους εξελίχθηκε ως κατάλληλη τεχνική κατασκευής για μεγάλης κλίμακας γρήγορη κατασκευή ηλεκτρικών επαφών. Μια εκτίμηση αποκαλύπτει ότι 15 τρισεκατομμύρια σύρματα ενώνονται με υπερήχους ετησίως σε μεγάλη ποικιλία εφαρμογών και αυτές οι εφαρμογές καθιστούν τη διαδικασία συγκόλλησης μετάλλων με υπερήχους πηγή για μια τεράστια αγορά με κύκλο εργασιών πολλών δισεκατομμυρίων δολαρίων [68].

Η συγκόλληση με υπερήχους σήμερα είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική για τη σύνδεση ανόμοιων μετάλλων, παρέχοντας αντοχή και ηλεκτρική αγωγιμότητα και αποφεύγοντας μεταλλουργικά ελαττώματα, όπως ο σχηματισμός εύθραυστων, διαμεταλλικών ενώσεων. Εμφανίζει επίσης αρκετά άλλα πλεονεκτήματα μεταξύ των οποίων είναι ότι δεν χρησιμοποιεί μόλυβδο, είναι φιλική προς το περιβάλλον, μπορεί να εφαρμοστεί σε μέταλλα, κεραμικά, γυαλιά και σύνθετα υλικά, χρησιμοποιεί θερμοκρασίες συγκόλλησης που κυμαίνονται από 150°C έως 480°C. Η διαδικασία είναι αξιόπιστη και οικονομικά προσιτή. Δεν χρειάζεται εργασίες πριν ή μετά τη συγκόλληση. Δεν χρησιμοποιεί αναλώσιμα οποιασδήποτε φύσης και είναι φιλική προς το χρήστη και το περιβάλλον, γρήγορη και επαναλαμβανόμενη. Ο υπέρηχος εξαλείφει τα υποκειμενικά στοιχεία στη διαδικασία συγκόλλησης, διασφαλίζοντας σταθερή ποιότητα. Η κατανάλωση ενέργειας είναι ίσως η χαμηλότερη από οποιαδήποτε άλλη διαδικασία [69]. Η εγκατάσταση είναι γρήγορη και εύκολη. Η ευελιξία του επιτρέπει την αλλαγή από τη μία εγκατάσταση στην άλλη μέσα σε λίγα λεπτά. Τα εργαλεία έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και χρειάζονται ελάχιστη ή καθόλου συντήρηση [69]. Αποτελεί μια ευέλικτη λύση για τη σύνδεση μικρών εξαρτημάτων και χρησιμοποιεί υψηλή συχνότητα δονήσεων (20 kHz ή 40 kHz) για την ανάπτυξη της διαμοριακής θερμότητας που λιώνει τις επιφάνειες διεπαφής.

Μεγάλο το πλήθος των εφαρμογών της, συγκεκριμένα προτιμάται σε ηλεκτρονικούς μετασχηματιστές, σε οπτικά γυαλιά, σε ίνες γυαλιού, σε θερμάστρες και σε κατασκευές μικρού βάρους καθώς επίσης και σε υποστρώματα λεπτής μεμβράνης, σε αισθητήρες και μαγνήτες. Ημιαγωγοί, υπεραγωγοί και ηλιακά κύτταρα κατασκευάζονται με συγκόλληση υπερήχων [70]. Η έξυπνη συγκόλληση υπερήχων είναι μια νέα τεχνολογία που συνδυάζει τη δύναμη της συμβατικής συγκόλλησης με υπερήχους με την ευελιξία, την ακρίβεια, την ταχύτητα και τα προηγμένα χαρακτηριστικά ελέγχου διαδικασίας των μηχανών συγκόλλησης σύρματος. Εκτός από την οπτική επιθεώρηση, καταστροφική και μη καταστροφική, μηχανικές δοκιμές όπως διάτμηση ή έλξη είναι κλασικές μέθοδοι για την αξιολόγηση της ποιότητας των διεργασιών υπερήχων [71].

Η παρατήρηση ορισμένων παραμέτρων κατά τη διάρκεια του χρόνου συγκόλλησης είναι σήμερα σημαντική στη συγκόλληση με υπερήχους. Οι ποσότητες που αξιολογούνται συχνά είναι το ηλεκτρικό ρεύμα, η ηλεκτρική ενέργεια, η κατακόρυφη παραμόρφωση και η συχνότητα κραδασμών. Εάν κάποια από τις παρατηρούμενες ποσότητες είναι εκτός ορισμένων ορίων, μια επαφή θεωρείται ύποπτη. Ωστόσο, αυτό δεν εγγυάται την αναγνώριση όλων των δυνητικά κακών συγκολλήσεων. Έτσι, πιο προηγμένα συστήματα ποιοτικού ελέγχου χρησιμοποιούν πρόσθετες ανεξάρτητες ποσότητες για τον προσδιορισμό της ποιότητας των επαφών [71].



### 3.4 Κεντημένες επαφές

Η ενσωμάτωση των ηλεκτρονικών στα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα απαιτεί μια αξιόπιστη επαφή και αυτό εξακολουθεί να είναι ένα ανεπαρκώς επιλυμένο πρόβλημα. Μία προσέγγιση είναι το κέντημα του αγώγιμου υφάσματος απευθείας στα ηλεκτρονικά. Η βελόνα του κεντήματος διαπερνά ένα αγώγιμο μαξιλαράκι σε ένα λεπτό υπόστρωμα και απλώνει το αγώγιμο νήμα πάνω από το μαξιλαράκι. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια ηλεκτρική επαφή μεταξύ του αγώγιμου μαξιλαριού και του αγώγιμου νήματος. Προϋπόθεση είναι το νήμα να είναι επιφανειακά αγώγιμο και να μπορεί να κεντηθεί σε μηχανή. Έχει αποδειχθεί ότι για αυτό το σκοπό μπορούν να χρησιμοποιηθούν νήματα νάilon επικαλυμμένα με ασήμι [72].

Η αντίσταση μιας κεντημένης επαφής μπορεί να οριστεί ως άθροισμα της πραγματικής αντίστασης επαφής μεταξύ του μαξιλαριού και των λίγων ινών που βρίσκονται σε επαφή με το μαξιλάρι και της αντίστασης σύσφιξης που προκύπτει από τη διανομή του ρεύματος σε όλες οι ίνες. Ωστόσο, δεν μπορεί να μετρηθεί μεμονωμένα καθώς οι βελόνες ανίχνευσης οπουδήποτε θα άλλαζαν τη δύναμη επαφής και συνεπώς την αντίσταση επαφής [72].

### 3.5 Επαφές συγκόλλησης αντίστασης

Η συγκόλληση με αντίσταση (resistance welding) είναι μια τεχνολογία συγκόλλησης που χρησιμοποιείται ευρέως στη μεταποιητική βιομηχανία για την ένωση μεταλλικών φύλλων και εξαρτημάτων. Η συγκόλληση γίνεται με τη διεξαγωγή ισχυρού ρεύματος μέσω του συνδυασμού μετάλλων για να θερμανθούν και τελικά να λιώσουν τα μέταλλα σε εντοπισμένα σημεία που προκαθορίζονται από το σχεδιασμό των ηλεκτροδίων και των προς συγκόλληση τεμαχίων. Πάντα εφαρμόζεται μια δύναμη πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την εφαρμογή ρεύματος για τον περιορισμό της περιοχής επαφής στις διεπαφές συγκόλλησης [73].

Η αρχή της συγκόλλησης με αντίσταση είναι ο νόμος του Joule όπου η θερμότητα που παράγεται είναι ανάλογη του ρεύματος, της αντίστασης των βασικών μετάλλων και των διεπαφών επαφής και του χρόνου της ροής του ρεύματος. Υπάρχουν πολλές παράμετροι, ορισμένοι ερευνητές είχαν εντοπίσει περισσότερες από 100, που επηρεάζουν τα αποτελέσματα μιας συγκόλλησης με αντίσταση.

Το ρεύμα συγκόλλησης είναι η πιο σημαντική παράμετρος στη συγκόλληση με αντίσταση που καθορίζει την παραγωγή θερμότητας. Το μέγεθος του ψήγματος συγκόλλησης αυξάνεται γρήγορα με την αύξηση του ρεύματος, αλλά το πολύ υψηλό ρεύμα θα έχει ως αποτέλεσμα αποβολές και φθορά των ηλεκτροδίων [74].

Η παραγωγή θερμότητας είναι ευθέως ανάλογη με το χρόνο συγκόλλησης. Λόγω της μεταφοράς θερμότητας από τη ζώνη συγκόλλησης στα βασικά μέταλλα και στα ηλεκτρόδια, καθώς και της απώλειας θερμότητας από τις ελεύθερες επιφάνειες στο περιβάλλον, θα χρειαστεί ένα ελάχιστο ρεύμα συγκόλλησης, καθώς και ένας ελάχιστος χρόνος συγκόλλησης για να γίνει μια συγκόλληση. Εάν το ρεύμα συγκόλλησης είναι πολύ χαμηλό, η απλή αύξηση του χρόνου συγκόλλησης από μόνη της δεν θα δημιουργήσει συγκόλληση. Όταν το ρεύμα συγκόλλησης είναι αρκετά υψηλό, το μέγεθος του τεμαχίου συγκόλλησης αυξάνεται με την αύξηση του χρόνου συγκόλλησης μέχρι να φτάσει σε μέγεθος παρόμοιο με την περιοχή επαφής του άκρου του ηλεκτροδίου. Εάν ο χρόνος συγκόλλησης παραταθεί, θα συμβεί αποβολή ή στη χειρότερη περίπτωση, το ηλεκτρόδιο μπορεί να κολλήσει στο τεμάχιο εργασίας.

Η δύναμη συγκόλλησης επηρεάζει τη διαδικασία συγκόλλησης με αντίσταση με την επίδρασή της στην αντίσταση επαφής στις διεπαφές και στην περιοχική επαφή λόγω της παραμόρφωσης των υλικών. Εάν η δύναμη συγκόλλησης είναι πολύ χαμηλή, μπορεί να συμβεί αποβολή αμέσως μετά την έναρξη του ρεύματος συγκόλλησης επειδή η αντίσταση επαφής είναι πολύ υψηλή, με αποτέλεσμα τη γρήγορη παραγωγή θερμότητας.

Η αντίσταση επαφής στη διεπαφή συγκόλλησης είναι η πιο σημαντική παράμετρος που σχετίζεται με τα υλικά. Ωστόσο, έχει μια εξαιρετικά δυναμική αλληλεπίδραση με τις παραμέτρους της διαδικασίας. Παρατηρείται ότι η αντίσταση επαφής γενικά μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας αλλά έχει τοπική μέγιστη τιμή γύρω στους 300°C και μειώνεται ανάλογα με την αύξηση της πίεσης [75].

Όλα τα μέταλλα έχουν τραχιές επιφάνειες σε μικροκλίμακα. Όταν η δύναμη συγκόλλησης αυξάνεται, η πίεση επαφής αυξάνεται και ως εκ τούτου η πραγματική επιφάνεια επαφής στη διεπιφάνεια αυξάνεται λόγω της παραμόρφωσης των ανοιγμάτων της τραχιάς επιφάνειας. Επομένως, η αντίσταση επαφής στη διεπαφή μειώνεται, γεγονός που μειώνει την παραγωγή θερμότητας και το μέγεθος του υλικού συγκόλλησης. Στις μεταλλικές επιφάνειες υπάρχουν επίσης οξείδια, υδρατμοί, λάδι και άλλοι ρύποι. Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, ορισμένοι από τους επιφανειακούς ρύπους (κυρίως με βάση το νερό και το λάδι) θα καούν στους πρώτους δύο κύκλους και τα μέταλλα θα μαλακώσουν επίσης σε υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι η αντίσταση επαφής γενικά μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Παρόλο που η αντίσταση επαφής έχει την πιο σημαντική επίδραση μόνο στους πρώτους δύο κύκλους, έχει καθοριστική επίδραση στην κατανομή θερμότητας λόγω της αρχικής παραγωγής και διανομής θερμότητας.

Σχεδόν όλες οι ιδιότητες του υλικού αλλάζουν με τη θερμοκρασία, γεγονός που αυξάνει τη δυναμική της διαδικασίας συγκόλλησης με αντίσταση. Η ειδική αντίσταση του υλικού επηρεάζει την παραγωγή θερμότητας. Η θερμική αγωγιμότητα και η θερμοχωρητικότητα επηρεάζουν τη μεταφορά θερμότητας. Σε μέταλλα όπως ο άργυρος και ο χαλκός με χαμηλή ειδική αντίσταση και υψηλή θερμική αγωγιμότητα, παράγεται λίγη θερμότητα ακόμη και με υψηλό ρεύμα συγκόλλησης και επίσης μεταφέρεται γρήγορα. Είναι μάλλον δύσκολο να συγκολληθούν με συγκόλληση με αντίσταση. Από την άλλη πλευρά, μπορούν να είναι καλά υλικά για ηλεκτρόδια.

Όταν συγκολλούνται ανόμοια μέταλλα, θα δημιουργηθεί περισσότερη θερμότητα στο μέταλλο με μεγαλύτερη ειδική αντίσταση. Αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό των τμημάτων συγκόλλησης. Η σκληρότητα του υλικού επηρεάζει επίσης την αντίσταση επαφής. Τα σκληρότερα μέταλλα (με υψηλότερη τάση διαρροής) θα έχουν ως αποτέλεσμα υψηλότερη αντίσταση επαφής με την ίδια δύναμη συγκόλλησης, επειδή οι τραχιές επιφάνειες είναι πιο δύσκολο να παραμορφωθούν, με αποτέλεσμα μικρότερη πραγματική επιφάνεια επαφής.

Οι περισσότερες επιστρώσεις επιφανειών εφαρμόζονται για προστασία από τη διάβρωση ή ως υπόστρωμα για περαιτέρω επεξεργασία επιφάνειας. Αυτές οι επιφανειακές επικαλύψεις συχνά περιπλέκουν τη διαδικασία συγκόλλησης. Ειδικές ρυθμίσεις παραμέτρων διεργασίας πρέπει να γίνονται σύμφωνα με μεμονωμένους τύπους επιφανειών. Ορισμένες επικαλύψεις επιφανειών εισάγονται για τη διευκόλυνση της συγκόλλησης δύσκολων συνδυασμών υλικών. Αυτές οι επικαλύψεις επιφανειών επιλέγονται στρατηγικά για να φέρουν την ισορροπία θερμότητας στη διεπαφή συγκόλλησης. Τα περισσότερα από τα επιφανειακά επιστρώματα θα συμπιεστούν κατά τη συγκόλληση, μερικά θα παραμείνουν στη διεπιφάνεια συγκόλλησης ως μέταλλο χαλκού [76].

Η γεωμετρία και οι διαστάσεις των ηλεκτροδίων και των συσκευών είναι πολύ σημαντικές καθώς επηρεάζουν την κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος και συνεπώς τα αποτελέσματα της συγκόλλησης με αντίσταση. Η γεωμετρία των ηλεκτροδίων στη σημειακή συγκόλληση ελέγχει την πυκνότητα ρεύματος. Τα διαφορετικά πάχη των μεταλλικών φύλλων χρειάζονται διαφορετικά ρεύματα συγκόλλησης και άλλες ρυθμίσεις παραμέτρων διεργασίας. Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας τοπικής προβολής των τεμαχίων κατεργασίας είναι κρίσιμος στη συγκόλληση προβολής, η οποία θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη μαζί με τις ιδιότητες του υλικού, ειδικά κατά την ένωση ανόμοιων

μετάλλων. Κατ' αρχήν, το ανάγλυφο ή η προεξοχή θα πρέπει να τοποθετείται στο υλικό με τη χαμηλότερη ειδική αντίσταση προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη ισορροπία θερμότητας στη διεπιφάνεια συγκόλλησης.

Πλεονεκτήματα της συγκόλλησης με αντίσταση είναι ο γρήγορος ρυθμός παραγωγής, η δυνατότητα όμοιων και ανόμοιων μετάλλων να συγκολληθούν, η υψηλή αξιοπιστία και επαναληψιμότητα, η γενικότερη εξάλειψη της παραμόρφωσης των εξαρτημάτων ενώ μειονεκτήματα είναι το υψηλό αρχικό κόστος του εξοπλισμού είναι υψηλό, η απαίτηση για ειδική προετοιμασία της επιφάνειας και η αδυναμία συγκόλλησης μεγαλύτερων παχών [77].

### 3.6 Επαφές συγκόλλησης

Τις τελευταίες δεκαετίες, ιδιαίτερα τον περασμένο αιώνα, παρατηρήθηκε όχι μόνο μια αυξημένη βελτίωση στην ικανότητα συγκόλλησης, αλλά και μία ροπή προς την κατανόηση των επιστημονικών αλληλεπιδράσεων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Η συγκόλληση εξελίχθηκε σε ανεξάρτητο τομέα της μηχανικής παραγωγής στη βιομηχανία ηλεκτρονικών αφού συνδυάζει σε ίσο βαθμό τους κλάδους της Φυσικής, της Χημείας, της Μεταλλουργίας και της Μηχανικής.

Η συγκόλληση (soldering) είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται για την ένωση μεταλλικών μερών. Συνήθως χρησιμοποιεί ένα κράμα μετάλλων χαμηλού σημείου τήξης το οποίο τήκεται και εφαρμόζεται στα μεταλλικά μέρη που πρόκειται να ενωθούν, σχηματίζει μια σύνδεση και η συγκόλληση στερεοποιείται. Είναι διαφορετική από τη συγκόλληση (welding) στο ότι τα μέρη που ενώνονται δεν είναι λιωμένα και συνήθως δεν είναι το ίδιο υλικό [78].

Υπάρχουν τρεις τύποι συγκόλλησης με διαφορά στη θερμοκρασία και στην ισχύ των ενώσεων. Η μαλακή συγκόλληση (90 °C - 450 °C) έχει το χαμηλότερο σημείο τήξης μετάλλων πλήρωσης από όλους τους τύπους συγκόλλησης. Λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών που χρησιμοποιούνται καταπονεί θερμικά τα εξαρτήματα λιγότερο, αλλά δεν δημιουργεί ισχυρές συνδέσεις. Επίσης δεν είναι κατάλληλο για χρήση σε υψηλές θερμοκρασίες, καθώς αυτός ο τύπος συγκόλλησης χάνει τη δύναμη και λιώνει. Η σκληρή συγκόλληση (>450 °C) χρησιμοποιεί ορείχαλκο ή ασήμι και απαιτεί φυσητήρα για να επιτευχθούν οι θερμοκρασίες στις οποίες συγκολλούνται τα μέταλλα. Η συγκόλληση (>450 °C) χρησιμοποιεί ένα μέταλλο με πολύ υψηλότερο σημείο τήξης από αυτά που χρησιμοποιούνται σε σκληρές και μαλακές συγκολλήσεις. Μόλις θερμανθούν επαρκώς και τα δύο υλικά, στη συνέχεια τοποθετείται το μέταλλο συγκόλλησης ανάμεσά τους το οποίο λιώνει και λειτουργεί ως συνδετικός παράγοντας [79].

Τα κράματα SnPb αποτελούν παραδοσιακά τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες κολλήσεις για ηλεκτρονικά συστήματα και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που κυμαίνονται από καταναλωτικά προϊόντα έως και συστήματα επικοινωνιών στο διάστημα. Η αντικατάσταση των κραμάτων που φέρουν Pb είναι αναπόφευκτη γιατί ο Pb είναι τοξικός. Επιπλέον, η επεξεργασία και η ανάκτηση Pb μπορεί να είναι επιζήμια για το περιβάλλον. Σε όλο τον κόσμο, αρκετά υποψήφια συστήματα κράματος συγκόλλησης έχουν εμφανιστεί ως αντικαταστάσεις για κράματα SnPb. Οι κορυφαίοι υποψήφιοι περιλαμβάνουν δυαδικά και τριμερή κράματα με βάση τα συστήματα κραμάτων SnCu και SnAg.

### 3.7 Επαφές αγωγίμης κόλλας

Καθώς η βιομηχανία ηλεκτρονικών ημιαγωγών συνεχίζει να κάνει προόδους, μαζί έρχεται η συνεχής ζήτηση για βελτίωση της τεχνολογίας διασύνδεσης. Μία από τις συνέπειες που έρχεται με την ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας είναι ότι οι ηλεκτρονικές συσκευές μαζικής παραγωγής υποφέρουν από σύντομο κύκλο ζωής προϊόντων, με αποτέλεσμα πολλές από τις πλακέτες τυπωμένου κυκλώματος (PCB) να μετατρέπονται σε ηλεκτρονικά απόβλητα [80]. Οι περισσότερες τεχνολογίες διασύνδεσης που είναι υπεύθυνες για τη δημιουργία μιας συνεχούς γέφυρας μεταξύ του PCB και των ηλεκτρικών εξαρτημάτων χρησιμοποιούν παραδοσιακά ένα υλικό γνωστό ως ευτηκτική συγκόλληση μολύβδου/κασσίτερου (Pb/Sb) το οποίο κατά 90% αποτίθεται σε χώρους υγειονομικής ταφής χωρίς προεπεξεργασία για την απομάκρυνση επικίνδυνων χημικών ουσιών. Εναλλακτικές υποσχόμενες επιλογές αποδείχθηκαν το κράμα μετάλλων χωρίς μόλυβδο (Sn/Ag/Cu) και ένα πολυμερές σύνθετο υλικό που είναι γνωστό ως ηλεκτρική αγωγή κόλλα [81].

Η αγωγή κόλλα διαθέτει πολλές επιθυμητές ιδιότητες όπως υψηλή αντοχή στη διάτμηση, απαιτήσεις χαμηλών θερμοκρασιών, λιγότερα στάδια επεξεργασίας, και φιλικότητα προς το περιβάλλον. Αποτελείται κυρίως από μια πολυμερή εποξειδική συνδετική ρητίνη και αγωγή υλικά πλήρωσης συνήθως με τη μορφή νιφάδων από άργυρο [82]. Το κύριο μειονέκτημα της χαμηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας έχει ερευνηθεί εκτενώς και σε μεγάλο βαθμό έχει ξεπεραστεί. Για τη βελτίωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, η πρώτη προσέγγιση ασχολείται με την τροποποίηση των νιφάδων αργύρου. Αλλάζοντας το σχήμα, το μέγεθος και την λειτουργικότητα της επιφάνειας τους, βελτιώνεται η μαζική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η δεύτερη προσέγγιση είναι η χρήση στερεών υλικών με βάση μη μεταλλικό άνθρακα που λειτουργούν συμπληρωτικά και δημιουργούν περισσότερες μεταλλουργικές συνδέσεις μεταξύ των νιφάδων. Η τρίτη μέθοδος είναι η ενσωμάτωση αγωγίμων πολυμερών μέσα στο υλικό συμπλήρωσης, με την ελπίδα παροχής περισσότερων μεταλλουργικών ιόντων που θα βοηθήσουν στην αύξηση της αγωγιμότητας του όγκου μέσα στο σύστημα [83],[84].

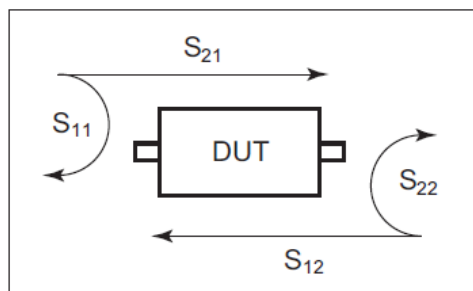
Οι αγωγή κόλλες χωρίζονται σε ισοτροπικές και ανισοτροπικές. Οι ισοτροπικές χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικές συσκευασίες, κυκλώματα και ηλεκτρονικές συσκευές ενώ οι ανισοτροπικές σε επίπεδες οθόνες, σε εξαιρετικά αξιόπιστα συστήματα, σε διασυνδέσεις υψηλής συχνότητας και υψηλής πυκνότητας ρεύματος [85],[86]. Η χρήση αγωγίμης κόλλας αντί για πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB) έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη πρωτοτύπων πολλών κυκλωμάτων και συστημάτων με χαμηλότερο κόστος κατασκευής, υψηλότερους ρυθμούς παραγωγής και βελτιωμένη ευελιξία.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## Μετρήσεις παραμέτρων των επαφών φορέσιμων κεραιών

### 4.1 Παράμετρος S11

Οποιαδήποτε συσκευή ραδιοσυχνοτήτων ή μικροκυμάτων (DUT), ή καλώδιο με 2 θύρες μπορεί λειτουργικά να περιγραφεί από τέσσερις σύνθετες, εξαρτώμενες από τη συχνότητα παραμέτρους που καλούνται παράμετροι σκέδασης ή πιο συχνά S-παράμετροι. Η παρακάτω **εικόνα 5.1** δείχνει ότι για τη θύρα 1, η παράμετρος S11 αποκαλύπτει την ανακλώμενη ισχύ, ενώ το S21 περιγράφει την ισχύ μετάδοσης προς τη θύρα 2. Στη θύρα 2, η παράμετρος S22 είναι η ισχύς αντίστροφης ανάκλασης και η S12 είναι η ισχύς αντίστροφης μετάδοσης [87].



**Εικόνα 4.1:** Παράμετροι σκέδασης

Όταν η S11 έχει τιμή 0 τότε όλη η προσφερόμενη ισχύς στην συσκευή ανακλάται. Μια συσκευή εκπέμπει καλύτερα όταν η παράμετρος S11 παίρνει τιμές μικρότερες των -10dB. Εάν S11=-10dB, αυτό σημαίνει ότι εάν παραδοθούν 3dB ισχύος στην κεραία, -7dB είναι η ανακλώμενη ισχύς. Η υπόλοιπη ισχύς παραδόθηκε στην κεραία. Αυτή η αποδεκτή ισχύς είτε ακτινοβολείται είτε απορροφάται ως απώλειες εντός της κεραίας. Δεδομένου ότι οι κεραίες είναι συνήθως σχεδιασμένες να έχουν χαμηλές απώλειες, ιδανικά το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος που παρέχεται στην κεραία ακτινοβολείται. Ο αναλυτής (VNA) όταν λειτουργεί σε S11 mode εκπέμπει ισχύ και μετράει πόση ανακλάται σε αυτόν.

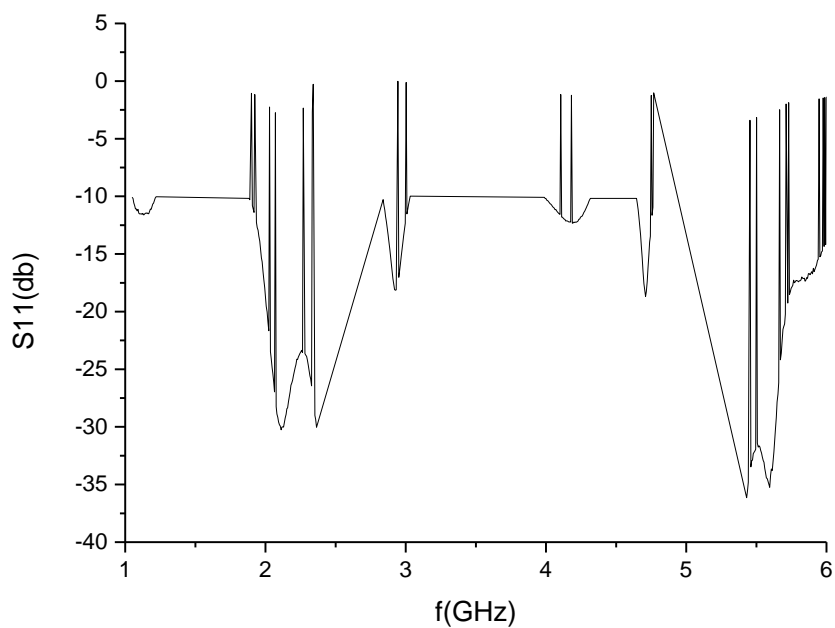
Ένα δείγμα επαφής που χρησιμοποιείται στις φορέσιμες κεραίες δίνεται στην παρακάτω **εικόνα 4.2** ενώ στη συνέχεια του κεφαλαίου δίνονται οι μετρήσεις της παραμέτρου S11 των υπό εξέταση επαφών των φορέσιμων κεραιών.



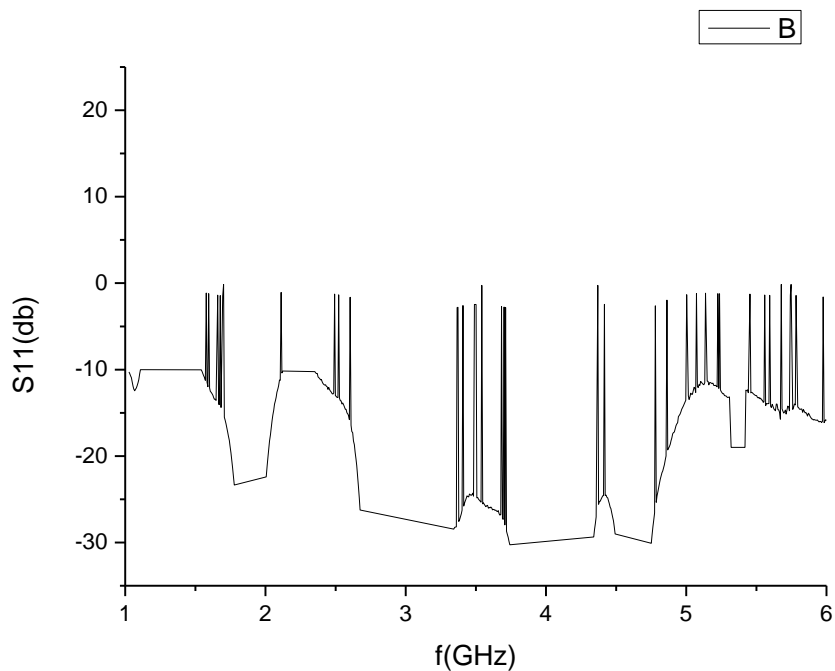
**Εικόνα 4.2:** Επαφή φορέσιμης κεραιάς

## Επαφές υπερήχων

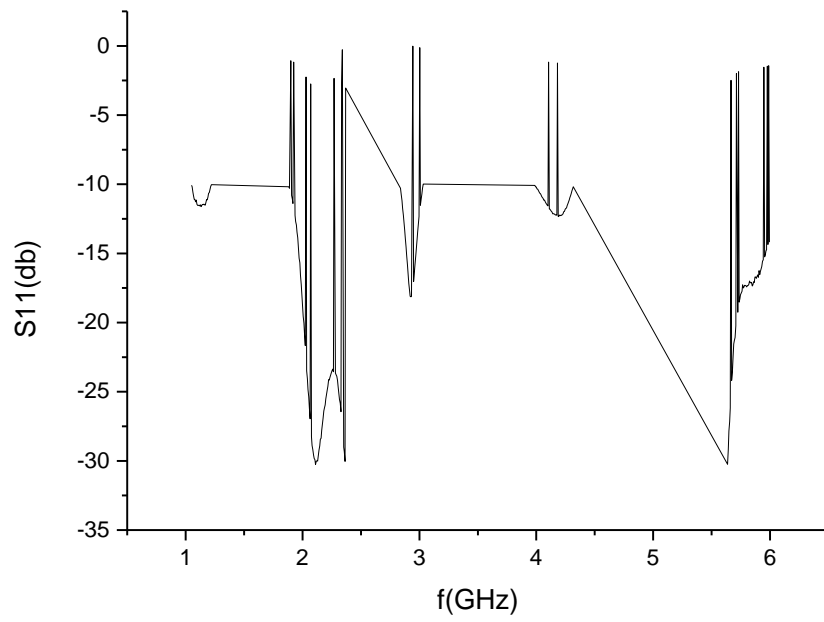
### Επαφή 1S



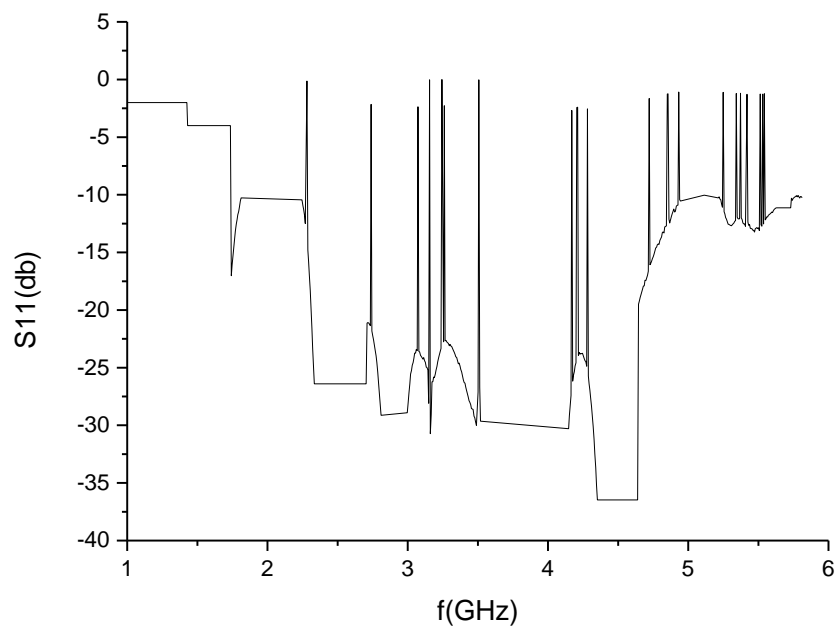
### Επαφή 1LS



### Επαφή 2S

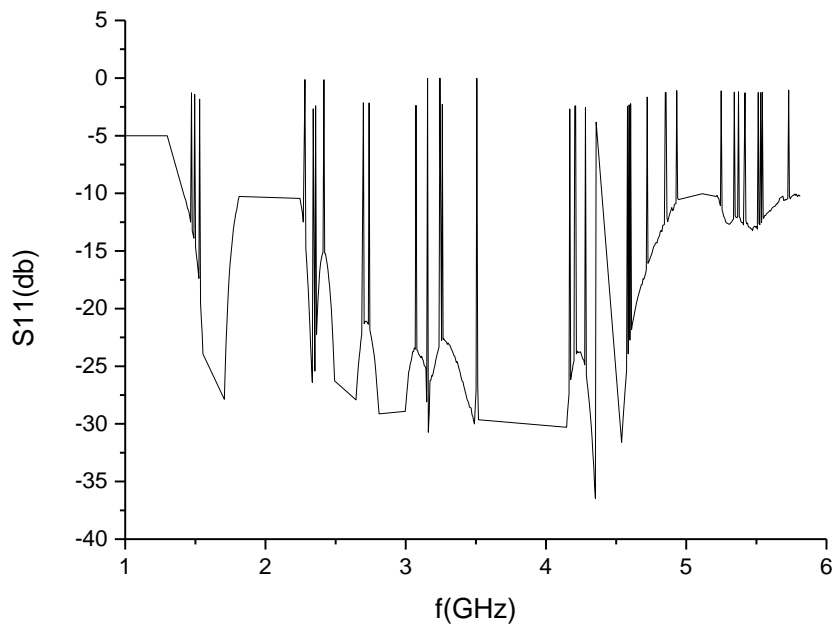


### Επαφή 2LS

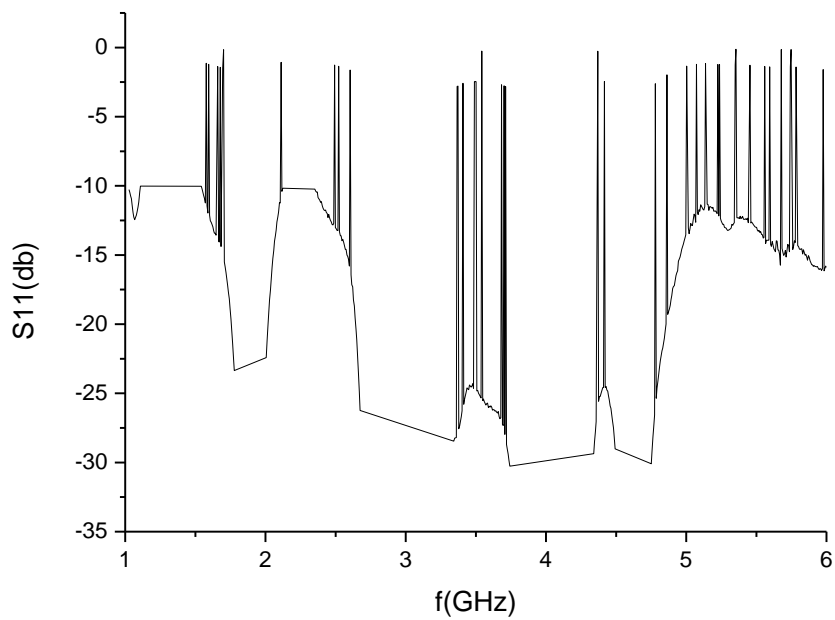


## Κεντημένες επαφές

### Επαφή 5S

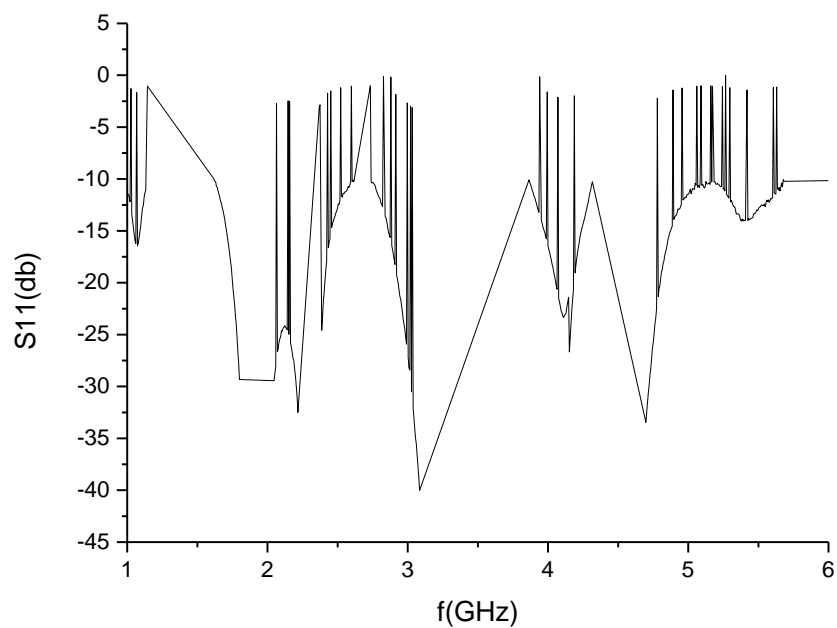


### Επαφή 5LS

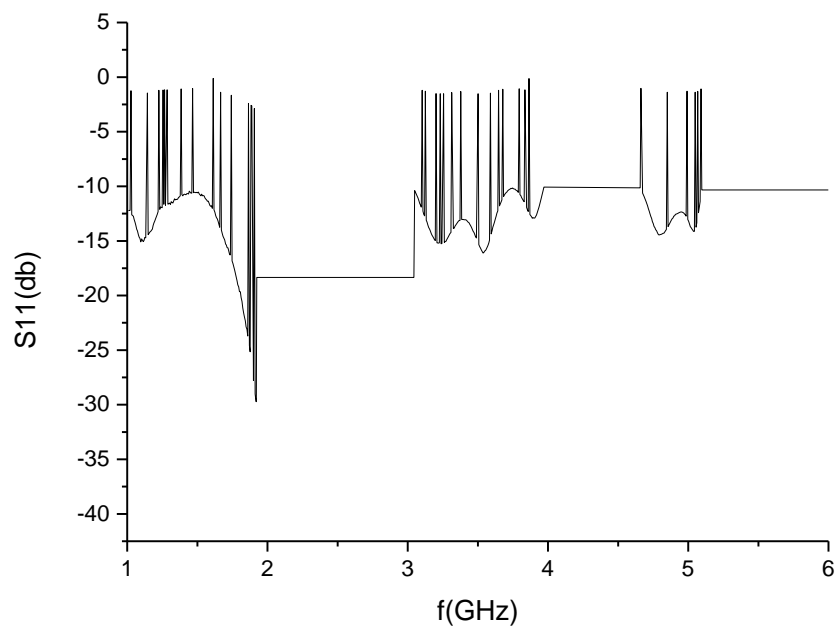




### Επαφή 6S

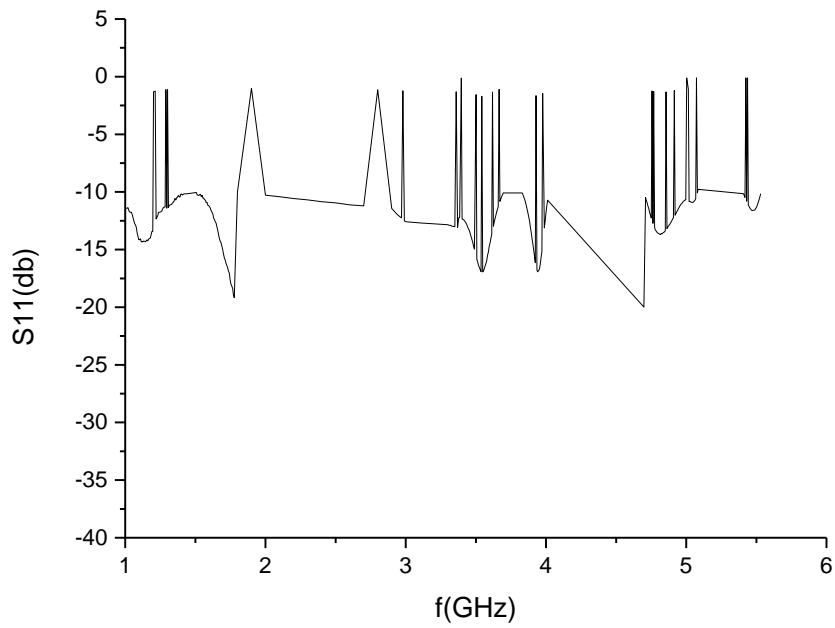


### Επαφή 6LS

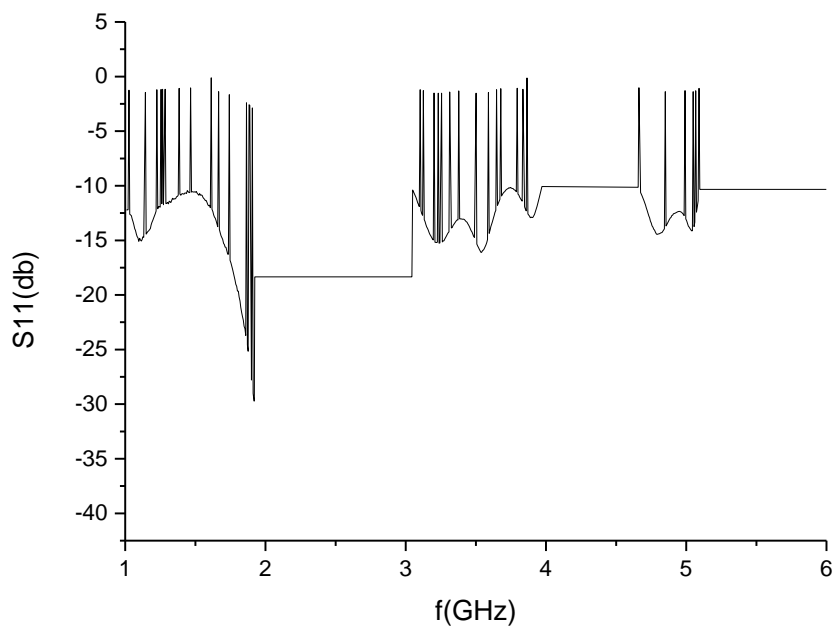


## Επαφές συγκόλλησης αντίστασης

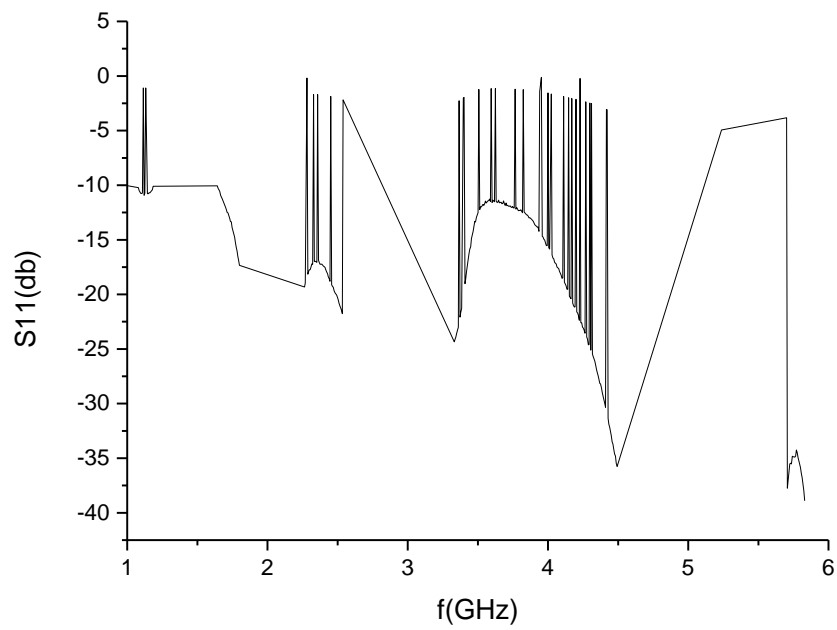
### Επαφή 7S



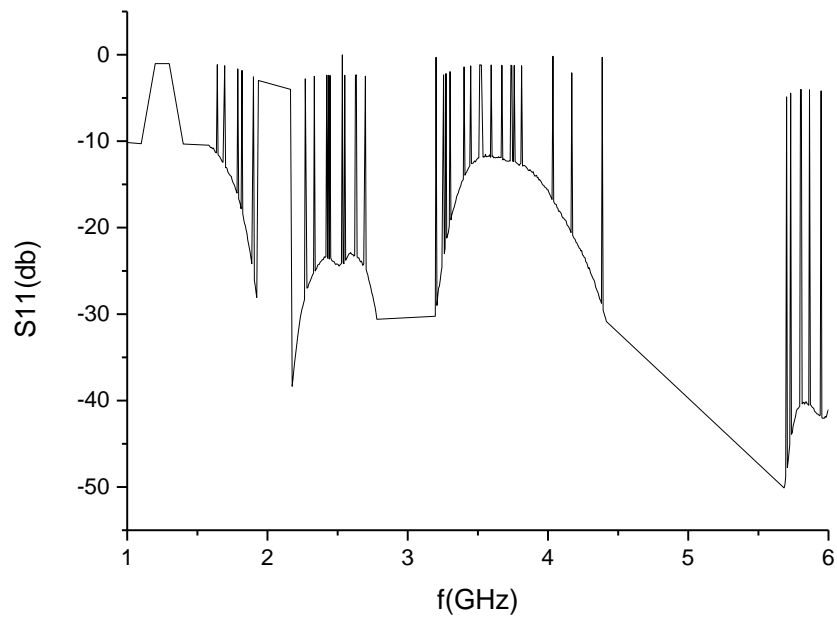
### Επαφή 7LS



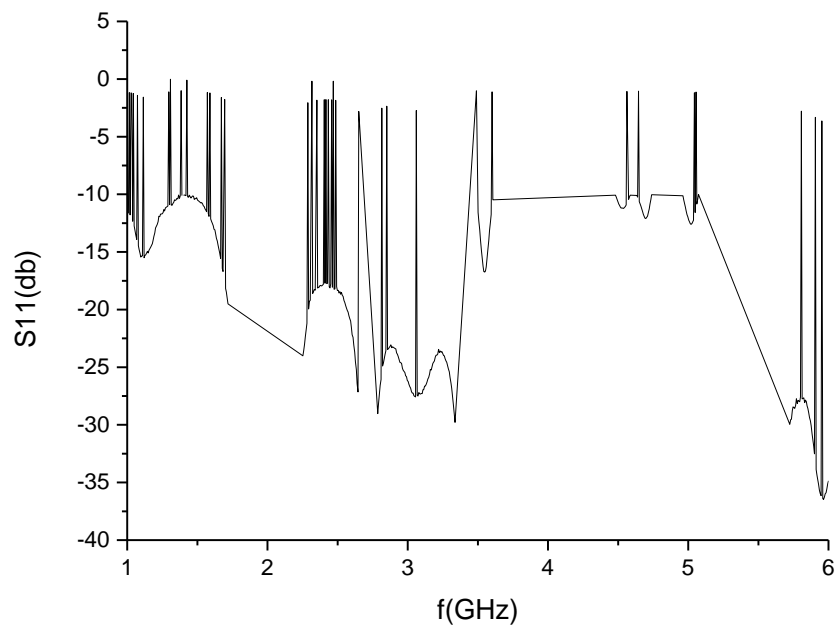
### Επαφή 8S



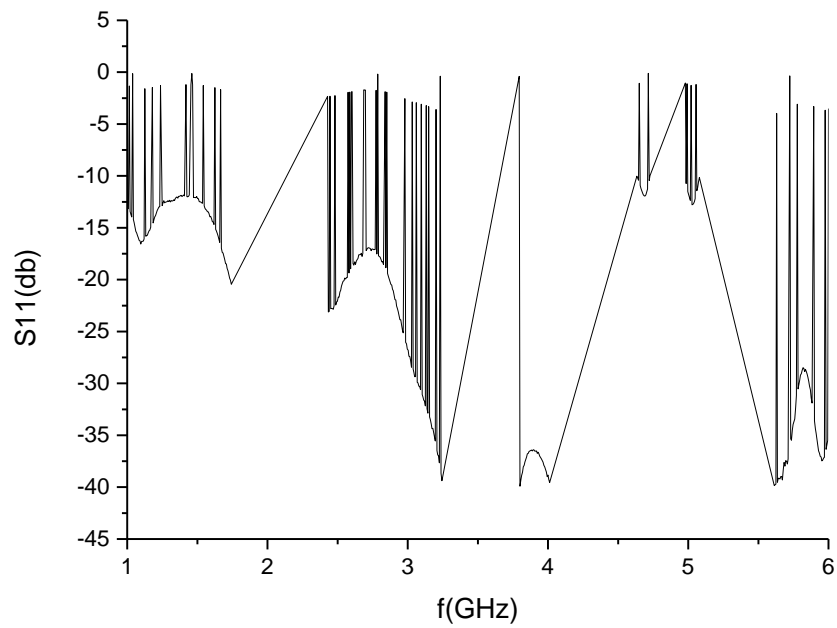
### Επαφή 8LS



### Επαφή 9S

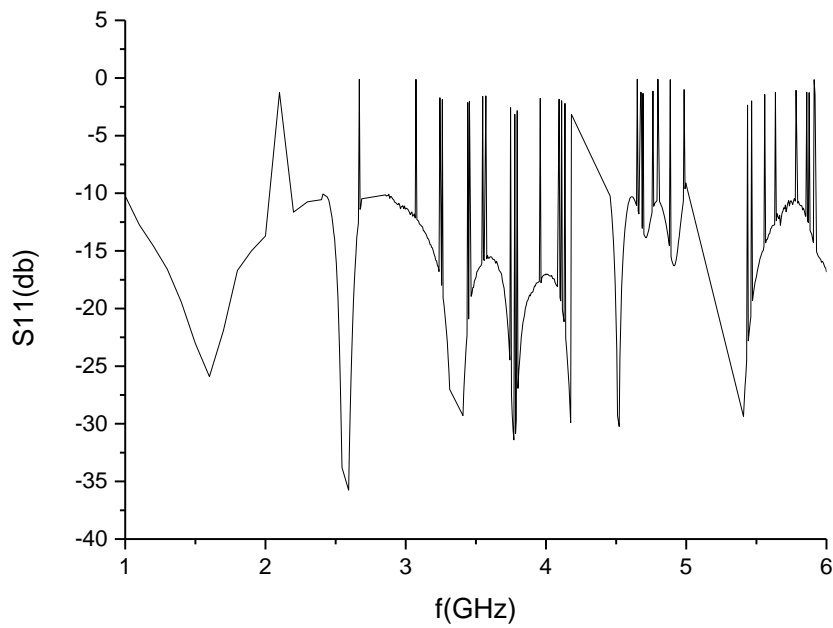


### Επαφή 9LS

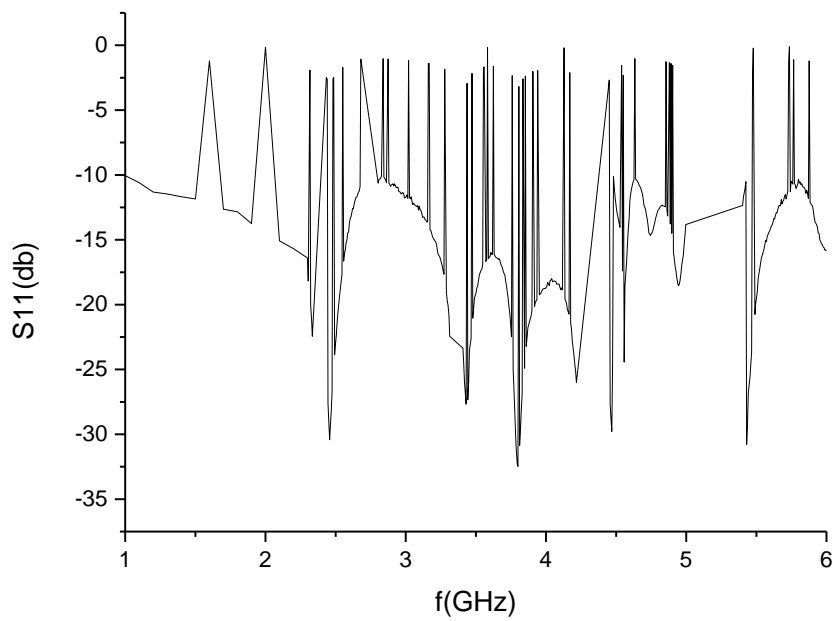


Επαφές συγκόλλησης

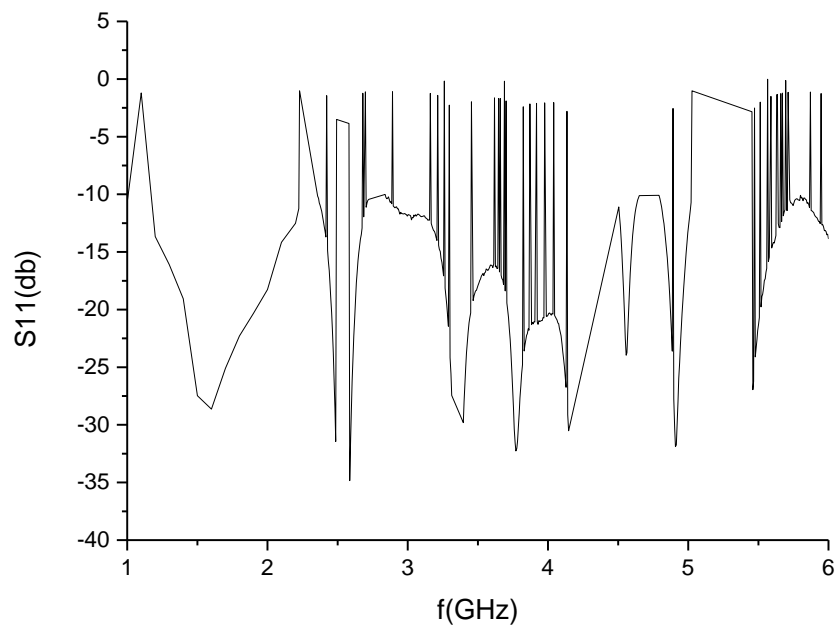
Επαφή 10S



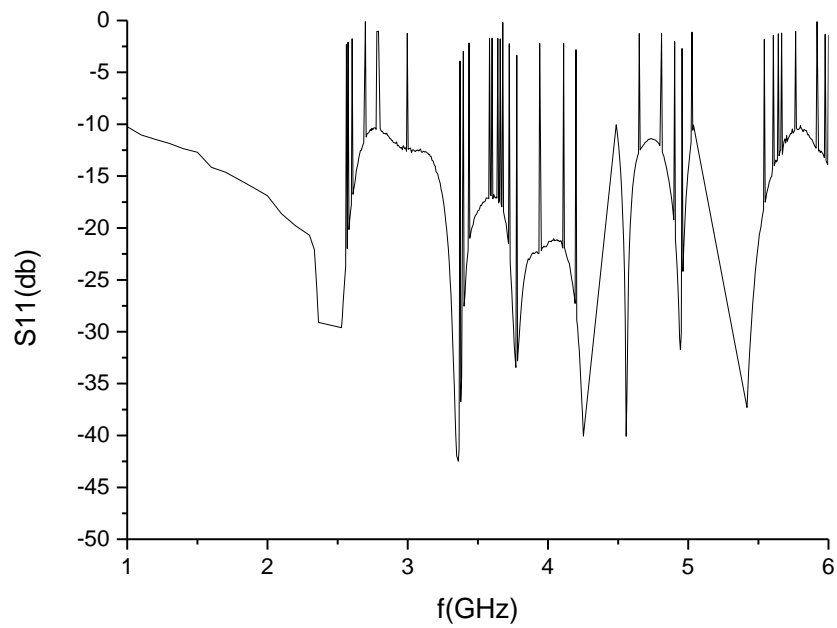
Επαφή 10LS



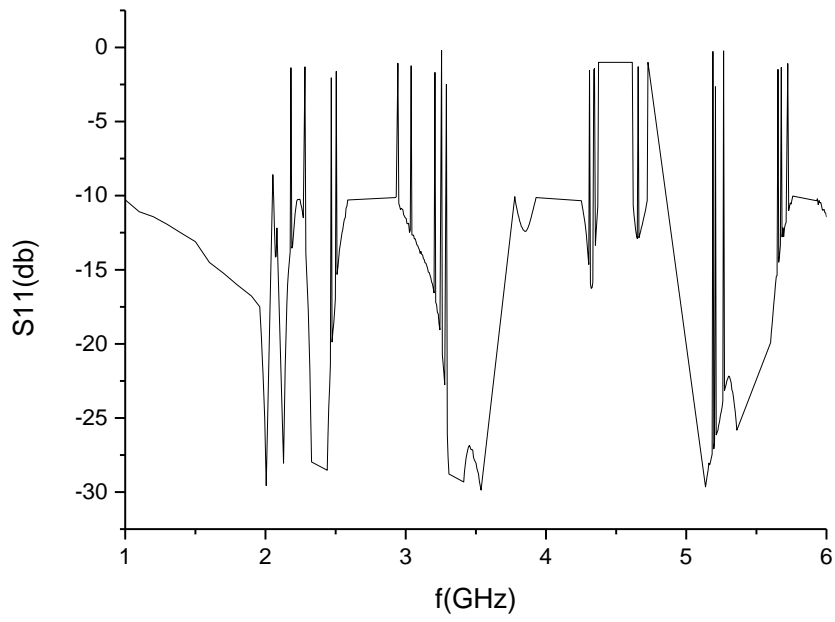
Επαφή 11S



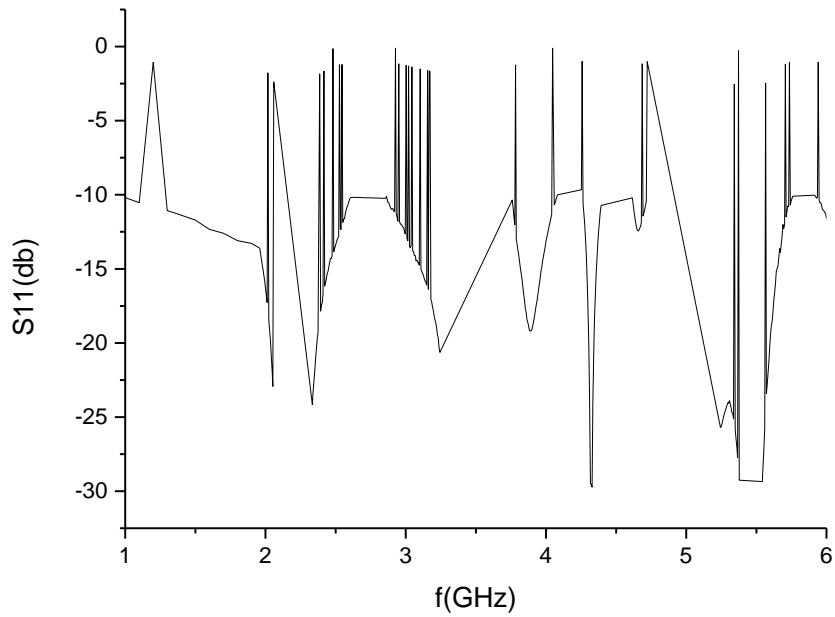
Επαφή 11LS



Επαφή 12S

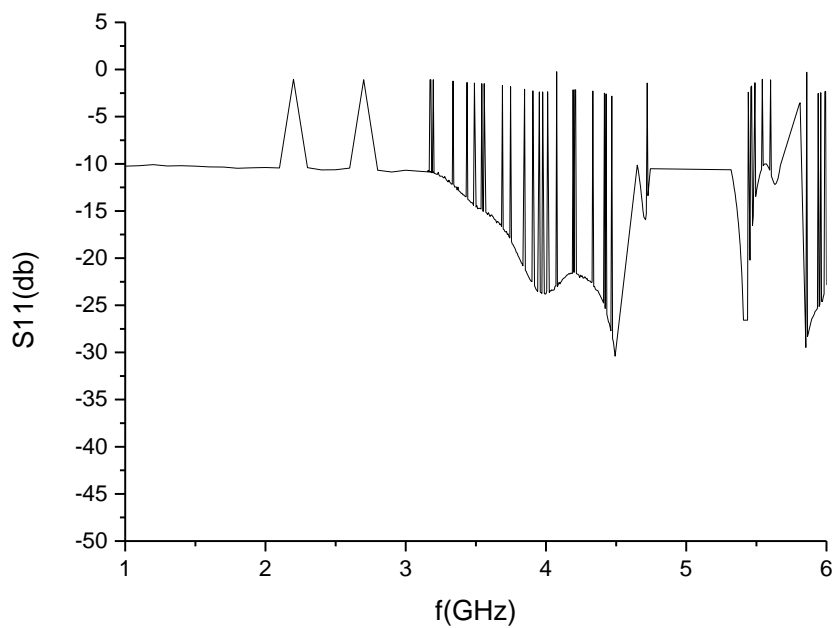


Επαφή 12LS

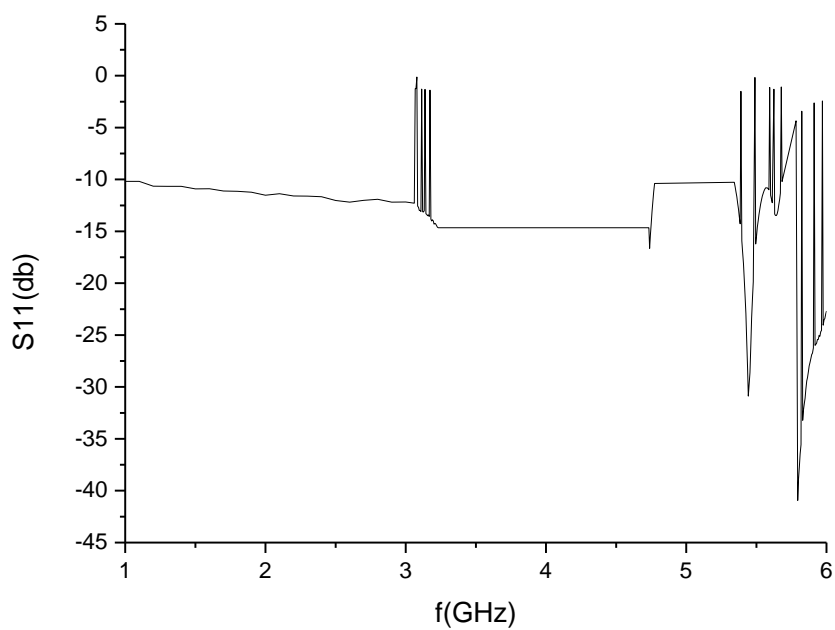


Επαφές ανώνυμης κόλλας

Επαφή 13S

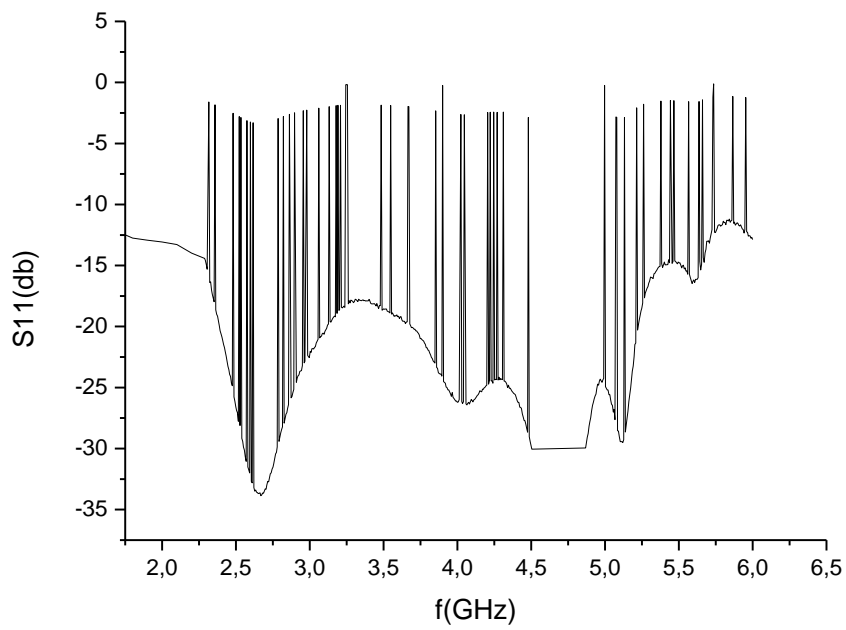


Επαφή 13LS

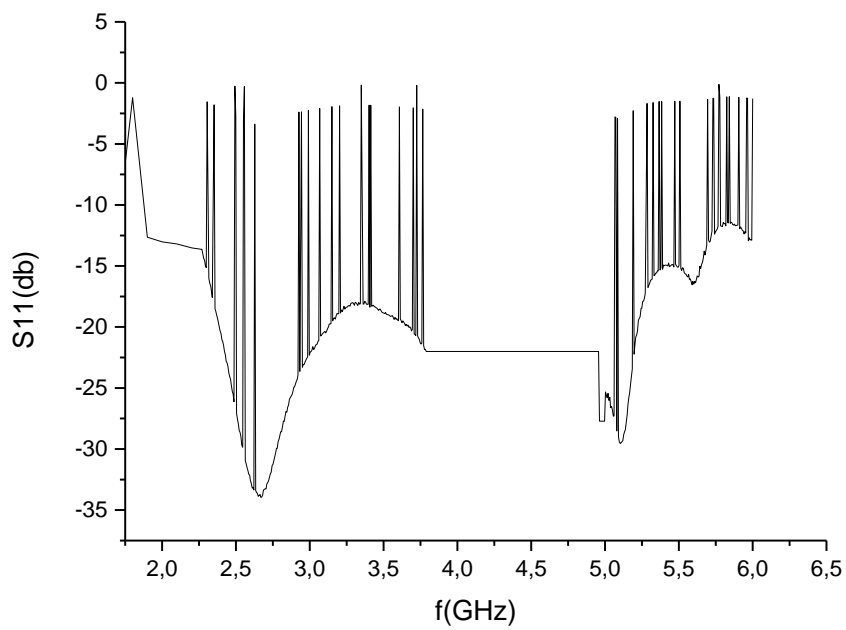




### Επαφή 14S



### Επαφή 14LS

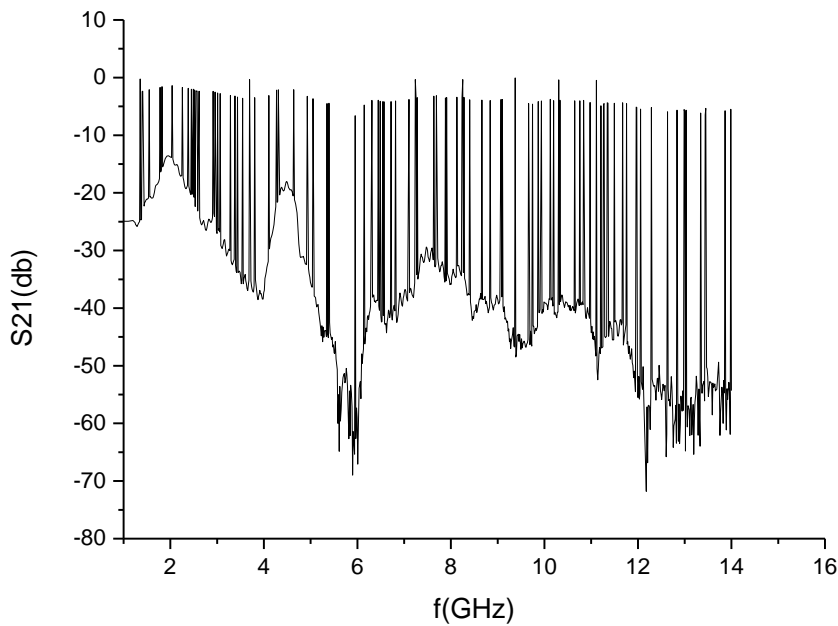


## 4.2 Παράμετρος S21

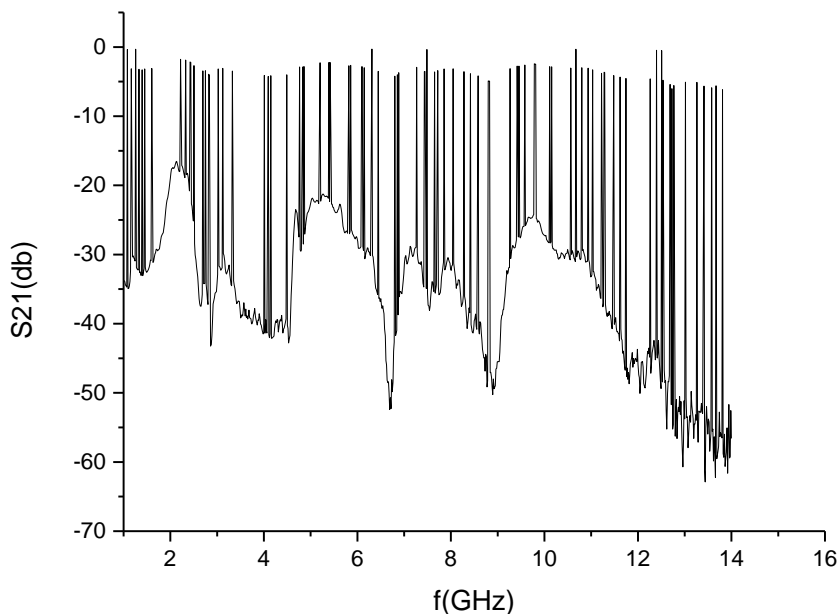
Η παράμετρος S21 εκφράζει την ισχύ που μεταφέρεται από την πύλη 1 προς την πύλη 2 δηλαδή από τον αναλυτή προς την υπό εξέταση επαφή.  $S_{21}=0\text{dB}$  σημαίνει ότι όλη η ισχύς που παρέχεται στην πύλη 1 καταλήγει στους ακροδέκτες της πύλης 2. Όταν  $S_{21}=-10\text{dB}$ , τότε εάν παραδίδεται 1 Watt (ή 0 dB) στην 1, -10 dB (0,1 Watt) της ισχύος λαμβάνεται στην 2. Στη συνέχεια δίνονται οι μετρήσεις της παραμέτρου S21 των υπό εξέταση επαφών των φορέσιμων κεραιών [87].

### Επαφές υπερήχων

#### Επαφή 1

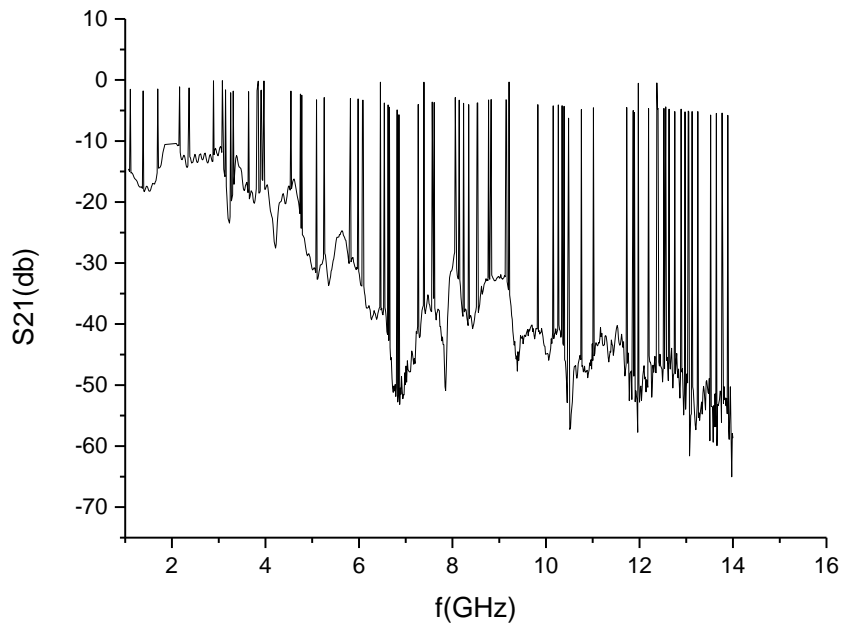


#### Επαφή 2

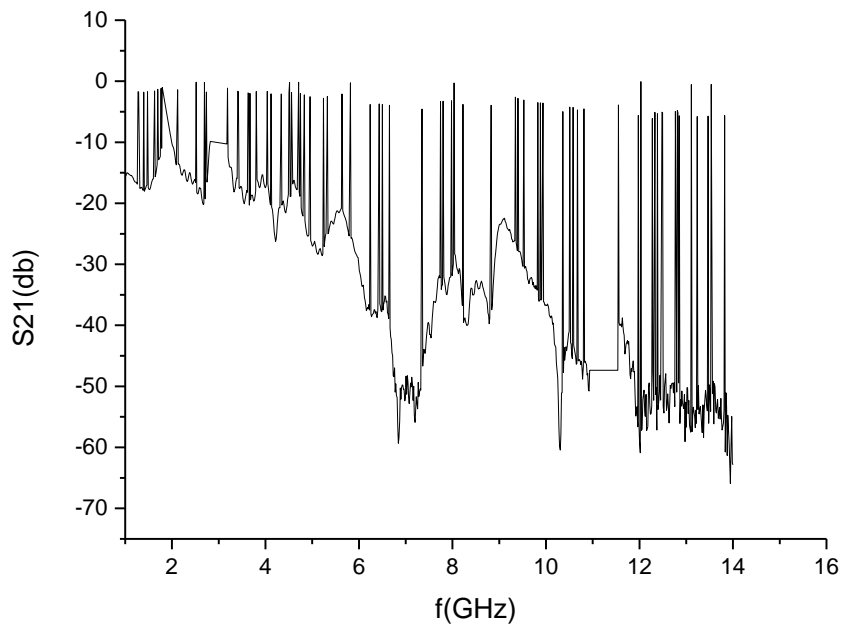


Κεντημένες επαφές

Επαφή 4

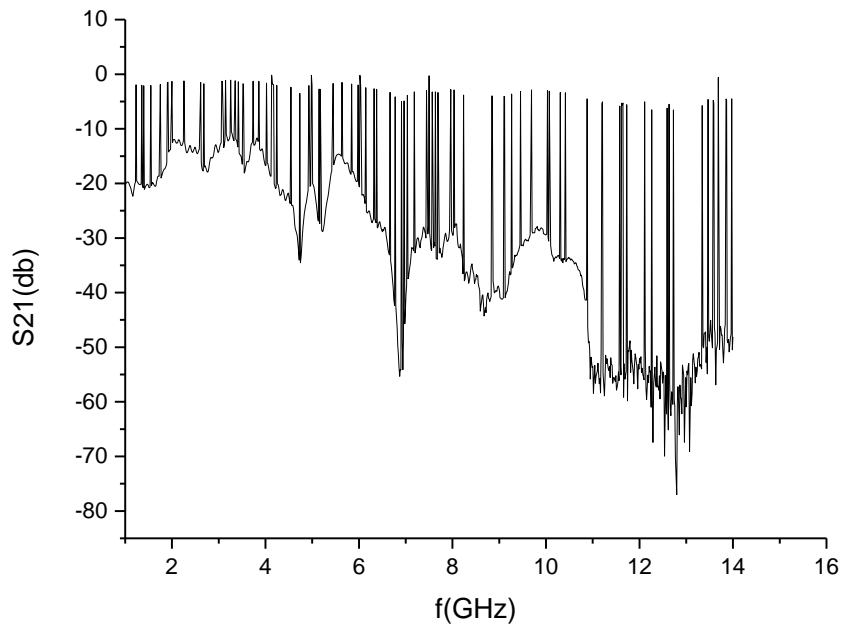


Επαφή 5

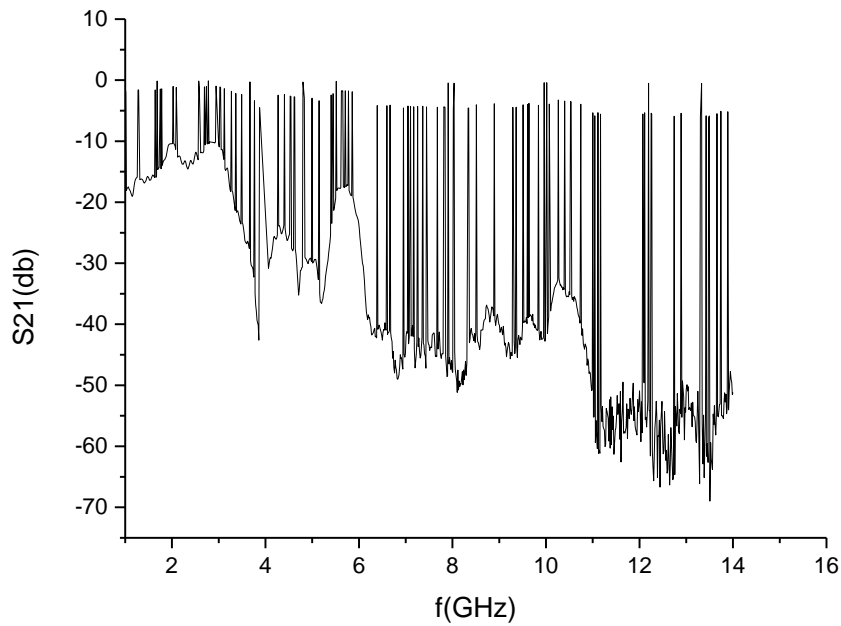


Επαφές συγκόλλησης αντίστασης

Επαφή 7

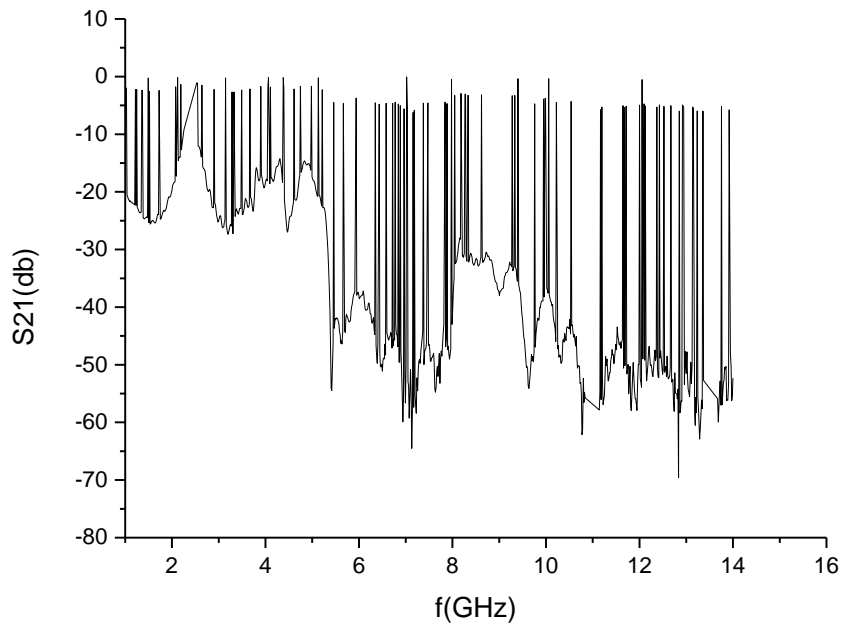


Επαφή 8

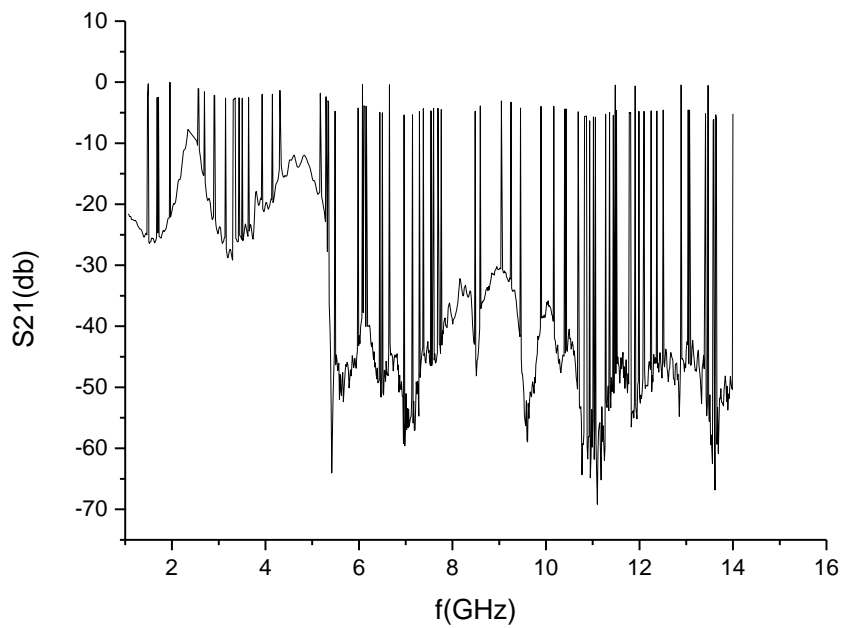


Επαφές συγκόλλησης

Επαφή 10

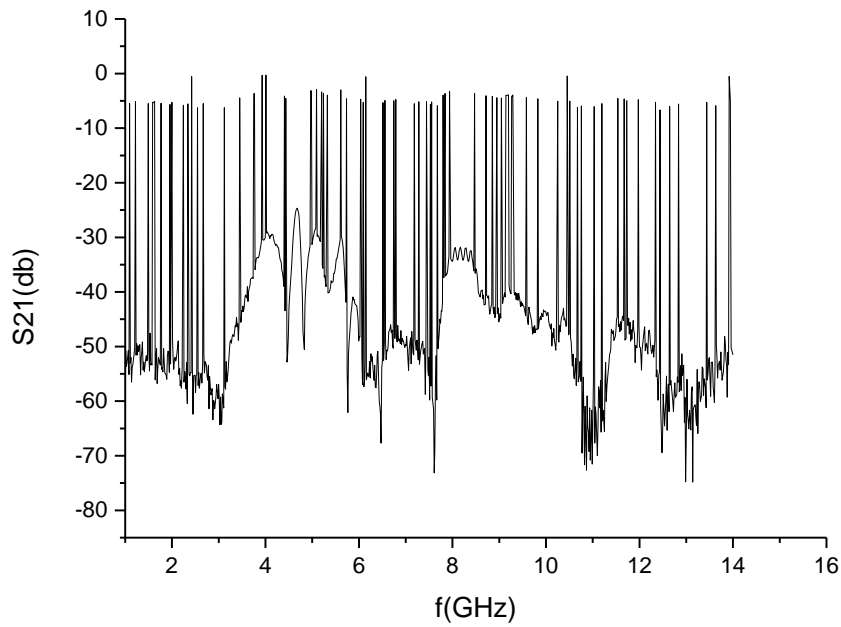


Επαφή 11

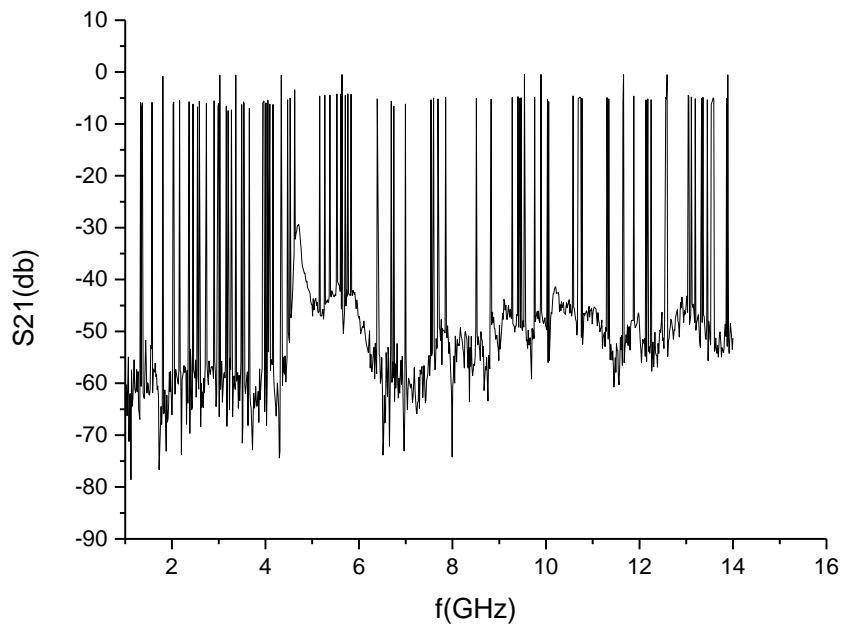


Επαφές αγώνιμης κόλλας

Επαφή 13



Επαφή 14



### 4.3 VSWR

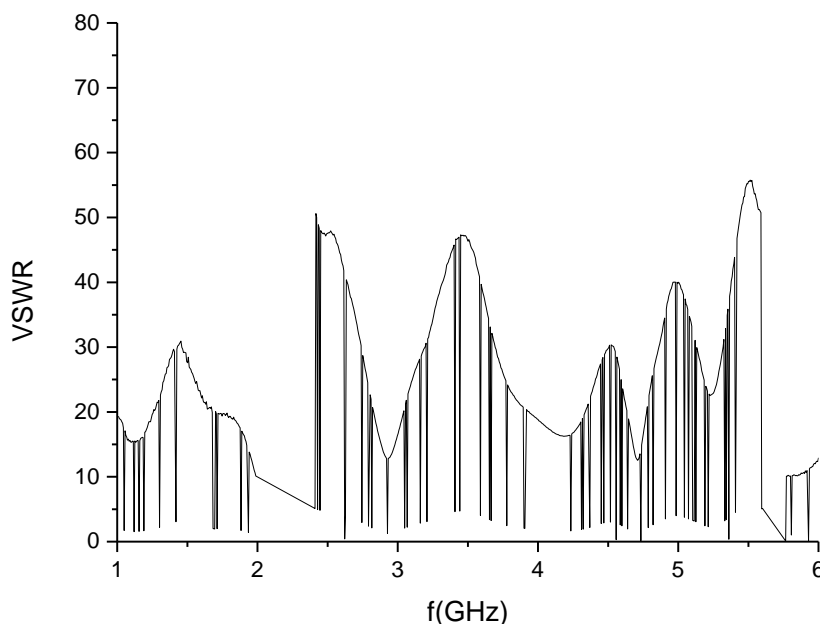
Όταν η σύνθετη αντίσταση μιας γραμμής μεταφοράς δεν ταιριάζει με αυτήν της κεραίας, τότε μέρος του μεταδιδόμενου προς το φορτίο κύματος ανακλάται πίσω στην πηγή. Το ανακλώμενο κύμα που έχει διαφορετικό πλάτος και φάση, υπερτίθεται στο προσπίπτον κύμα και το άθροισμα ονομάζεται στάσιμο κύμα. Το ανακλώμενο κύμα έχει σαν αποτέλεσμα το πλάτος του τελικού κύματος να μεταβάλλεται ως συνάρτηση της θέσης πάνω στη γραμμή μεταφοράς. Η παράμετρος VSWR είναι ένα μέτρο που περιγράφει αριθμητικά πόσο καλή συναρμογή υπάρχει ανάμεσα σε μία κεραία και στη γραμμή μετάδοσης στην οποία είναι συνδεδεμένη. Το VSWR σημαίνει αναλογία στάσιμων κυμάτων τάσης και είναι συνάρτηση του συντελεστή ανάκλασης, ο οποίος περιγράφει την ισχύ που ανακλάται από την κεραία [88]. Εάν ο συντελεστής ανάκλασης δίνεται από το  $\Gamma$  τότε η VSWR ορίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$VSWR = \frac{(1+|\Gamma|)}{(1-|\Gamma|)} \quad (4.1)$$

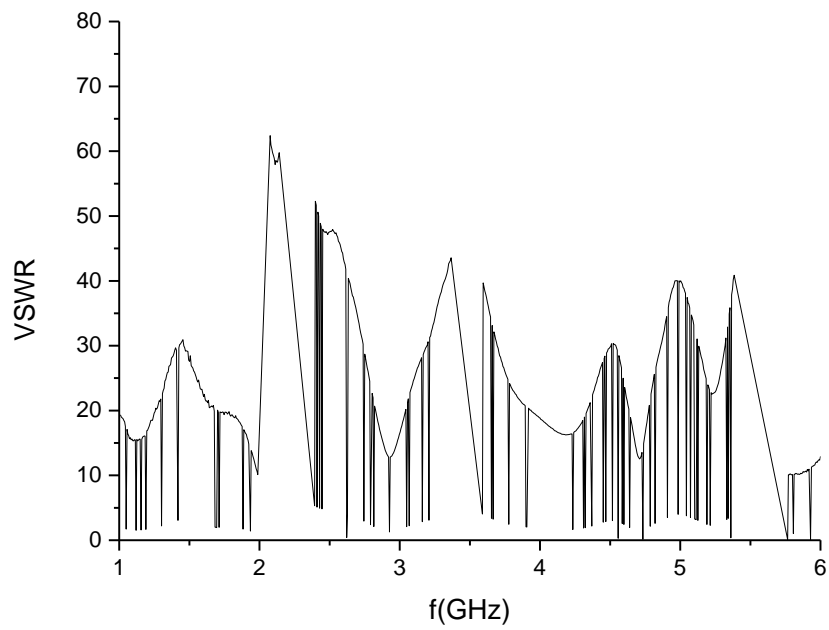
Το VSWR είναι πάντα ένας πραγματικός και θετικός αριθμός για τις κεραίες. Όσο μικρότερο είναι το VSWR, τόσο καλύτερα ταιριάζει η κεραία με τη γραμμή μετάδοσης και τόσο περισσότερη ισχύς παρέχεται στην κεραία. Το ελάχιστο VSWR είναι 1. Σε αυτή την περίπτωση, δεν ανακλάται ισχύς από την κεραία, κάτι που είναι ιδανικό. Το VSWR αποτελεί ένα μέτρο της ποσότητας ισχύος που παρέχεται σε μια κεραία. Αυτό δεν σημαίνει ότι η κεραία εκπέμπει όλη την ισχύ που λαμβάνει. Ως εκ τούτου, το VSWR μετρά τη δυνατότητα ακτινοβολίας. Ένα χαμηλό VSWR σημαίνει ότι η κεραία είναι καλά προσαρμοσμένη, αλλά δεν σημαίνει απαραίτητα ότι η ισχύς που παρέχεται επίσης ακτινοβολείται. Απαιτείται δοκιμή ανηχοϊκού θαλάμου ή άλλης ακτινοβολούμενης κεραίας για τον προσδιορισμό της ακτινοβολούμενης ισχύος. Το VSWR από μόνο του δεν αρκεί για να διαπιστωθεί ότι μια κεραία λειτουργεί σωστά [88]. Στη συνέχεια δίνονται οι μετρήσεις της παραμέτρου VSWR των υπό εξέταση επαφών των φορέσιμων κεραίων.

#### Επαφές υπερήχων

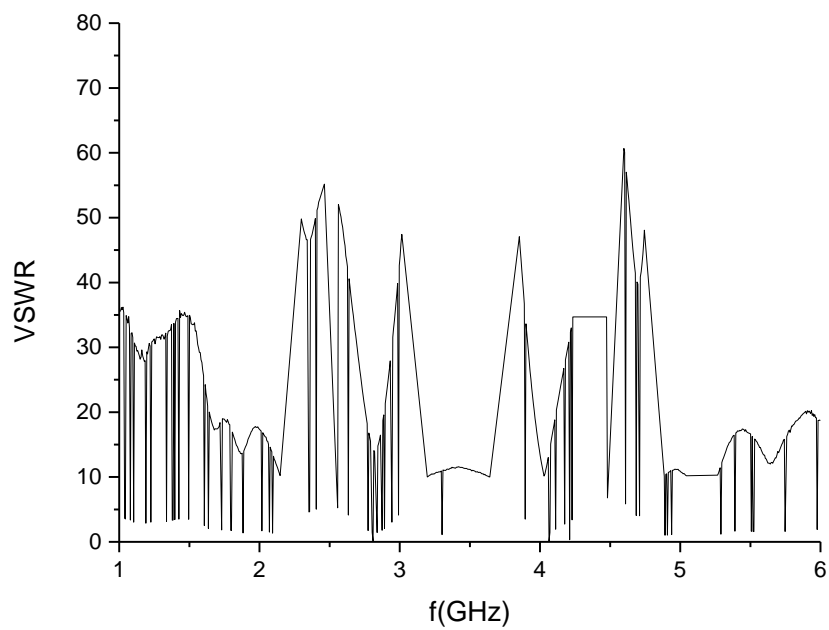
##### Επαφή 1



### Επαφή 2



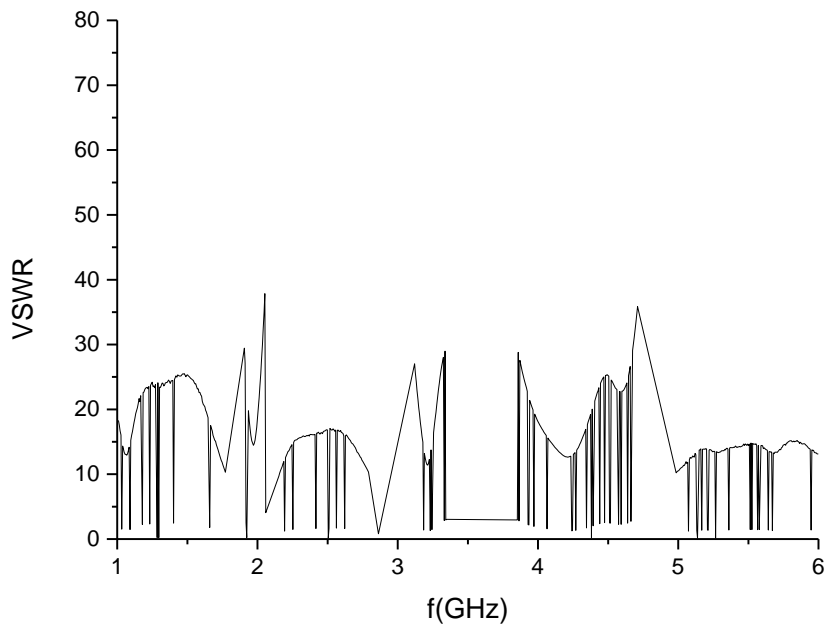
### Επαφή 3



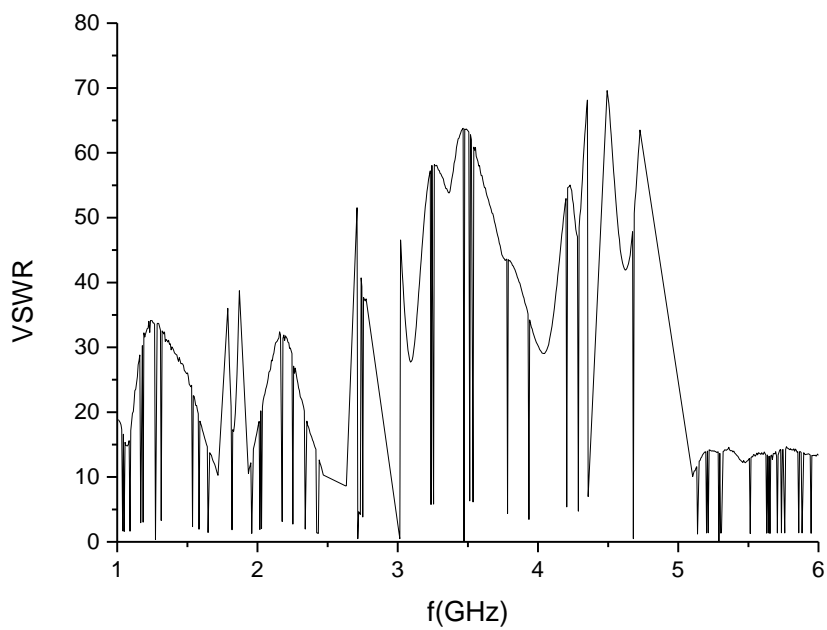


Κεντημένες επαφές

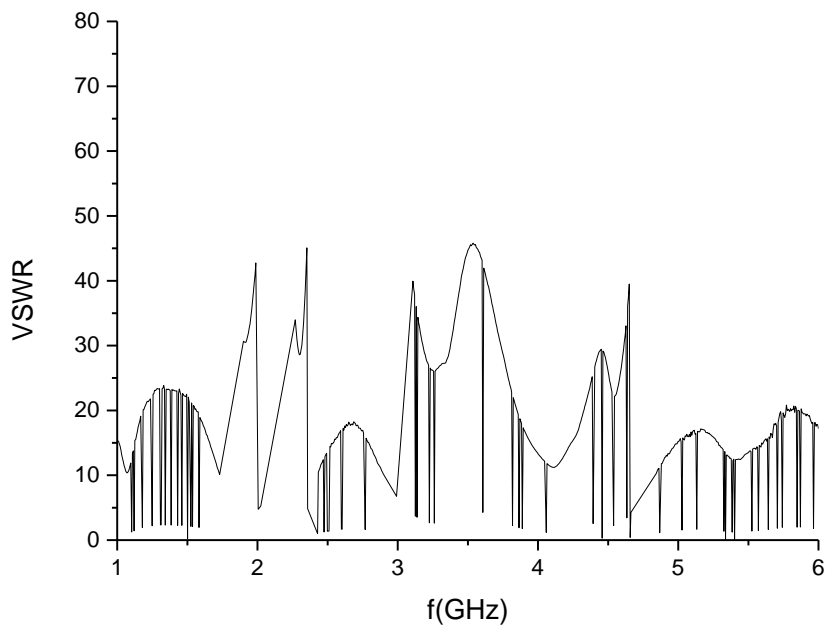
Ελαφή 4



Ελαφή 5

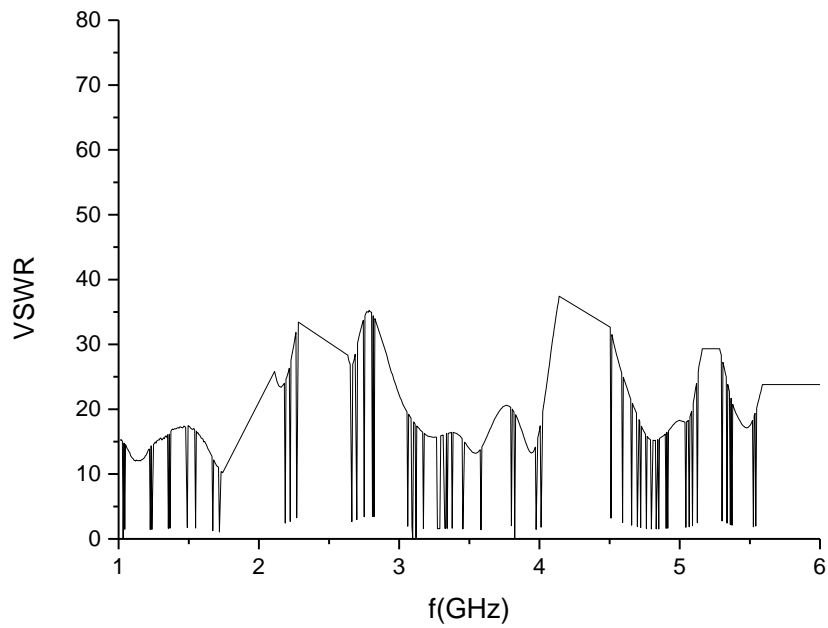


### Επαφή 6

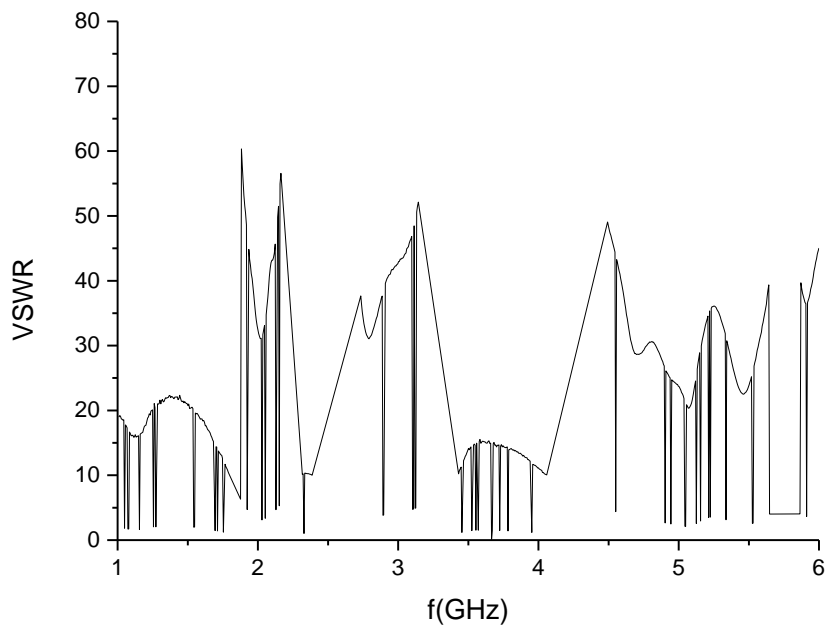


### Επαφές συγκόλλησης αντίστασης

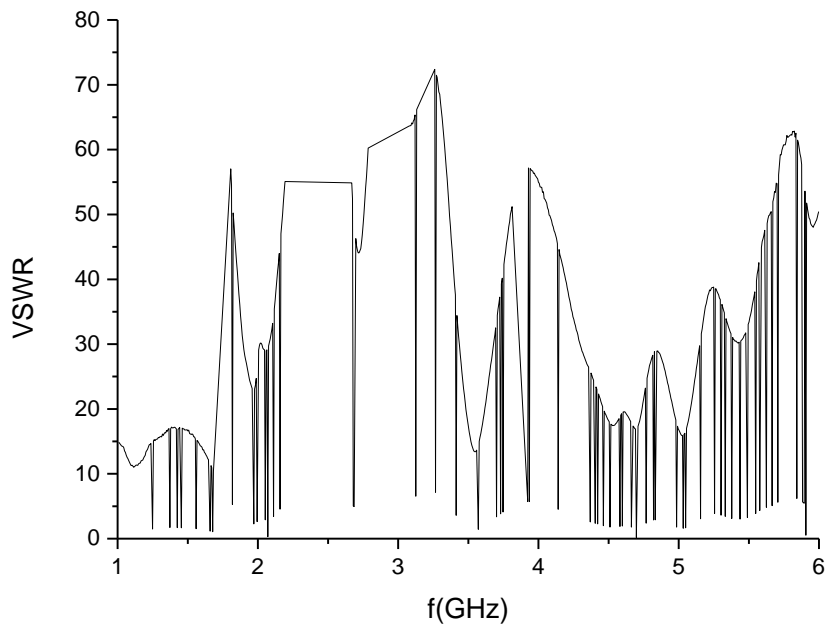
#### Επαφή 7



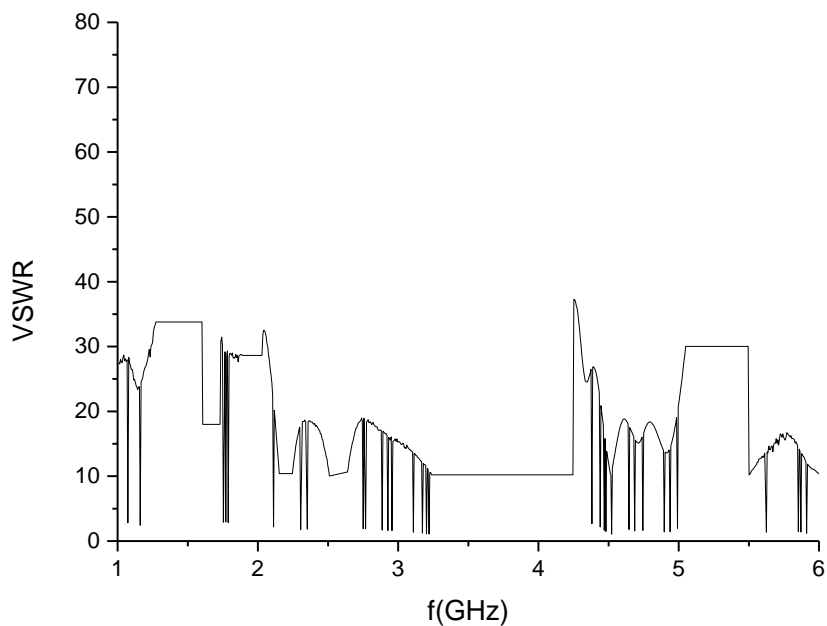
### Επαφή 8



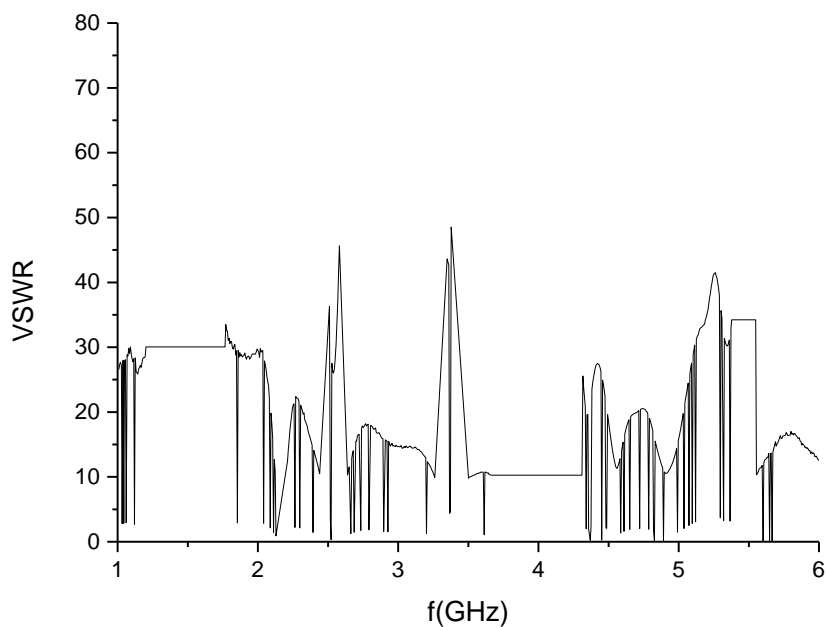
### Επαφή 9



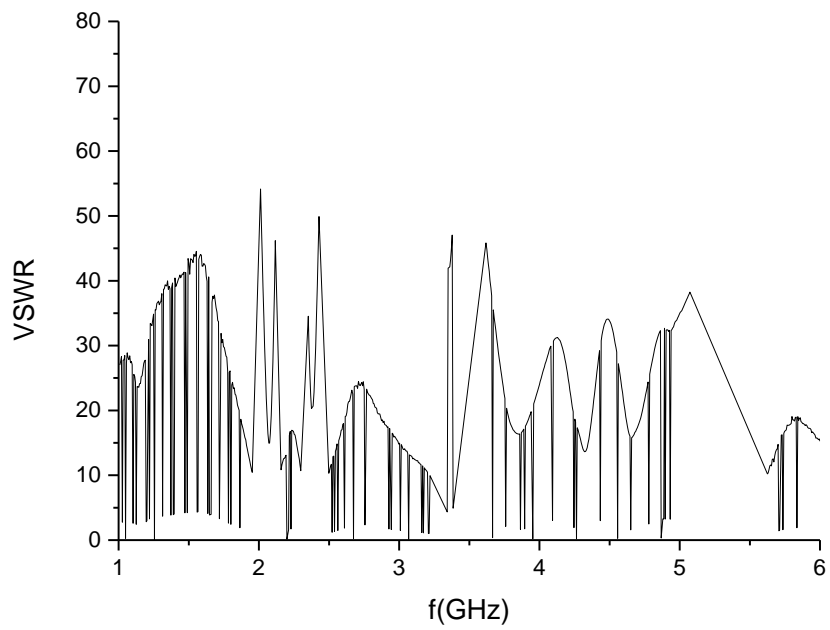
Επαφές συγκόλλησης  
Επαφή 10



Επαφή 11

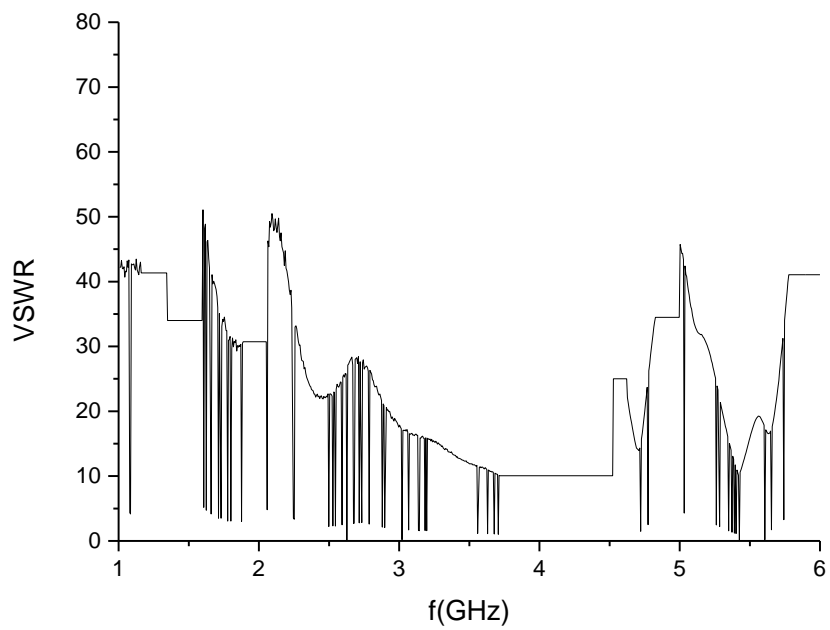


## Επαφή 12

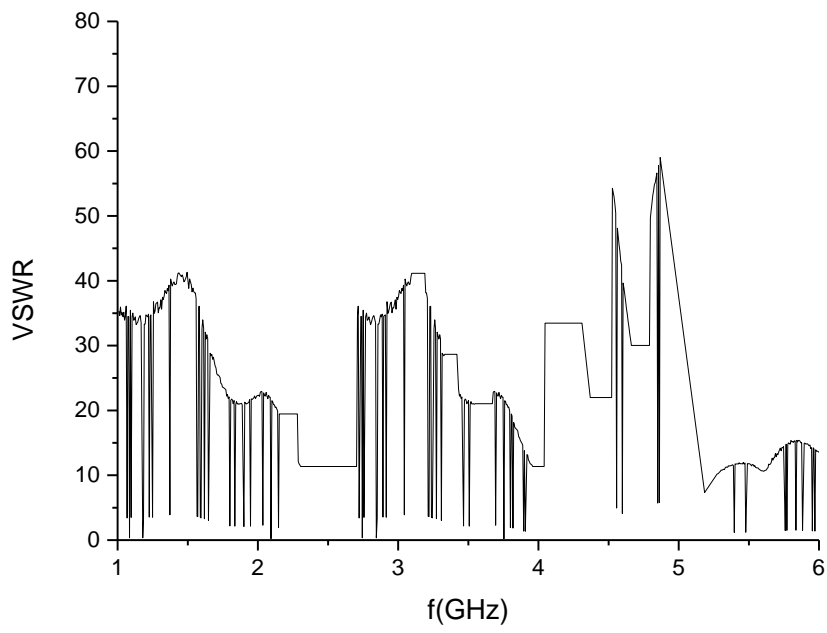


## Επαφές αγώνιμης κόλλας

### Επαφή 13

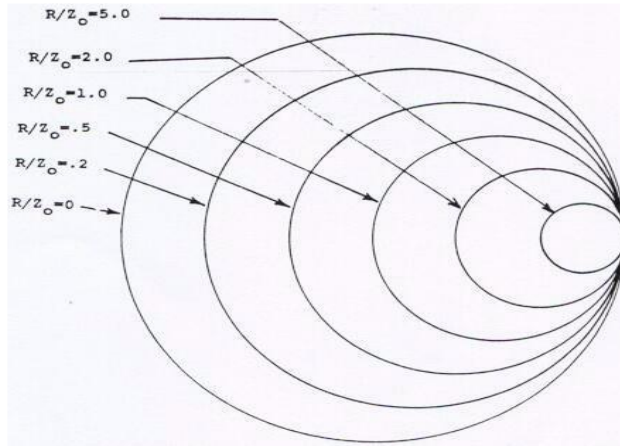


Επαφή 14

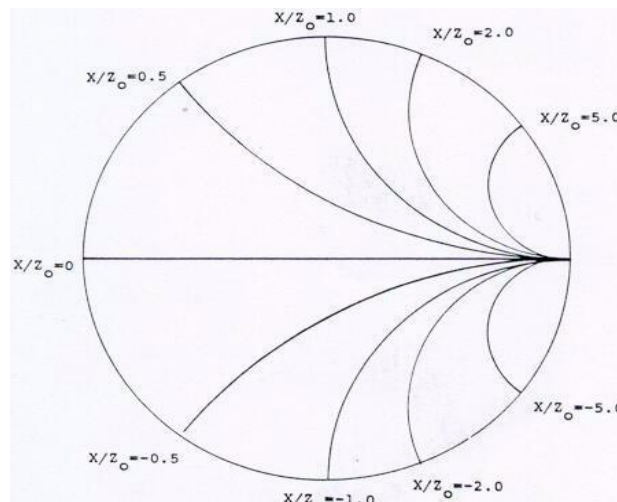


## 4.4 Χάρτης Smith

Ο χάρτης Smith (Εικόνες 5.2 - 5.3) προϋποθέτει γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες, αλλά χρησιμοποιείται με εξίσου καλά αποτελέσματα και σε γραμμές με απώλειες όπως αυτές που τροφοδοτούν μια κεραία. Ο χάρτης αποτελείται από βαθμονομημένους κύκλους ωμικής αντίστασης και από βαθμονομημένα τόξα επαγωγικής και χωρητικής αντίστασης [89].



**Εικόνα 4.2:** Κανονικοποιημένοι κύκλοι ωμικής αντίστασης στον χάρτη Smith



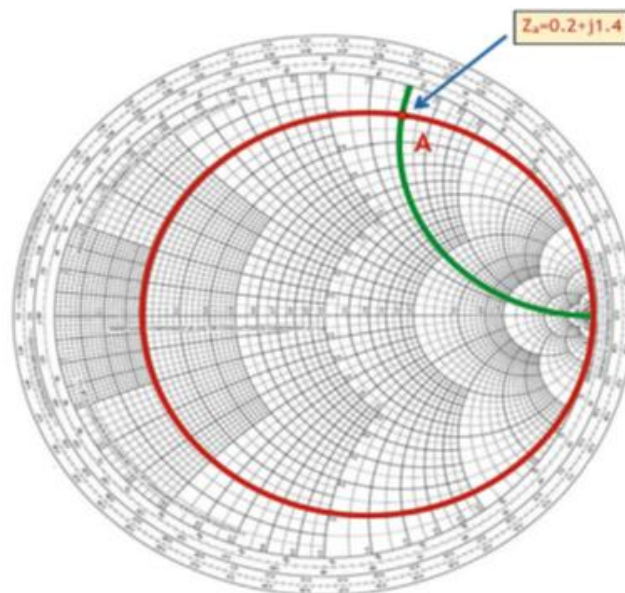
**Εικόνα 4.3:** Κανονικοποιημένα τόξα επαγωγικής και χωρητικής αντίστασης στον χάρτη Smith.

Χαρακτηριστική είναι η οριζόντια διάμετρος, που χωρίζει σε 2 ημικύκλια το πάνω και το κάτω ημικύκλιο. Κάθε σημείο πάνω στον χάρτη Smith έχει συντεταγμένες που δίνονται από τις δύο μοναδικές καμπύλες γραμμές που δύναται να διέρχονται από αυτό, και διαβάζονται, η μία εκεί που η μια καμπύλη συναντά την οριζόντια διάμετρο και η άλλη συντεταγμένη εκεί που η άλλη καμπύλη γραμμή συναντά την περιφέρεια του μικρότερου(εσωτερικού) κύκλου. Από αυτές τις συντεταγμένες, η πρώτη μας δίνει το πραγματικό μέρος ( $R_n$ ) της ανηγμένης σύνθετης αντίστασης  $Z_n$  και είναι πάντα θετικό, ενώ η δεύτερη μας δίνει το φανταστικό μέρος αυτής( $X_n$ ) και είναι είτε θετικό(+ $X_n$ ), αν βρίσκεται στο άνω ημικύκλιο, είτε αρνητικό(- $X_n$ ) αν βρίσκεται στο κάτω ημικύκλιο το σημείο μας.

Ο χάρτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον γραφικό προσδιορισμό [89]:

- i. του συντελεστή ανάκλασης σε κάποιο σημείο μιας γραμμής μεταφοράς, αν είναι γνωστή η τιμή της αντίστοιχης σύνθετης αντίστασης.
- ii. της σύνθετης αντίστασης ή και της σύνθετης αγωγιμότητας (που αντιστοιχεί στο συμμετρικό ως προς το κέντρο του μοναδιαίου κύκλου σημείο ως προς το σημείο που παριστά τη σύνθετη αντίσταση) με γνωστή την τιμή του συντελεστή ανάκλασης.
- iii. του λόγου στασίμων κυμάτων SWR που δεν είναι τίποτα άλλο από έναν κύκλο με ακτίνα ίση με το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης .
- iv. του συντελεστή ανάκλασης σε οποιοδήποτε σημείο πάνω στη γραμμή μεταφοράς με γνωστή την τιμή του στο φορτίο. Αυτό γίνεται με αναγωγή πάνω στο χάρτη Smith και με χρήση του δεδομένου ότι η τιμή του συντελεστή ανάκλασης φθίνει εκθετικά κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς.

Για να παραστήσουμε για παράδειγμα ένα φορτίο έστω  $Z_L=10+j70$  ( $\Omega$ ) σε γραμμή χαρακτηριστικής αντίστασης  $50\Omega$  (Εικόνα 5.4) υπολογίζουμε την ανηγμένη αντίσταση  $Z_a=Z_L/50=0.2+j1.4$  και εντοπίζουμε τον κύκλο με πραγματικό μέρος 0.2 και το τόξο με φανταστικό μέρος 1.4. Η τομή τους στο σημείο A είναι το φορτίο.



Εικόνα 4.4: Εύρεση φορτίου σε χάρτη Smith

Οι ολόκληροι κύκλοι, τα κέντρα των οποίων ανήκουν στην μοναδική ευθεία γραμμή του χάρτη, αντιστοιχούν σε διάφορες τιμές της κανονικοποιημένης αντίστασης ( $r=R/Z_0$ ) κατά μήκος της γραμμής. Τα τόξα των κύκλων, παραπλευρώς της ευθείας γραμμής του χάρτη, αντιστοιχούν σε διάφορες τιμές για την κανονικοποιημένη αντίσταση  $jx=jX/Z_0$ . Με μια προσεκτική ματιά παρατηρούμε πως οι παραπάνω κύκλοι τέμνονται πάντα κάθετα. Αυτό σημαίνει πως αν σχεδιάσουμε τις εφαπτόμενες ευθείες των κύκλων στα σημεία τομής, αυτές θα είναι κάθετες μεταξύ τους. Οι διάφοροι κύκλοι και συντεταγμένες έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε οι συνθήκες μιας γραμμής με δοσμένο φορτίο να αντιστοιχούν σε έναν κύκλο τον οποίο σχεδιάζουμε πάνω στο χάρτη Smith με το κέντρο του στο κέντρο του διαγράμματος.

Αν το φορτίο είναι καθαρά ωμικό, το  $R/Z_0$  αποτελεί τόσο την κανονικοποιημένη αντίστασή του όσο και το standing wave ratio. Έτσι, όταν ένας κύκλος έχει σχεδιαστεί στο χάρτη Smith, η τιμή του SWR η οποία αντιστοιχεί στη γραμμή μεταφοράς μπορεί να διαβαστεί από το σημείο στο οποίο ο κύκλος τέμνει την ευθεία γραμμή του διαγράμματος στα δεξιά του κέντρου του χάρτη. Η τιμή αυτή για το SWR θα είναι ίση με  $r \pm j 0$  στο σημείο αυτό. Όταν χρησιμοποιούμε το χάρτη για την



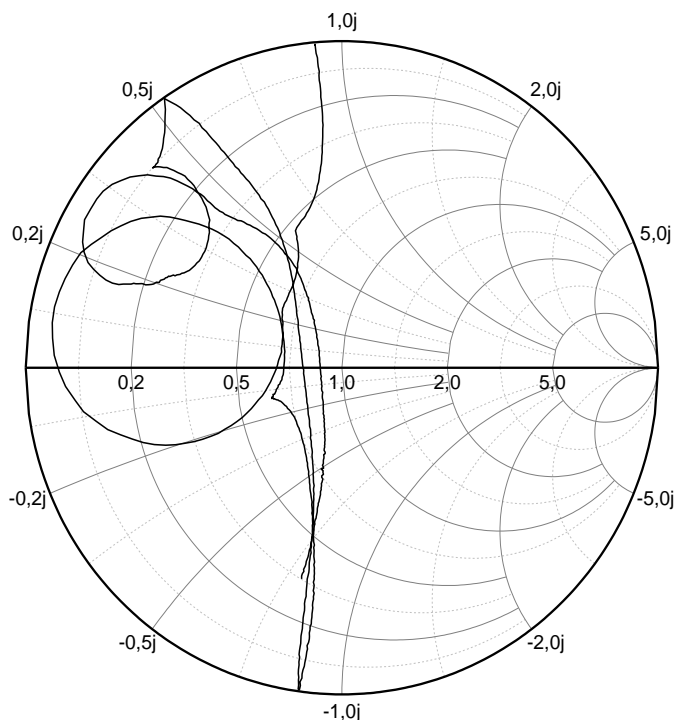
προσαρμογή φορτίων, σκοπός μας είναι η κανονικοποιημένη σύνθετη αντίσταση εισόδου του συνολικού κυκλώματος να είναι ιδανικά ίση με την μονάδα. Άρα θέλουμε να «φτάσουμε» στο σημείο του χάρτη όπου  $r=1$  και  $x=0$  δηλαδή στο κέντρο του χάρτη Smith.

Ένα σημείο στον χάρτη Smith παριστάνει τον συντελεστή ανακλάσεως (εύρος και γωνία φάσεως) σε πολικές συντεταγμένες και τη σύνθετη αντίσταση (ωμική και επαγωγική ή χωρητική αντίσταση) σε κανονικοποιημένες ποσότητες. Το κέντρο του χάρτη παριστάνει μία καθαρά ωμική αντίσταση ίση με  $Z_0$  που είναι η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς. Γενικά, οι σχεδιαστές μικροκυματικών κυκλωμάτων προσπαθούν να δημιουργήσουν μικροκυματικά στοιχεία με σύνθετες αντιστάσεις στο κέντρο ή κοντά σε αυτό, έτσι ώστε οι ανακλάσεις που προκαλούνται να είναι μικρές.

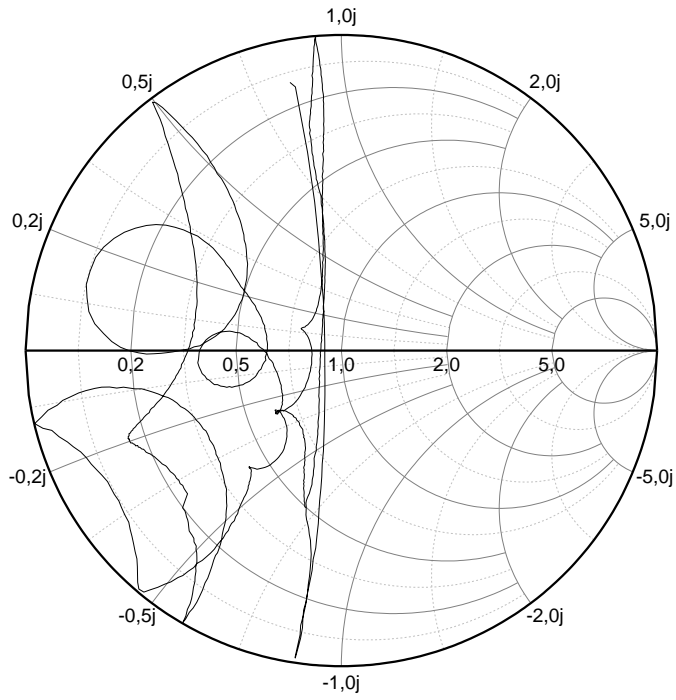
Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του χάρτη Smith είναι πως η εξέταση μιας γραμμής μεταφοράς κατά μήκος της αντιστοιχεί στην εξέταση κατά μήκος ενός σωστά σχεδιασμένου κύκλου πάνω στο διάγραμμα ο οποίος να αντιστοιχεί σε σταθερό SWR. Ο χάρτης έχει σχεδιαστεί για χρήση με κανονικοποιημένες σύνθετες αντιστάσεις και σύνθετες αγωγιμότητες. Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει να μην χρειαζόμαστε διαφορετικούς χάρτες για οποιαδήποτε δυνατή τιμή χαρακτηριστικής αντίστασης της κάθε γραμμής μεταφοράς. Επίσης, μας επιτρέπει να εξετάσουμε τις γραμμές μεταφοράς μόνο σε διάστημα μήκους  $\lambda/2$ , αφού οι συνθήκες επαναλαμβάνονται περιοδικά σε διαστήματα μήκους  $\lambda/2$  αν πρόκειται για γραμμές μεταφοράς χωρίς απώλειες [89]. Στη συνέχεια δίνονται οι χάρτες Smith των υπό εξέταση επαφών των φορέσιμων κεραίων.

## Επαφές υπερήχων

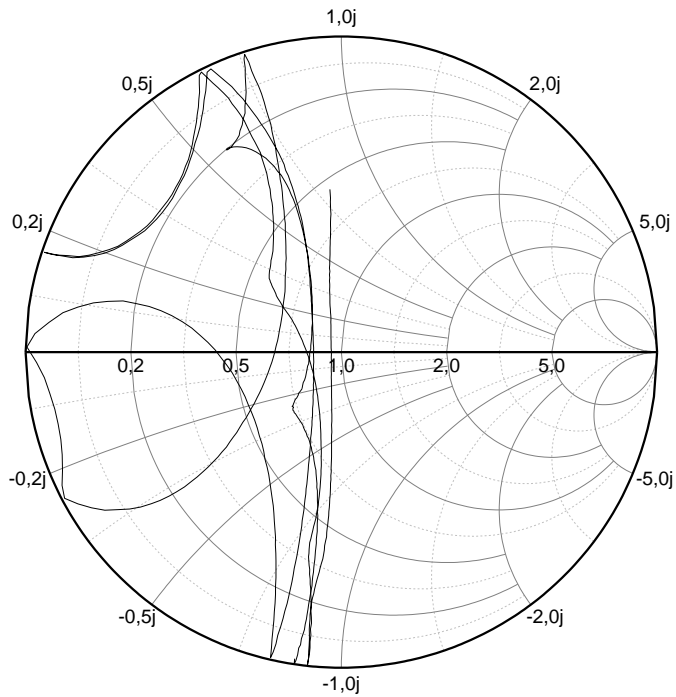
### Επαφή 1



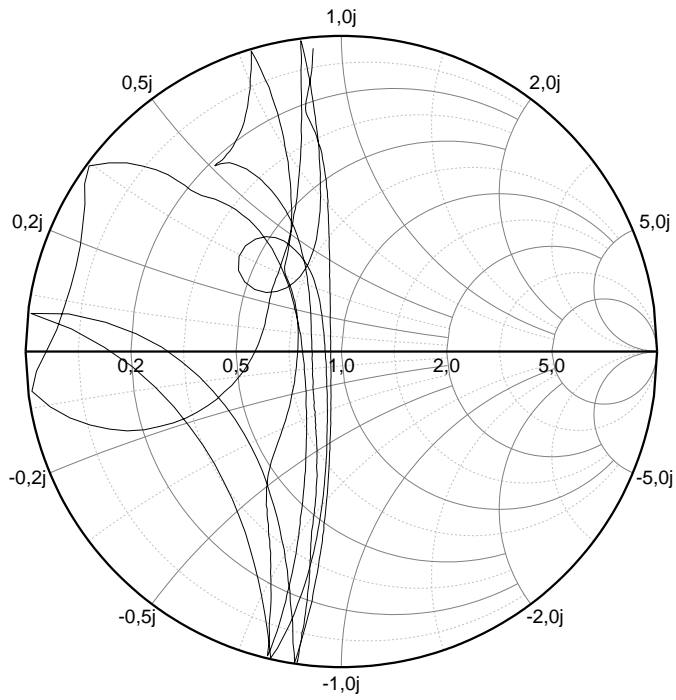
### Επαφή 2



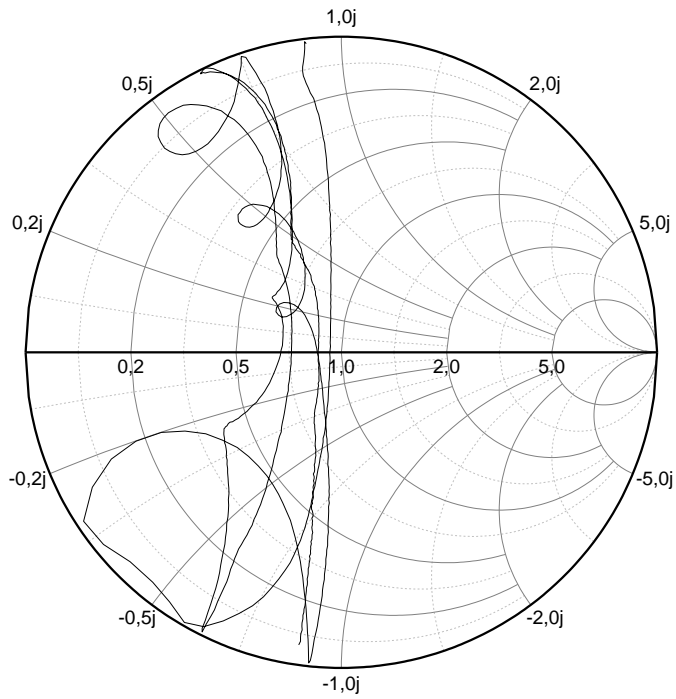
### Επαφή 3



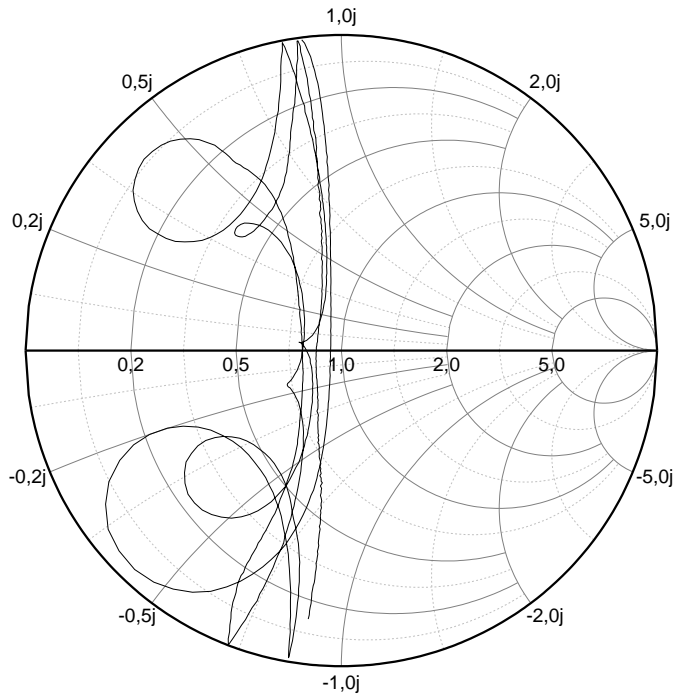
Κεντημένες επαφές  
Επαφή 4



Επαφή 5

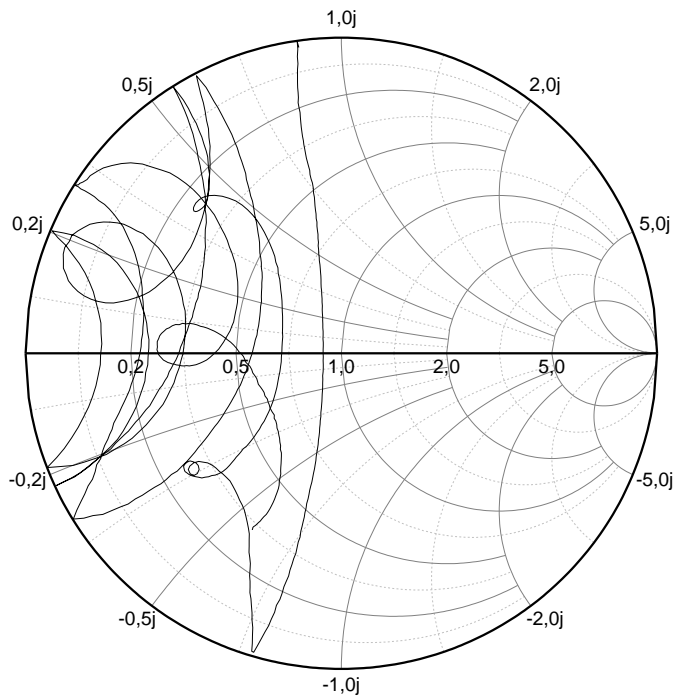


Επαφή 6

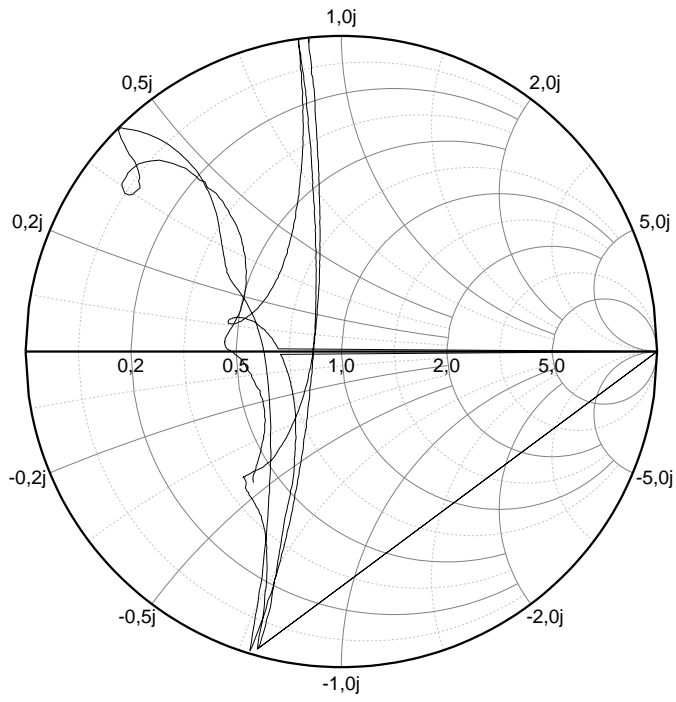


Επαφές συγκόλλησης αντίστασης

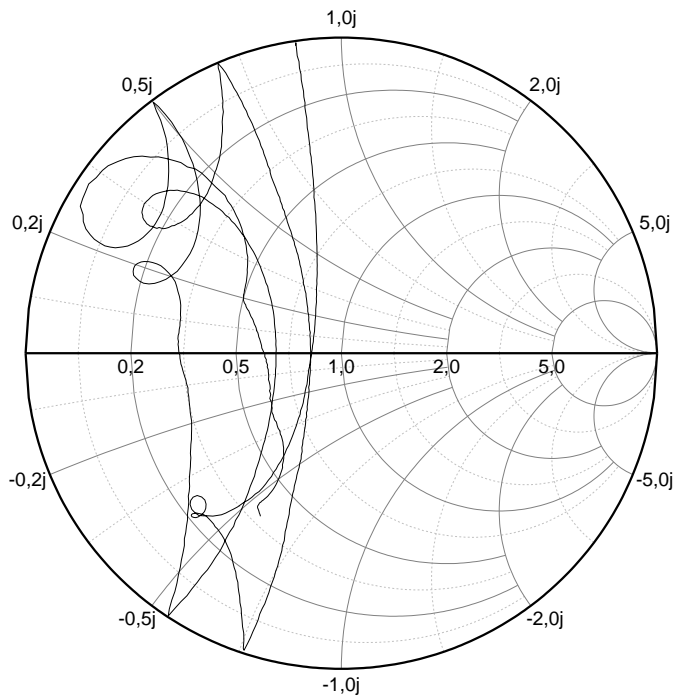
Επαφή 7



### Επαφή 8

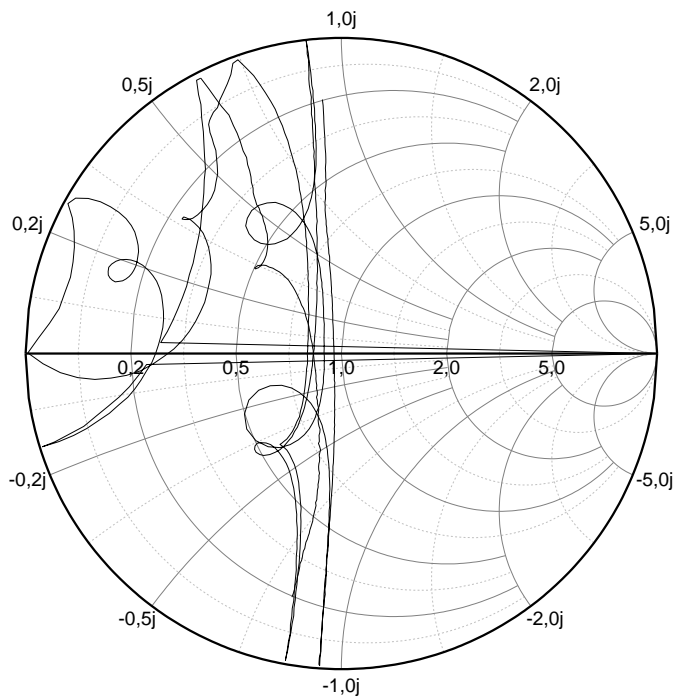


### Επαφή 9

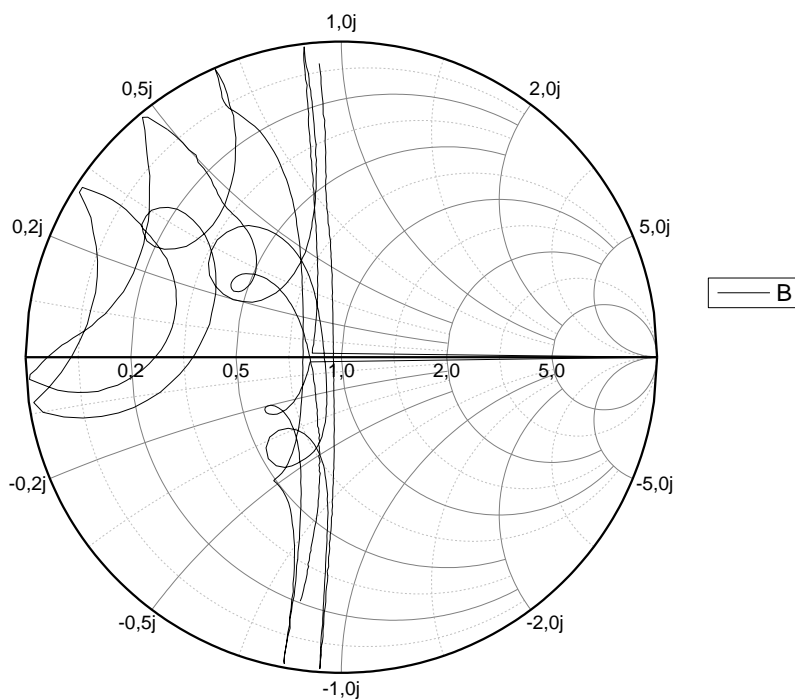


Επαφές συγκόλλησης

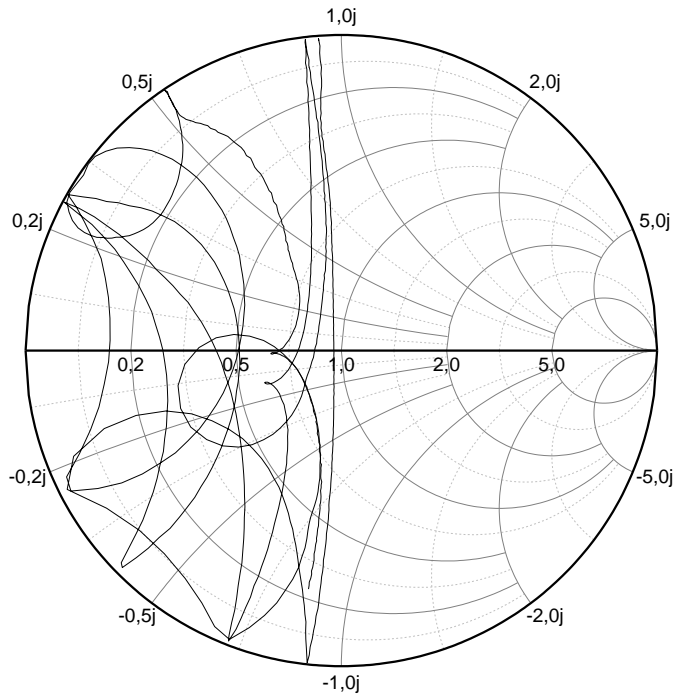
Επαφή 10



Επαφή 11

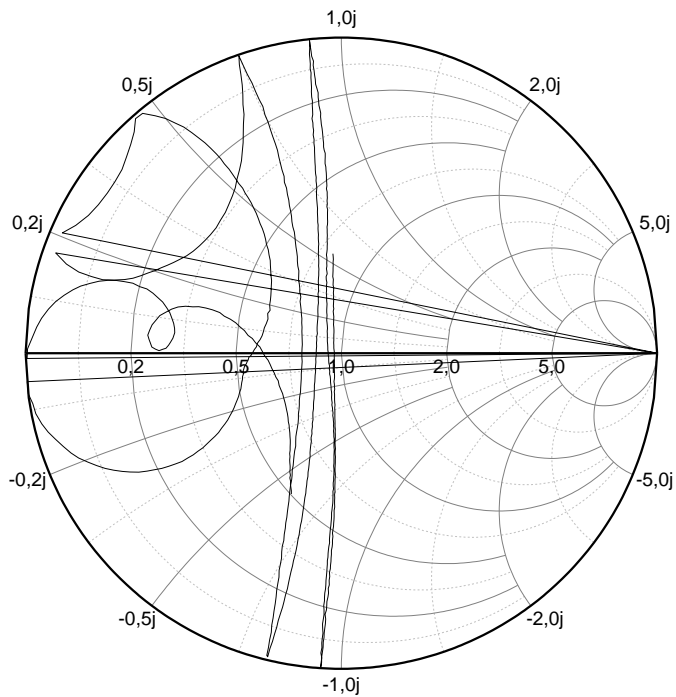


Επαφή 12

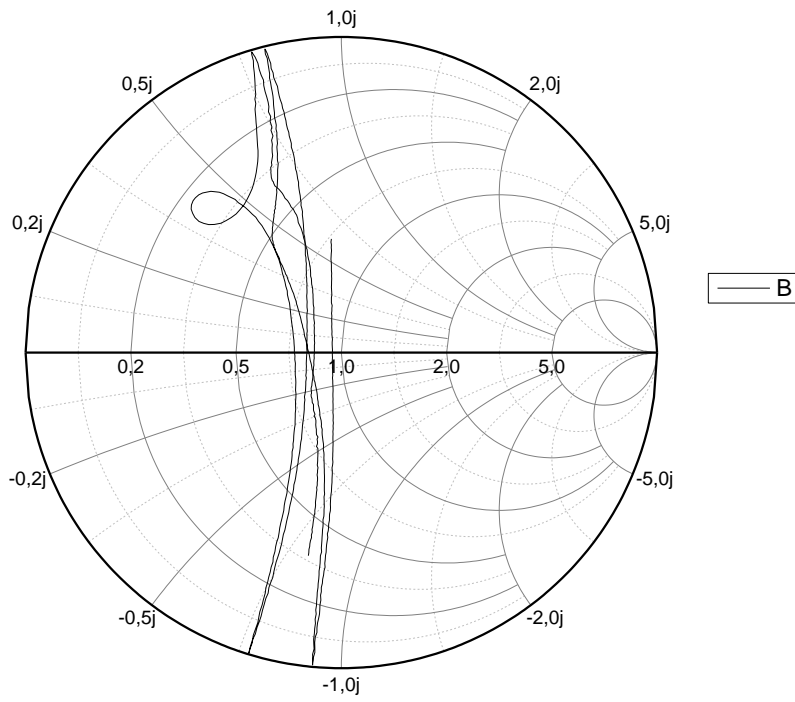


Επαφές αγώνιμης κόλλας

Επαφή 13



Επαφή 14





## 4.5 Διάγραμμα γραμμικής απόκλισης φάσης

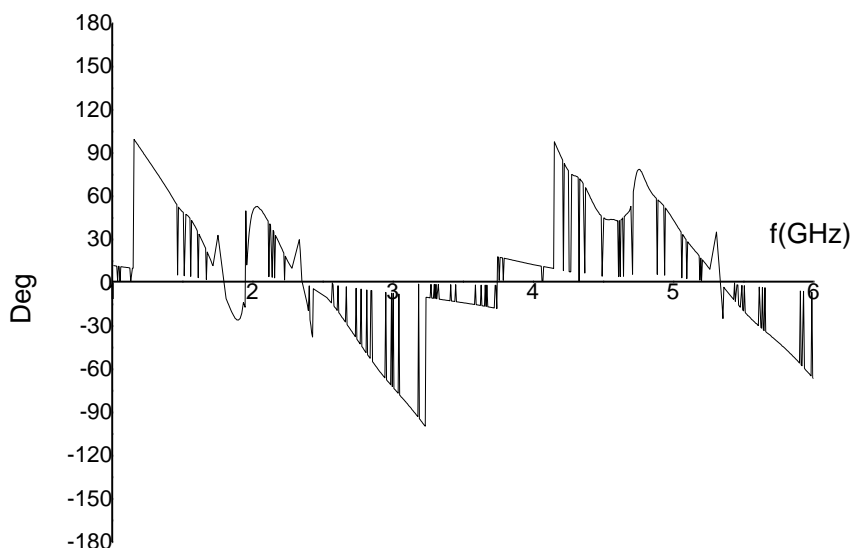
Ο χρόνος καθυστέρησης πολλών συσκευών είναι σε ορισμένες συχνότητες μεγαλύτερος και έτσι δημιουργείται μη γραμμική μετατόπιση φάσης (non linear phase shift), συμπεριλαμβανομένης της παραμόρφωσης πολλών συνιστωσών συχνότητας των σημάτων. Μία μέθοδος για την μέτρηση της μη γραμμικής μετατόπισης φάσης είναι η μέτρηση της γραμμικής απόκλισης φάσης (linear phase deviation) [90]. Ένα διάγραμμα γραμμικής απόκλισης φάσης απεικονίζει την απόκλιση φάσης του σήματος σε σχέση με το βαθμονομημένο σήμα αναφοράς. Η φάση εμφανίζεται στον άξονα  $y$  και η συχνότητα στον άξονα  $x$ .

Το μήκος κύματος του σήματος μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας του κατά τη μετάδοση. Έτσι παράγεται η προφανής μετατόπιση φάσης η οποία είναι γραμμική όταν η απόκριση φάσης της συσκευής είναι ανάλογη της συχνότητας. Το τμήμα που δείχνει τη σχέση μεταξύ της φάσης και της συχνότητας στον αναλυτή είναι μια πλάγια γραμμή. Η κλίση της είναι ανάλογη με το ηλεκτρικό μήκος της συσκευής. Η μετατόπιση φάσης πρέπει να είναι γραμμική για μετάδοση σήματος χωρίς παραμόρφωση.

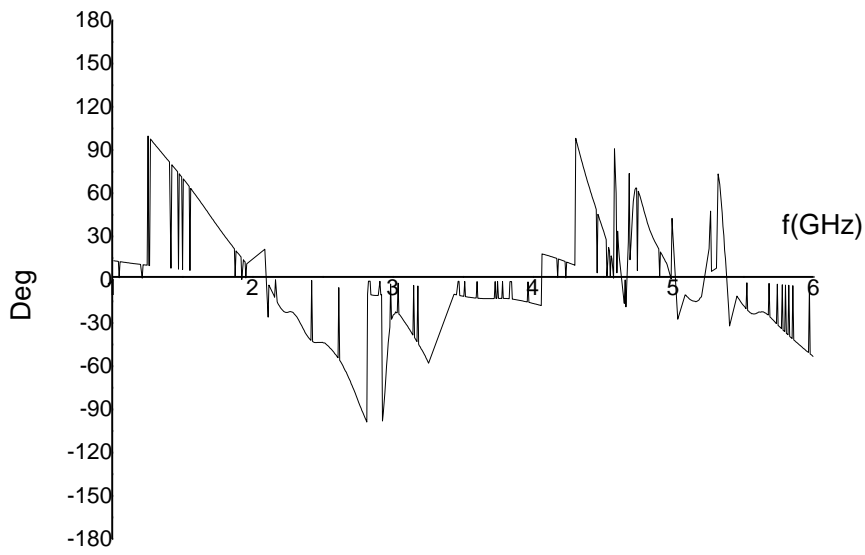
Σε σχέση με την μέτρηση group delay, η μέτρηση της γραμμικής απόκλισης φάσης έχει τα πλεονεκτήματα των δεδομένων φάσης αντί των δεδομένων χρόνου και του μειωμένου θορύβου. Δεδομένου ότι μόνο η απόκλιση από τη γραμμική φάση προκαλεί παραμόρφωση φάσης, είναι επιθυμητό να αφαιρεθεί το γραμμικό τμήμα της απόκρισης φάσης από τη μέτρηση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τη δυνατότητα ηλεκτρικής καθυστέρησης (electrical delay) του αναλυτή για να ακυρώσει μαθηματικά το ηλεκτρικό μήκος της υπό μέτρηση συσκευής [90]. Παρακάτω δίνονται τα διαγράμματα γραμμικής απόκλισης φάσης των υπό εξέταση επαφών των φορέσιμων κεραιών.

### Επαφές υπερήχων

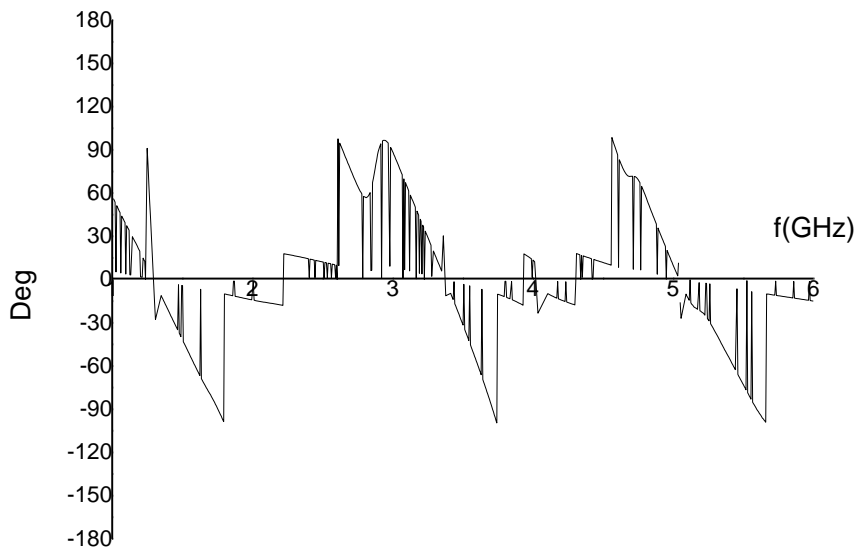
#### Επαφή 1



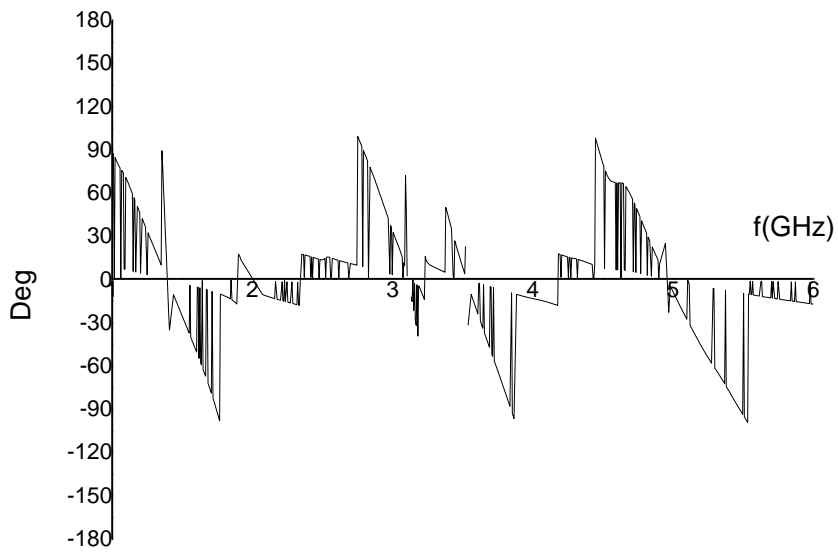
## Επαφή 2



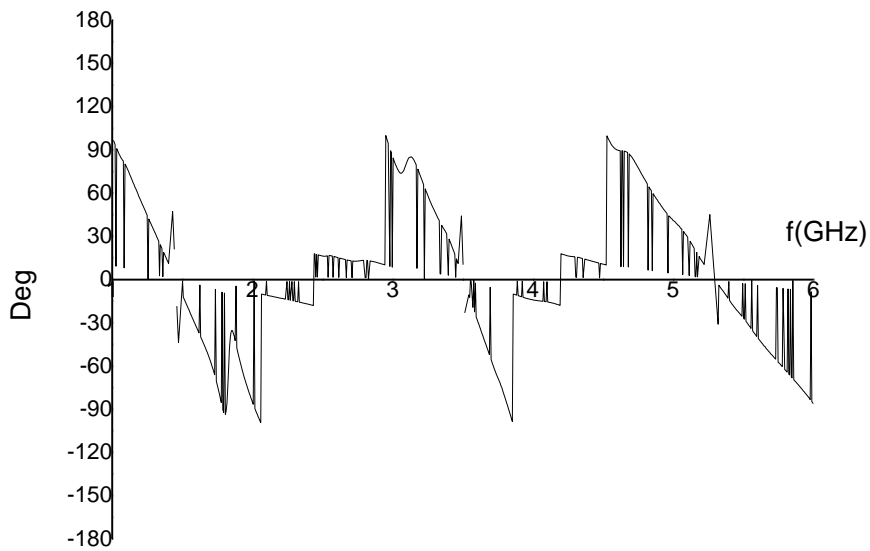
## Επαφή 3



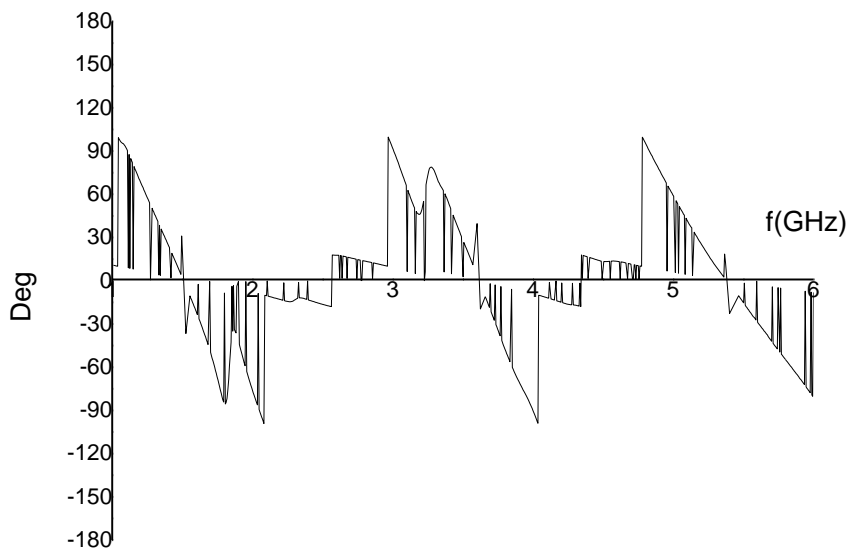
Κεντημένες επαφές  
Επαφή 4



Επαφή 5

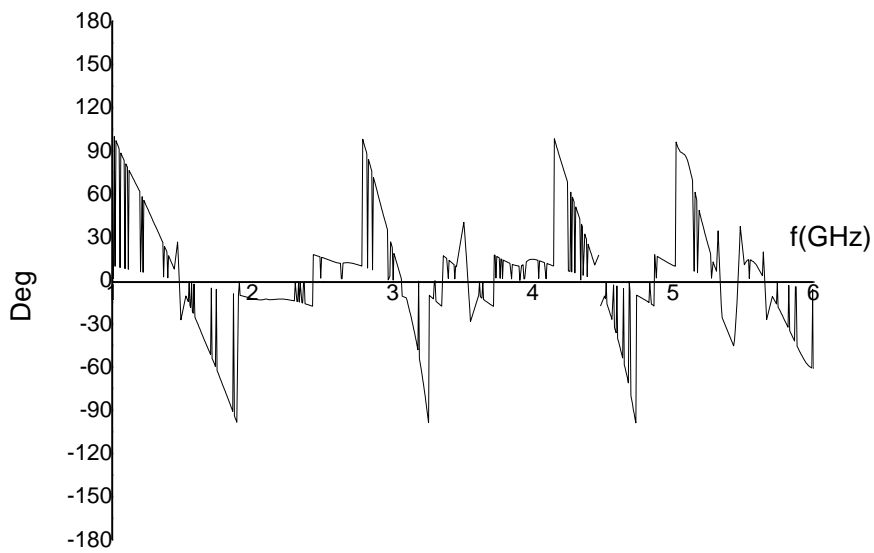


### Επαφή 6

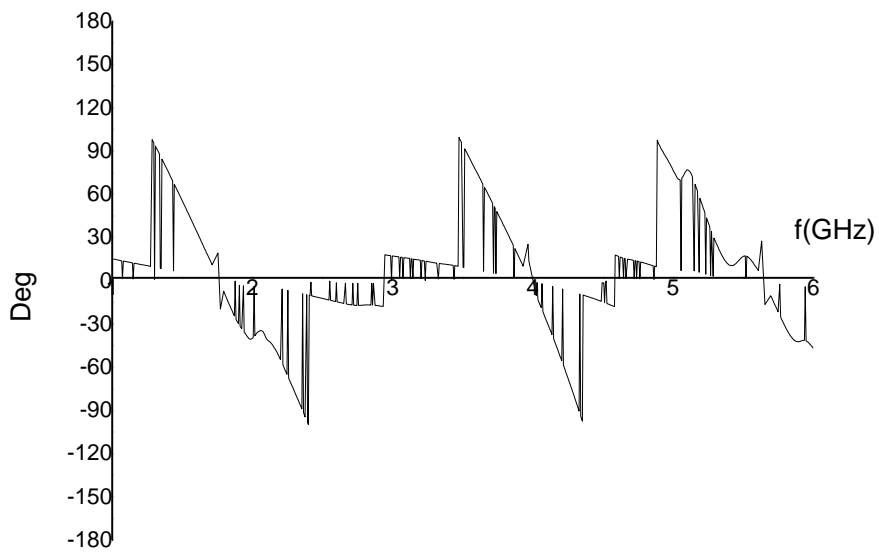


### Επαφές συγκόλλησης αντίστασης

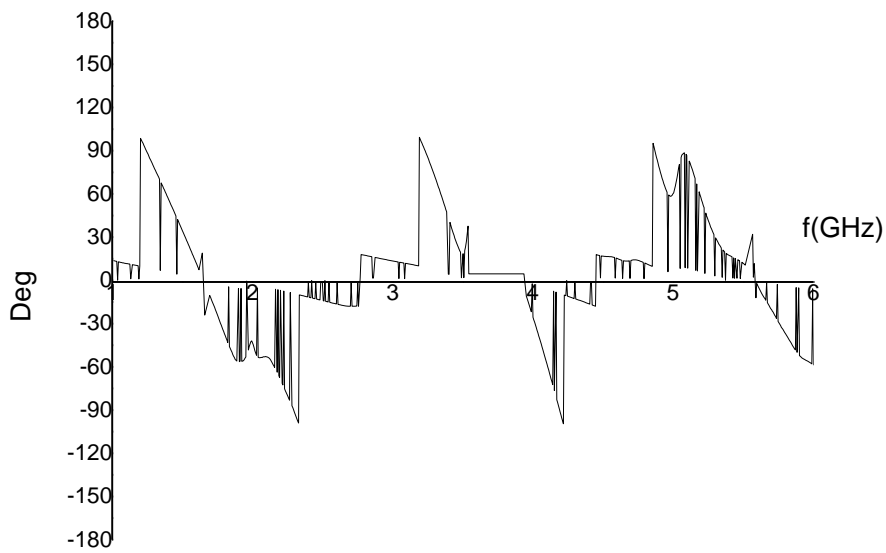
#### Επαφή 7



### Επαφή 8

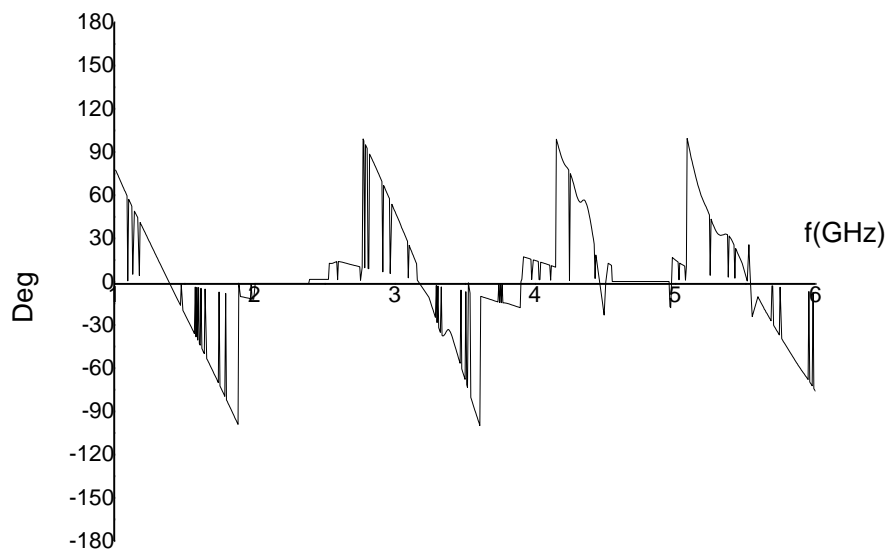


### Επαφή 9

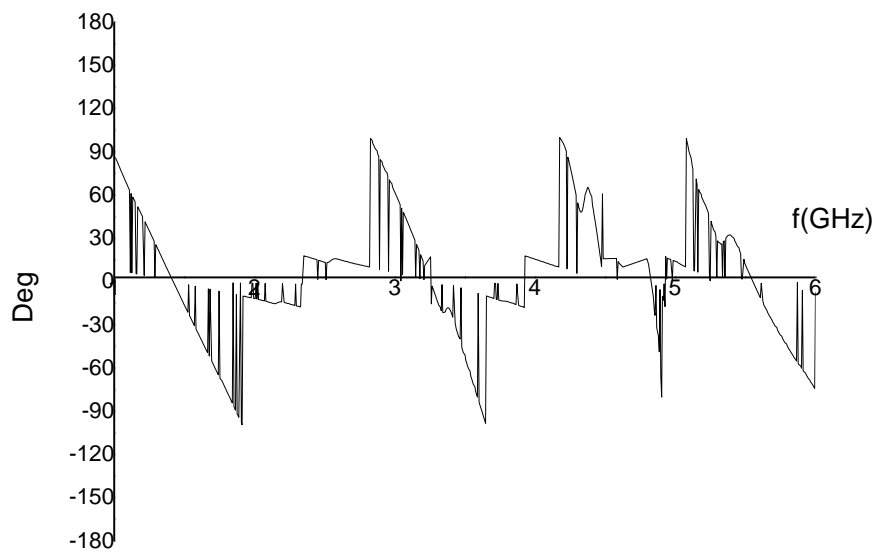


Επαφές συγκόλλησης

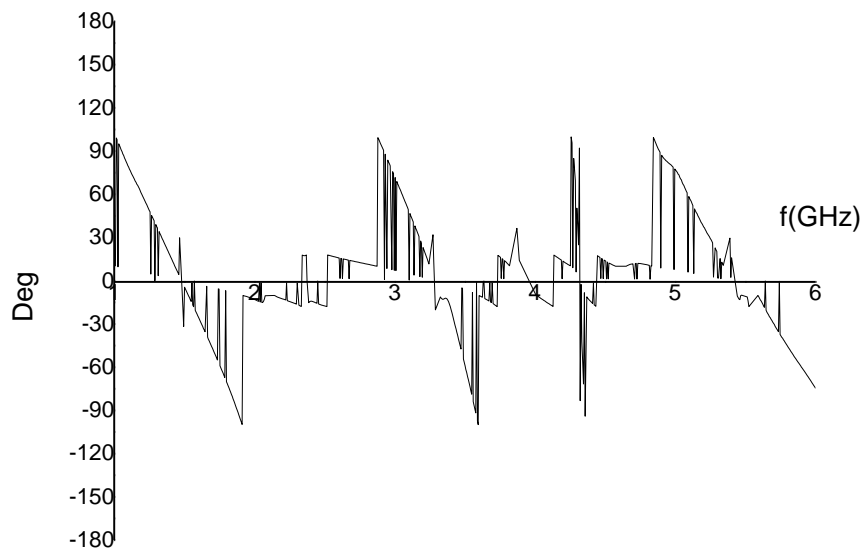
Επαφή 10



Επαφή 11

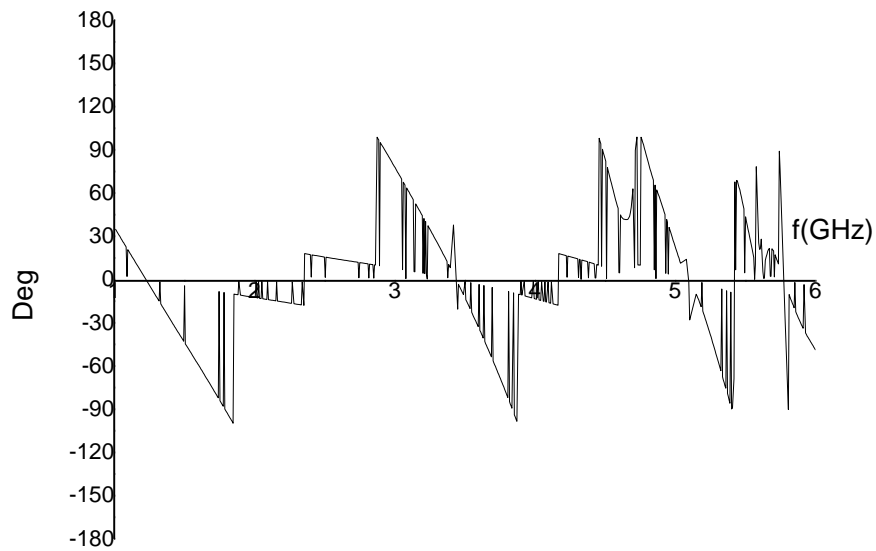


## Επαφή 12

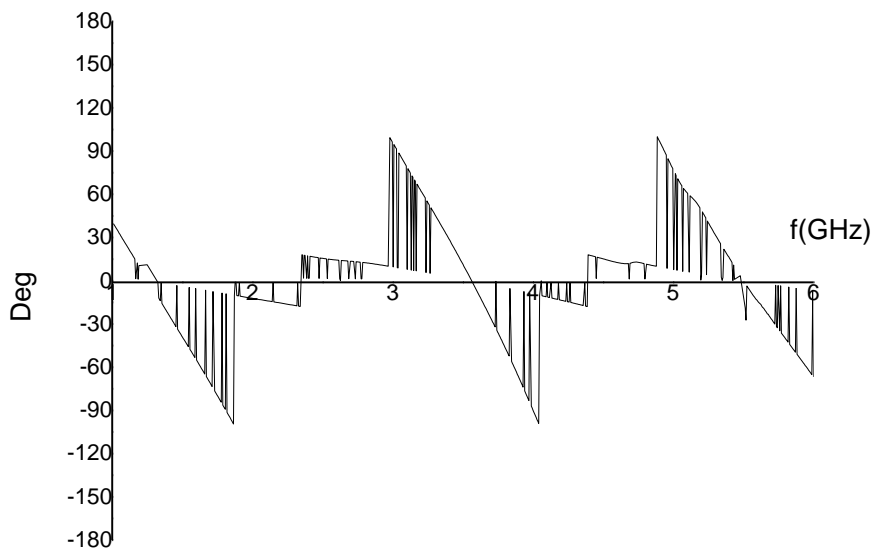


## Επαφές αγώνιμης κόλλας

### Επαφή 13



Επαφή 14





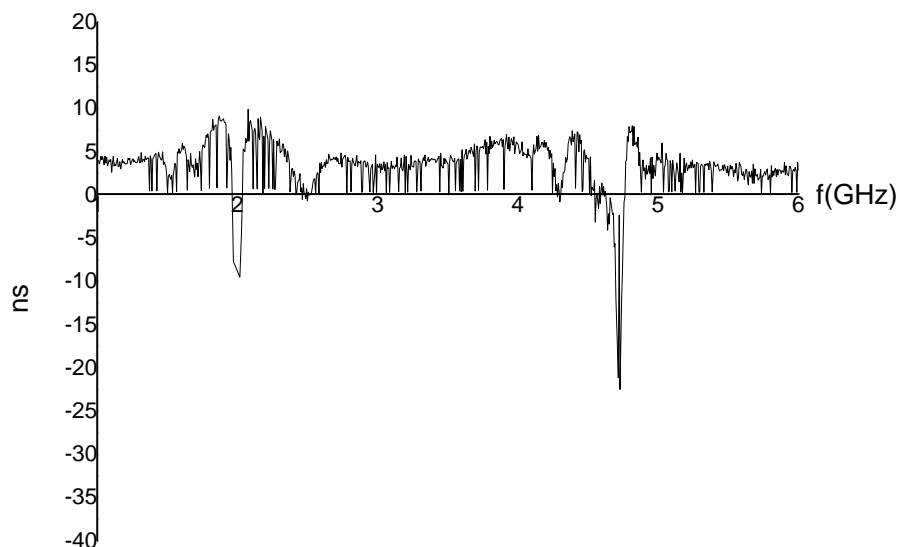
## 4.6 Διάγραμμα group delay

Το group delay (GD) είναι μία μέτρηση που αφορά το χρόνο διέλευσης ενός σήματος από μία συσκευή. Για πιο περίπλοκα σήματα όπως ένας παλμός, μια μεγάλη διακύμανση θα εμφανιστεί σε όλο το εύρος ζώνης του σήματος εισάγοντας παραμόρφωση που μπορεί να μειώσει την ακεραιότητα του σήματος. Κατά τη διάρκεια της μέτρησης, ο αναλυτής μετρά τη φάση σε δύο στενά απέχουσες συχνότητες και στη συνέχεια υπολογίζει την κλίση φάσης [91].

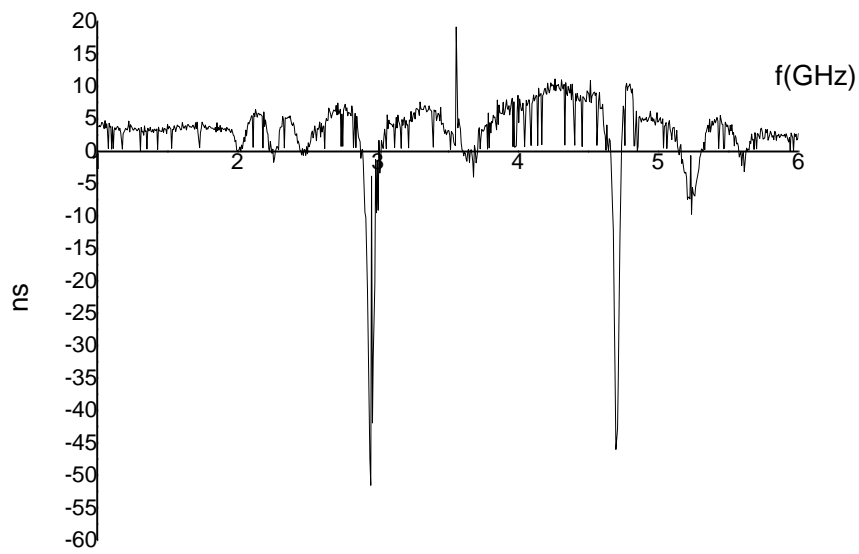
Η γραμμική παραμόρφωση συμβαίνει σε γραμμικά συστήματα στα οποία το μέγεθος της απόκρισης συχνότητας δεν είναι σταθερό και η φάση της απόκρισης συχνότητας είναι μη γραμμική. Η παραμόρφωση φάσης μετριέται χρησιμοποιώντας το GD. Εκφράζεται σε μονάδες χρόνου (νανοδευτερόλεπτα) και σχετίζεται με τη μεταβολή της μετατόπισης φάσης με τη συχνότητα. Σε μη παραμορφωτικά συστήματα, τα χαρακτηριστικά φάσης πρέπει να έχουν γραμμική κλίση έτσι ο λόγος είναι σταθερός για όλες τις συχνότητες και αυτό αντιπροσωπεύει ένα σταθερό GD. Ωστόσο, τυχόν αποκλίσεις από τη γραμμική φάση πάνω στο εύρος συχνοτήτων θα προκαλέσει διακυμάνσεις στο GD [91]. Στη συνέχεια δίνονται τα διαγράμματα (GD) των υπό εξέταση επαφών των φορέσιμων κεραιών.

### Επαφές υπερήχων

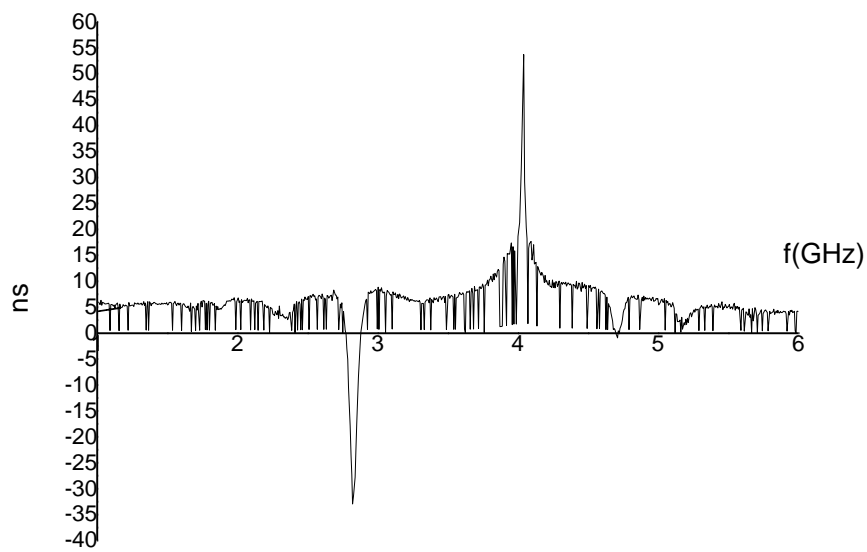
#### Επαφή 1



## Επαφή 2

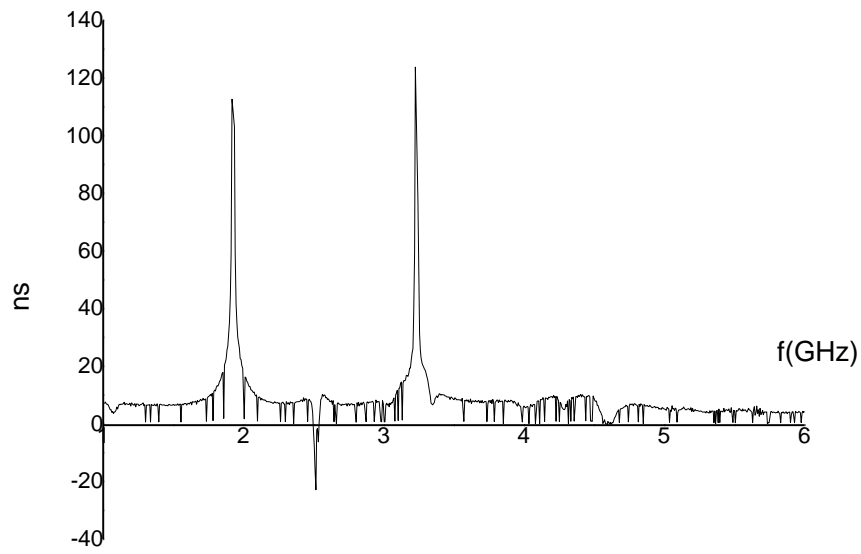


## Επαφή 3

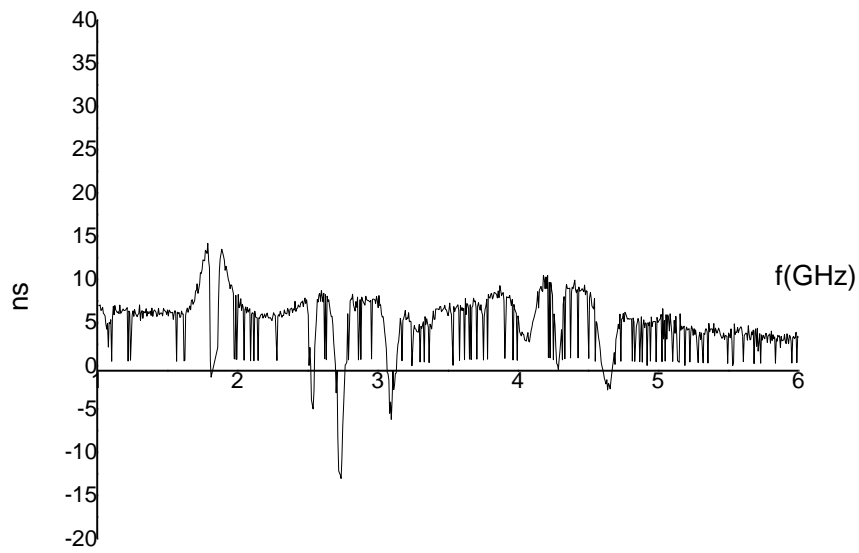


Κεντημένες επαφές

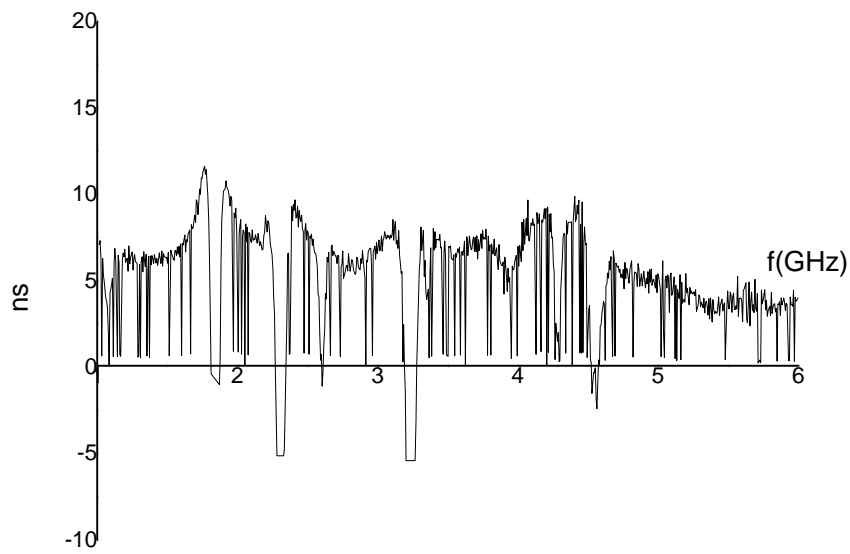
Επαφή 4



Επαφή 5

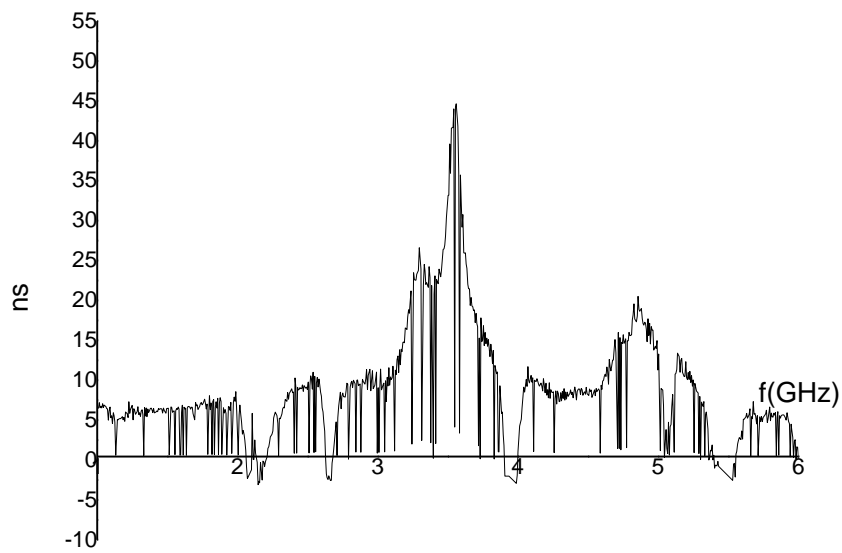


### Επαφή 6

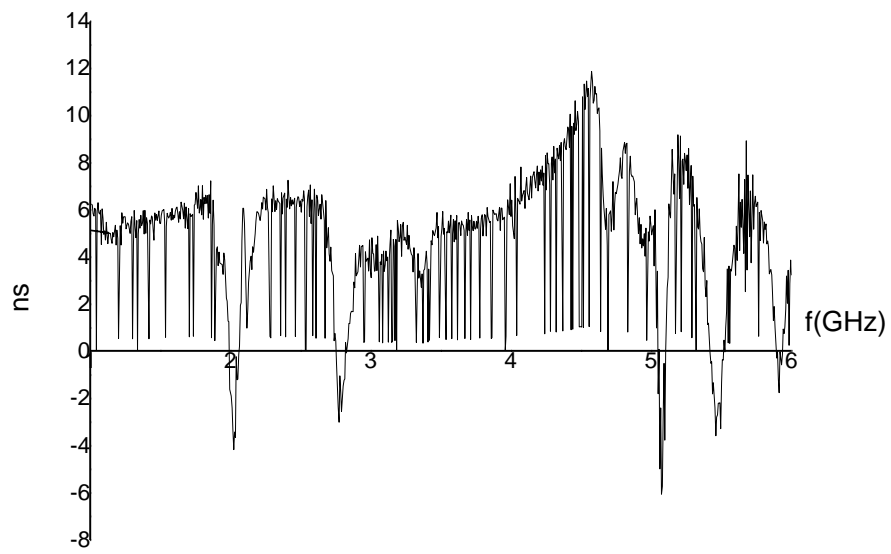


### Επαφές συγκόλλησης αντίστασης

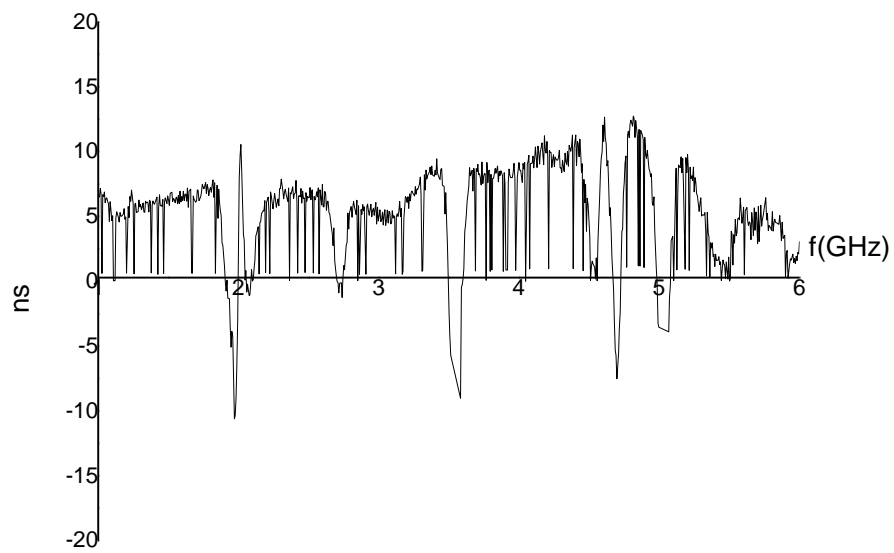
#### Επαφή 7



### Επαφή 8

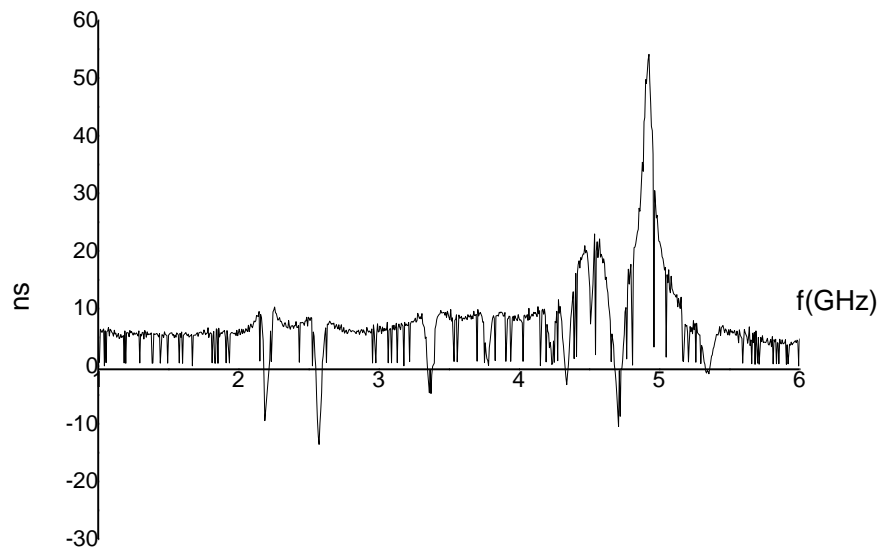


### Επαφή 9

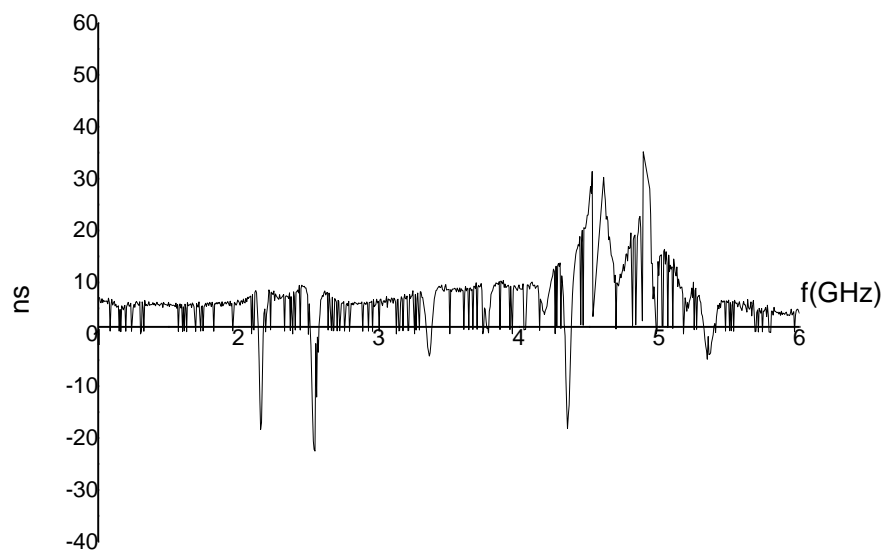


Επαφές συγκόλλησης

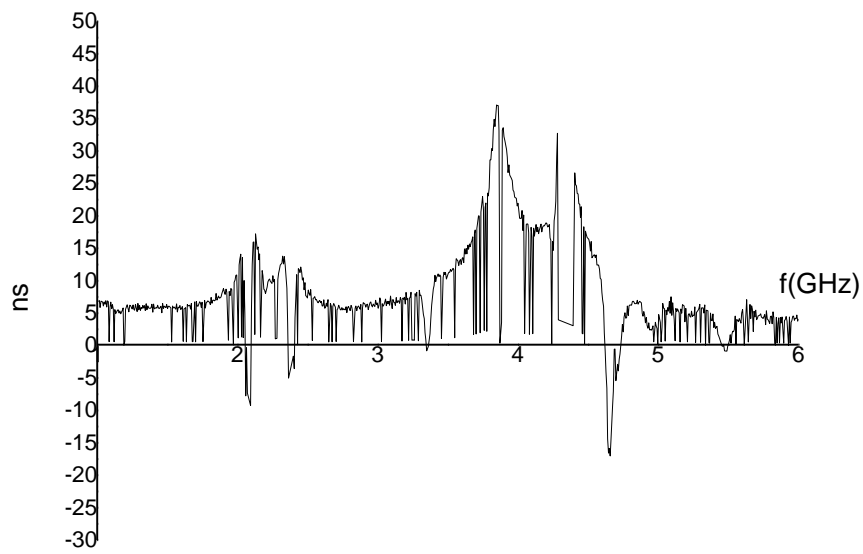
Επαφή 10



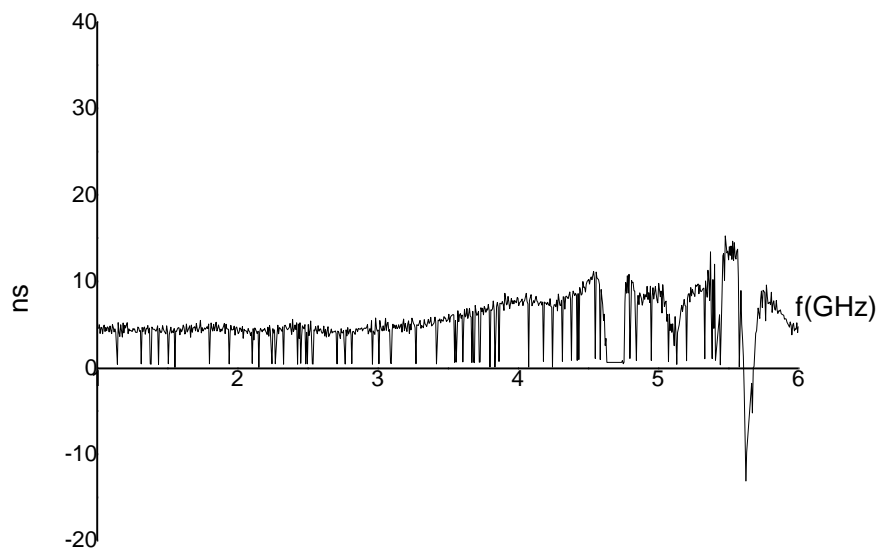
Επαφή 11



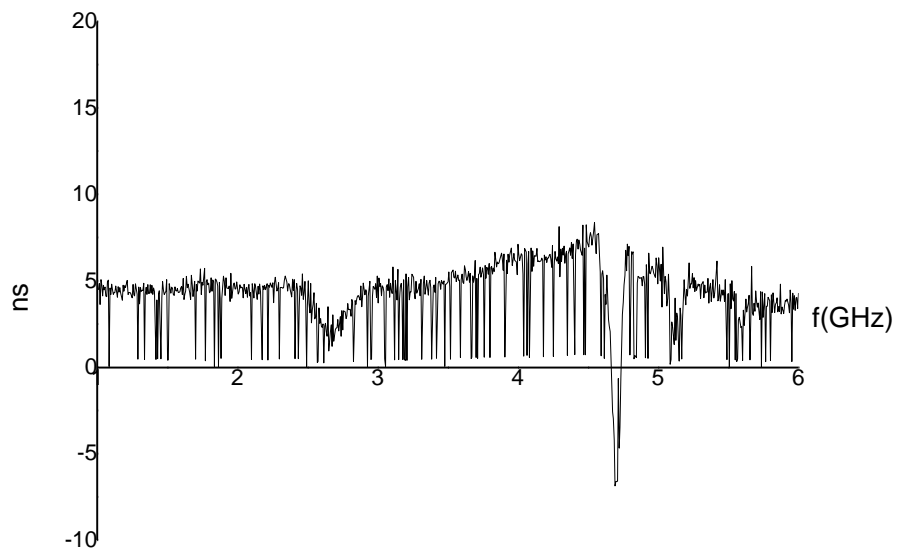
## Επαφή 12



## Επαφές αγώνιμης κόλλας Επαφή 13



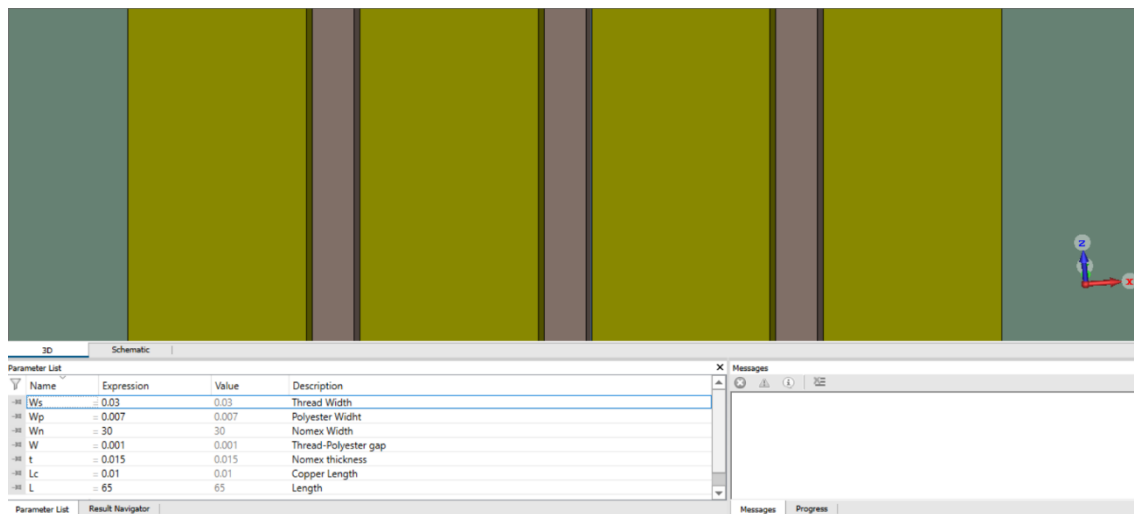
Επαφή 14







Όταν ολοκληρώθηκε ο σχεδιασμός της γραμμής μεταφοράς στο πρόγραμμα CST η εικόνα που προκύπτει είναι η παρακάτω **Εικόνα 6.2**. Με πράσινο χρώμα απεικονίζεται το υλικό nomex, με κίτρινο ο άργυρος και με καφέ το polyester. Οι λεπτές στήλες ανάμεσα σε άργυρο και polyester απεικονίζουν το κενό ανάμεσα στα υλικά.

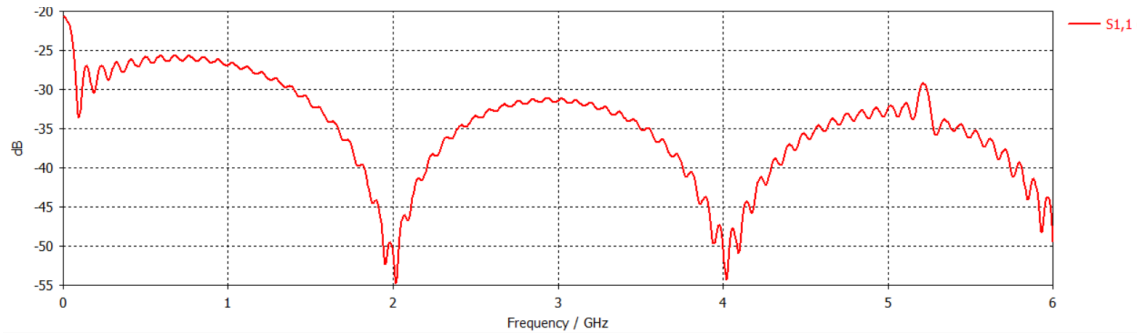


**Εικόνα 5.2:** Γραμμή μεταφοράς στο πρόγραμμα CST

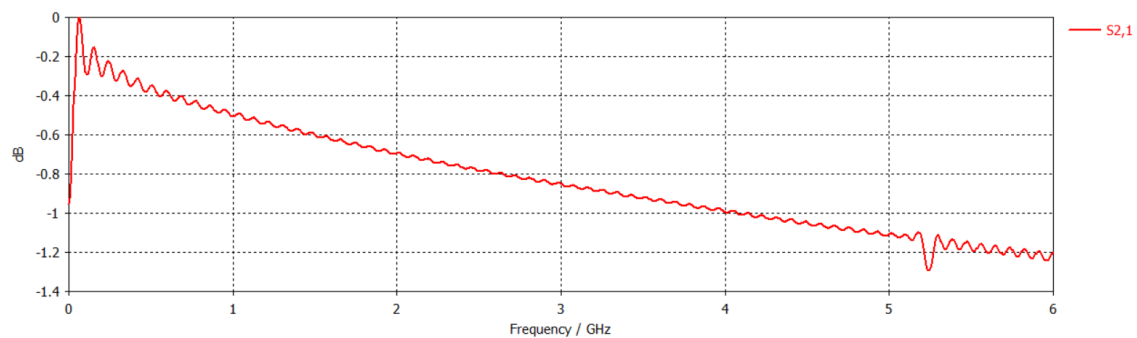
## 5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Ακολουθούν οι μετρήσεις από την προσομοίωση στο CST για την γραμμή μεταφοράς που περιγράφεται από την **Εικόνα 6.1** και τον **Πίνακα 6.1**.

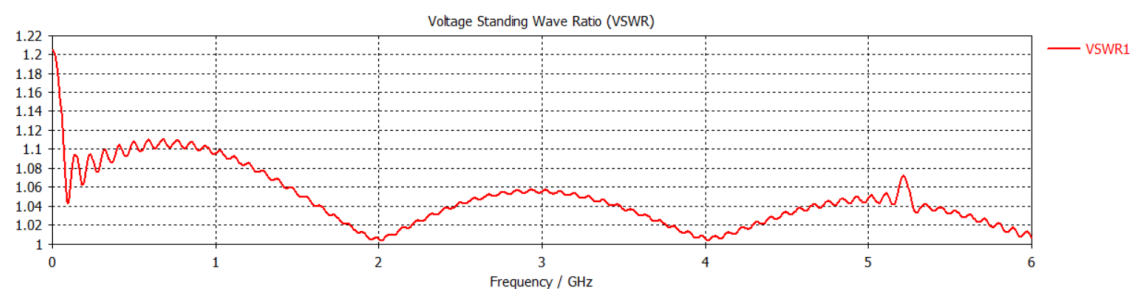
### Παράμετρος S11



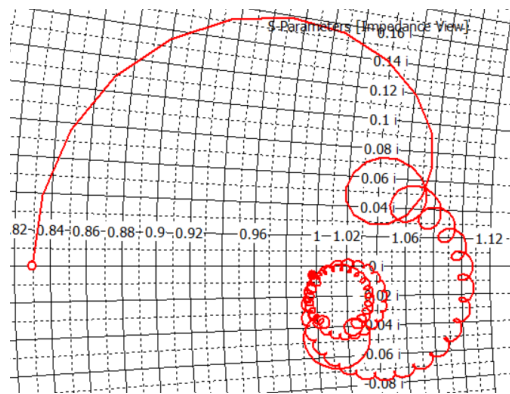
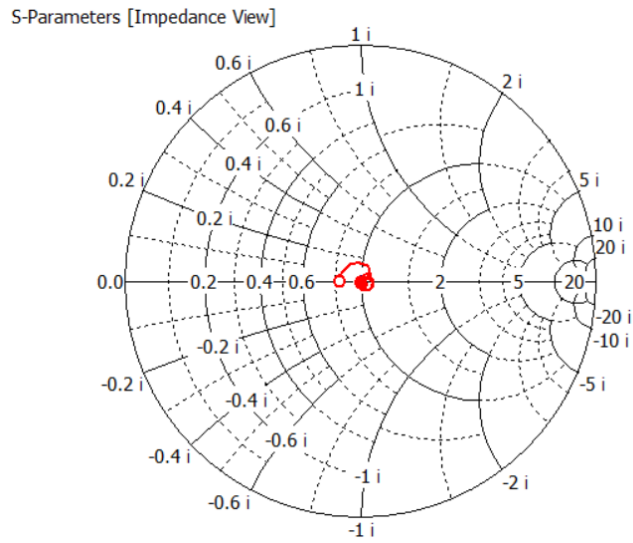
### Παράμετρος S21



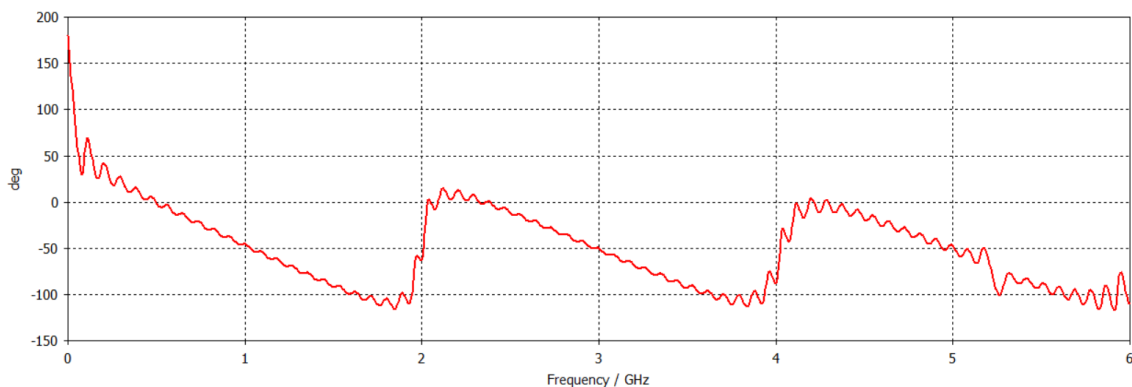
### VSWR



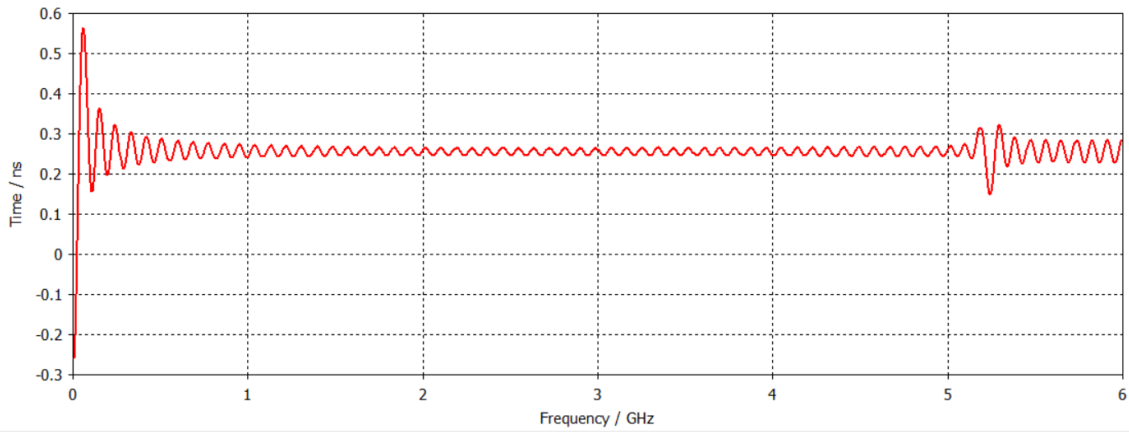
## Χάρτης Smith



## Διάγραμμα γραμμικής απόκλισης φάσης



### Διάγραμμα group delay



### 5.3 Συμπεράσματα

Τα υπάρχοντα αγώγιμα υλικά κλωστοϋφαντουργίας παρουσιάζουν μια αντιστάθμιση μεταξύ μηχανικής και ηλεκτρικής απόδοσης. Για παράδειγμα, τα μεταλλικά νήματα έχουν χαμηλή αντίσταση ανά μήκος (έως 2Ω/m) αλλά εμφανίζουν επίσης χαμηλά ελαστικά όρια καταπόνησης (0,3% για τον χαλκό), γεγονός που τα καθιστά εύθραυστα. Εναλλακτικά, τα νήματα με βάση τον άνθρακα έχουν ελαστικά όρια καταπόνησης μεγαλύτερα του 5% αλλά εμφανίζουν υψηλή αντίσταση ανά μήκος (>100 Ω/m) που δεν συμβαδίζει με τις απαιτήσεις για κεραίες και άλλα εξαρτήματα ραδιοσυχνοτήτων [85],[86],[87]. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των τεχνολογιών διασύνδεσης για ενσωματωμένων αγωγών στα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα παρουσιάζονται στον παρακάτω **Πίνακα 6.2**.

Τεχνολογία διασύνδεσης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Συγκόλληση	Καθιερωμένη και κλιμακούμενη διαδικασία. Γυμνά και μονωμένα καλώδια.	Οι υψηλές θερμοκρασίες διεργασίας μπορεί να βλάψουν τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα.
Συγκόλληση με κόλλα	Ταυτόχρονη υλοποίηση ηλεκτρολογικών και μηχανικών επαφών. Δυνατότητα επισκευής λόγω επανάληψης τήξης	Μειωμένη θερμοκρασία λειτουργίας
Συγκόλληση με αντίσταση	Καθιερωμένη και γρήγορη διαδικασία. Γυμνά και μονωμένα καλώδια.	Οι υψηλές θερμοκρασίες διεργασίας μπορούν να βλάψουν τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα. Η επαφή απαιτεί πρόσθετη ενθυλάκωση για αξιοπιστία.
Κεντημένη	Επεξεργασία σε θερμοκρασία δωματίου. Χρησιμοποιείται συνήθως σε παραγωγή συμβατικών υφασμάτων.	Η επαφή απαιτεί πρόσθετη ενθυλάκωση. Μόνο γυμνά καλώδια.
Μηχανικοί σύνδεσμοι	Επεξεργασία σε θερμοκρασία δωματίου. Οι επαφές μπορεί επίσης να είναι εξωτερικοί σύνδεσμοι.	Ογκώδεις, σκληροί σύνδεσμοι μειώνουν την άνεση. Αργή διαδικασία με βήμα χειροκίνητης εργασίας.

**Πίνακας 5.2:** Σύγκριση τυπικών τεχνολογιών για τη διασύνδεση αγωγών ενσωματωμένων σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα

Αναλύοντας τις πειραματικές μετρήσεις που παρατίθενται στο κεφάλαιο 4 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- i. Για την παράμετρο S11 προέκυψε ότι οι επαφές υπερήχων εμφανίζουν δύο ελάχιστα στα 2.5GHz και στα 5GHz με τιμές γύρω από τα -30db. Οι κεντημένες επαφές εμφανίζουν ελάχιστα στη ζώνη συχνοτήτων 1.5GHz με 4.5GHz με τιμές κοντά στα -30db. Οι επαφές συγκόλλησης αντίστασης έχουν ελάχιστα στην περιοχή συχνοτήτων 2GHz με 6GHz με τιμές στα -40db. Οι επαφές συγκόλλησης εμφανίζουν την ελάχιστη τιμή του S11 σε συχνότητες από 2,5GHz έως 5.5GHz ενώ η τιμή του είναι στα -30db. Για τις επαφές αγωγίμης κόλλας διαπιστώθηκε ότι την ελάχιστη τιμή της S11 την εμφανίζουν σε συχνότητες κοντά στα 4.5GHz. Οι επαφές 13 έχουν μέση ελάχιστη παράμετρο -35db ενώ οι επαφές 14 έχουν περίπου -25db.
- ii. Για την παράμετρο S21 διαπιστώθηκε ότι με την αύξηση της συχνότητας, η τιμή της παραμέτρου μειώνεται σε όλες τις επαφές, εκτός τις επαφές αγωγίμης κόλλας στις οποίες παρατηρείται ότι η παράμετρος διατηρεί μια σταθερή τιμή με μια μικρή διακύμανση. Όσον αφορά τις τιμές αυτές λαμβάνουν ελάχιστο στα -60db.
- iii. Σε ότι αφορά την παράμετρο VSWR, οι επαφές υπερήχων εμφανίζουν μέγιστες τιμές στα 2.5GHz, στα 3.5GHz και στα 5.5GHz, οι κεντημένες επαφές στα 2GHz και 4.5GHz ενώ οι επαφές συγκόλλησης και συγκόλλησης αντίστασης σε συχνότητες 2GHz και 4,5GHz. Στις επαφές αγωγίμης κόλλας, η παράμετρος λαμβάνει υψηλές τιμές στα 1.5GHz και 3GHz.
- iv. Στους χάρτες Smith παρατηρείται ότι η πλειοψηφία των επαφών εμφανίζει επαγωγική συμπεριφορά. Στα διαγράμματα γραμμικής απόκλισης φάσης παρατηρούμε σε όλες τις επαφές γραμμική συμπεριφορά. Στα διαγράμματα group delay όλες οι επαφές παρουσιάζουν λίγες διακυμάνσεις ενώ όσον αφορά τις τιμές, οι επαφές υπερήχων εμφανίζουν τιμή γύρω στα 5ns ενώ οι κεντημένες επαφές στα 10ns. Οι τρεις επαφές συγκόλλησης αντίστασης που μετρήθηκαν έχουν και αυτές τιμές γύρω στα 10ns. Οι επαφές συγκόλλησης παρουσιάζουν τιμές στα 8ns και της αγωγίμης κόλλας στα 5ns.

Για την γραμμή μεταφοράς της προσομοίωσης στο CST προκύπτει:

- i. Για την παράμετρο S11 ελάχιστη τιμή -55db στις συχνότητες 2GHz, 4GHz και 6GHz. Συγκρίνοντας τις τιμές αυτές με τις μετρήσεις που έγιναν στον VNA παρατηρείται ταύτιση όσον αφορά τη συχνότητα των 2GHz για τις επαφές υπερήχων αλλά με διαφορά της τάξης του 50% στην ελάχιστη τιμή του S11, ταύτιση με τις κεντημένες επαφές στην συχνότητα ελάχιστης παραμέτρου S11 αλλά πάλι με διαφορά της τάξης του 50% στην ελάχιστη τιμή του S11, απόκλιση με τις επαφές συγκόλλησης αντίστασης όσον αφορά τη συχνότητα και τις τιμές του S11, μικρή σχετικά απόκλιση με τις επαφές συγκόλλησης στην συχνότητα και στην τιμή του S11 και μεγαλύτερη απόκλιση με τις επαφές αγωγίμης κόλλας.
- ii. Για την παράμετρο S21 προκύπτει μια γραμμική μείωση της τιμής της, η οποία παρατηρείται με κάποιες διακυμάνσεις και σε όλες τις επαφές που μετρήθηκαν. Όσον αφορά την τιμή της παραμέτρου αυτή είναι αρκετά χαμηλότερη στις επαφές που μετρήθηκαν.
- iii. Για το λόγο VSWR προκύπτει το αναμενόμενο διάγραμμα που σχετίζεται με το διάγραμμα για την S11 και βλέπουμε την ίδια συσχέτιση που προέκυψε για την S11.
- iv. Στο διάγραμμα απόκλισης φάσης εμφανίζεται η γραμμική συσχέτιση φάσης και συχνότητας με ελάχιστη τιμή για την φάση τις -100ο στις συχνότητες 2GHz, 4GHz και 6GHz. Στις επαφές που μετρήθηκαν παρατηρείται χαμηλότερη τιμή γύρω στις -170ο σε συχνότητες κοντά στις συχνότητες της γραμμής μεταφοράς της προσομοίωσης.
- v. Στην μέτρηση group delay έχουμε ταύτιση όσον αφορά τη σταθερότητα της τιμής και απόκλιση στις απόλυτες τιμές της αφού η προσομοίωση δίνει 0,25ns και οι μετρημένες επαφές δίνουν από 0,3ns έως 1ns.

## Βιβλιογραφία

- [1] Jung-Sim Roh (2010). Embroidered Wearable Multiresonant Folded Dipole Antenna for FM Reception, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol 9
- [2] I Gil and Fernandez Garcia (2017). Wearable Embroidered GPS Textile Antenna, *Electromagnetics Research Symposium, "Proceedings PIERS 2017"*, St. Petersburg, pp 655-659
- [3] M Pavec, T Kapetanakis, C Nikolopoulos, I Vardiambasis (2020). Implementation of an all-textile bow-tie antenna for the 868MHz and 915MHz ISM Bands, *Microwave and Wireless Communications*
- [4] Hilal Misilmani, Tarek Naous (2020). A survey on Antenna Designs for Breast Cancer Detection Using Microwave Imaging, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol 8,
- [5] Sharadindu Kirtania, Alan Elger, Rabiul Hasan (2020). Flexible Antennas: A Review, *Micromachines*, 11, 847
- [6] Paolo Nepa, Hendrik Rogier (2015). Wearable Antennas for Off-Body Radio Links at VHF and UHF bands: Challenges, State of the Art and Future Trends below 1GHz, *IEEE Antennas and Propagation*, vol 57
- [7] Gabriela Atanasova, Nikolay Atanasov (2020). Small Antennas for Wearable Sensor Networks: Impact of the Electromagnetic Properties of the Textiles on Antenna Performance, *Sensors*, vol 20
- [8] Ignacio Gill, Raul Fernandez-Garcia (2018). Embroidery Manufacturing Techniques for Textile Dipole Antenna applied to Wireless Body Area Network, *Textile Research Journal*
- [9] Muhammad Usman Ali Khan, Raad (2021). Bending Analysis of Polymer-Based Flexible Antennas for Wearable, *General IoT Applications: A Review*, *Polymers*
- [10] Abdul Wahab Memon, Igor Lima de Paula (2021). Breathable Textile Rectangular Ring Microstrip Patch Antenna at 2.45GHz for Wearable Applications, *Sensors*
- [11] Nikolay Atanasov, Gabriela Atanasova (2020). Wearable Textile Antennas with High Body-Antenna Isolation: Design, Fabrication, and Characterization Aspects, *Intech Open, Modern Printed-Circuit Antennas*
- [12] Husnu Yalduz, Timucin Emre Tabaru (2020). Design and analysis of low profile and low SAR full-textile UWB wearable antenna with metamaterial for WBAN applications, *International Journal of Electronics and Communications*
- [13] CENTEXBEL VKC. *Smart Textiles* (2019)
- [14] Bahare Mohamadzade, Raheel Hashmi (2019). Recent Advances in Fabrication Methods for Flexible Antennas in Wearable Devices: State of the Art, *Sensors* 2019, 19, 2312
- [15] Eman M. Swielam, Samiea M. Eltopshy (2019). Embroidery on Textiles as a Smart Solution for Wearable Applications, *International Design Journal*, Volume 9, Issue 2
- [16] A. Ojstrsek, S. Gorgieva (2020). Tailoring of Durable Conductive and UV-Shielding Properties on Cotton and Polyester Fabrics by PEDOT:PSS Screen-Printing. *Polymers*, 12, 2356
- [17] Alenka Ojstršek, Olivija Plohl (2021). Metallisation of Textiles and Protection of Conductive Layers: An Overview of Application Techniques, *Sensors* 2021, 21, 3508
- [18] G. Acar, O. Ozturk (2019). Wearable and Flexible Textile Electrodes for Biopotential Signal Monitoring: A review. *Electronics* 2019, 8, 479
- [19] L. Zhu, H. Zhao (2020). Polymers, Bio-inspired Fabrication of Cu-Ni Coatings onto Mercerized Flax Fabric by Electroless Plating. *Fibres Polym*, 21, 324–333
- [20] P. Miśkiewicz, I. Frydrych (2020). A. Application of Physical Vapor Deposition in Textile Industry. *Autex Res. J.* 1
- [21] N. Pan, G. Sun (2011). *Functional Textiles for Improved Performance, Protection and Health*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands



- [22] Mihailo R. Mrdak (2019). Research and Development Center IMTEL Communications a.d., Belgrade, Republic of Serbia
- [23] R. Gonzalez, Ashrafizadeh (2016). A Review of Thermal Spray Metallization of Polymer-Based Structures. *J. Ther. Spray Tech.*, 25, 897–919
- [24] M. Sadi, M. Yang (2019). Direct screen printing of single-faced conductive cotton fabrics for strain sensing, electrical heating and color changing. *Cellulose* 2019, 26, 6179–6188
- [25] G.B Tseghai, B. Malengier (2020). Integration of Conductive Materials with Textile Structures, an Overview, *Sensors*, 20, 6910
- [26] F. Lin, Li. Du (2019). Electrically conductive silver/polyimide fabric composites fabricated by spray-assisted electroless plating. *Appl. Surf. Sci.* 493, 1–8
- [27] M. Mantash, A.C. Tarot (2016). Design Methodology for Wearable Antenna on Artificial Magnetic Conductor Using Stretch Conductive Fabric, *IET Electronics Letters*, 52, 2, pp. 95-96
- [28] i M, Lin XQ, Chin JY, et al. A novel metamaterialinspired electrically small antenna fed by CPW. In: proceedings of the 2008 international conference on microwave millim wave technology (ICMMT), Nanjing, China, 2008, vol.4, pp.1613–1616. IEEE
- [29] D. Gaspar and AA. Moreira (2009). Belt antenna for wearable applications. In: IEEE antennas propagation society AP-S international symposium, Charleston, SC, USA, vol.c, no. I, pp.7–10. IEEE
- [30] B. Sanz-Izquierdo, JC. Batchelor (2007). Compact UWB wearable antenna. In: proceedings of the 2007 Loughborough antennas propagation conference (LAPC), Loughborough, UK, April 2007, pp.121–124, IEEE
- [31] B. Sanz-Izquierdo, JC. Batchelor (2010). Antenna on textiles for wireless local area network on body applications. *IET Microwave Antenna Propag*, 4: 1980
- [32] IV. Lindell, AH. Sihvola (2007). Determination of the complex permittivity of textiles and leather in the 14–40 GHz millimetre-wave band using a free-wave transmittance only method. *Eur. Sp. Agency, (Special Publ. ESA SP), 626 SP, no. June*
- [33] B. Sanz-Izquierdo, L. Wu (2010). Textile integrated waveguide slot antenna. In: IEEE international symposium on antennas propagation CNC-USNC/URSI radio science meeting - lead wave (AP-S/ URSI), Toronto, ON, Canada, 20110, pp.13–16. IEEE
- [34] B. Sanz-Izquierdo, F. Huang (2006). Small size wearable button antenna. In: first European conference on antennas propagation, (EuCAP 2006), Nice, France, pp.1–4. IEEE
- [35] S. Zhu, S. Member (2009). Dual-band wearable textile antenna on an EBG substrate. *IEEE Trans Antenna Propag*, 57: 926–935
- [36] S. Bashir (2009). Design and synthesis of non uniform high impedance surface based wearable antennas, Doctoral dissertation, Loughborough University: UK
- [37] O. Yuehui and CJ. William (2008). High frequency properties of electro-textiles for wearable antenna applications. *IEEE Trans Antenna Propag* 2008; 56: 381–389
- [38] PREMIX. (2019, Feb. 10) Electrically conductive and static dissipative compounds
- [39] W. Eom, H. Shin (2020). *Commun.* 11, 2825
- [40] A. Lund, Y. Tian (2020). *Power Sources* 480, 228836
- [41] A. Lund, N.M Mater (2018). *Sci. Eng. R* 126, 1
- [42] Sandra Varnaitė-Žuravliova (2020). *The Types, Properties, and Applications of Conductive Textiles*, Cambridge Scholars Publishing
- [43] H. Jin, N. Matsuhisa (2017). Enhancing the performance of stretchable conductors for e-textiles by controlled ink permeation. *Adv. Mater.* 2017, 29
- [44] A.S.M. Sayem, S.H. Teay Shahariar (2020). A. Review on smart electro-clothing systems (SeCSs). *Sensors*, 20, 587
- [45] V. Mecnika, M. Hoerr (2015). *Mater. Sci. Text. Cloth. Technol.* 9, 56
- [46] G. Acar, O. Ozturk (2019). Wearable and flexible textile electrodes for biopotential signal monitoring: A review. *Electronics* 8, 479

- [47] Van Langenhoven (2007). *Smart Textiles for Medicine and Healthcare: Materials, Systems and Applications*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, ISBN 9781845690274
- [48] Honarvar Ghahremani, M. Latifi (2017). Overview of wearable electronics and smart textiles. *J. Text. Inst.* 108, 631–652
- [49] T. Acti, S. Zhang (2011). High performance Flexible Fabric Electronics for Megahertz Frequency Communications. In *Proceedings of the Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC)*, Loughborough, UK, 14–15 November; pp. 1–4
- [50] S. Zhang, A. Chauraya (2012). Simulation Methodology to Model the Behavior of Wearable Antennas Composed of Embroidered Conductive Threads. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI National Radio Science Meeting*, Chicago, IL, USA, 8–14 July
- [51] T. Kaufmann, I. Fumeaux (2013). In *Proceedings of the 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Gothenburg, Sweden, 8–12 April; pp. 3252–3255
- [52] R. Seager, S. Zhang (2013). Effect of the fabrication parameters on the performance of embroidered antennas, *IET Microwaves, Antennas & Propagation* Volume 7, Issue 14 p. 1174–1181
- [53] G. Ignacio , R. Garcia (2019). Embroidery manufacturing techniques for textile dipole antenna applied to wireless body area network, *Textile Research Journal*, Vol. 89(8) 1573–1581
- [54] Z. Shiyu, A. Chauraya (2012). Embroidered wearable antennas using conductive threads with different stitch spacings, *Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC)*, pp. 1-4
- [55] S. Varma , S. Sharma (2021). Design and Performance Analysis of Compact Wearable Textile Antennas for IoT and Body-Centric Communication Applications, *International Journal of Antennas and Propagation* Volume 2021, Article ID 7698765
- [56] R. L. Bulathsinghala (2022). Investigation on material variants and fabrication methods for microstrip textile antennas: A review based on conventional and novel concepts of weaving, knitting and embroidery, *Cogent Engineering*, 9:1, 2025681
- [57] C. LeDuc, M. Zhadobov (2017). Impact of Antenna Topology and Feeding Technique on Coupling with Human Body: Application to 60-GHz Antenna Arrays. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 65, 6779–6787
- [58] A. Bahaa , I. Alyani (2021). Electro-textile wearable antennas in wireless body area networks: materials, antenna design, manufacturing techniques, and human body consideration—a review
- [59] M. Fernandez, H. G. Espinosa (2018). Wearable slot antenna at 2.45 GHz for off-body radiation: Analysis of efficiency, frequency shift, and body absorption," *Bioelectromagnetics*, vol. 39, pp. 25\_34
- [60] S. J. Chen, B. Chivers (2015). "Bending impact on a flexible ultra-wideband conductive polymer antenna," in *Proc. Int. Conf. Electromagn. Adv. Appl. (ICEAA)*, , pp. 422\_425
- [61] S. M. Salleh, M. Jusoh (2015). Circular polarization textile antenna for GPS application," in *Theory and Applications of Applied Electromagnetics*. Cham, Switzerland: Springer, pp. 255\_263
- [62] P. Salonen and Y. Rahimat-Samii (2007). "Textile antennas: Effects of antenna bending on input matching and impedance bandwidth," *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 22, no. 3, pp. 10\_14
- [63] A. Usman, U. Sadiq (2017). Design and SAR Analysis of Wearable Antenna on Various Parts of Human Body, Using Conventional and Artificial Ground Planes, *J Electr Eng Technol*, 12(1): 317-328
- [64] K. Ito Lin, CH. Lin (2015). Evaluation of Wearable and Implantable Antennas with Human Phantoms. In: Chen Z. (eds) *HandBook of Antenna Technologies*. Springer, Singapore
- [65] S. Tripathi, A. Mohan (2017). Yadav S. A performance study of a fractal UWB antenna for on-body WBAN applications, *Microw Opt Technol Lett*, 59:2201–7
- [66] J. Pradeep Kumar (2019). " Effect of process parameter characteristics on joint strength during ultrasonic metal welding of electrical contact", *Welding in the World*

- [67] T. Vervust (2013). "Stretchable and washable electronics for embedding in textiles," Ph.D. dissertation, UGent
- [68] S. Kumar, CS. Wu (2017). "Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: a status review" . J Manuf Process 26:295–322
- [69] V. Kumar (2011). Understanding ultrasonic plastic assembly
- [70] Dr.-Ing. Ino J. Rass EUROMAT GmbH, Hermann-Hollerith-Straße 6, D-52499 Baesweiler, ULTRASONIC-SOLDERING TECHNOLOGY, [www.euromat.de](http://www.euromat.de)
- [71] M.Hunstig, S.Holtkämper (2021). "Smart Ultrasonic Welding – A Versatile Interconnection Technology for Power Electronics Packaging", e proceedings of iMAPS Advanced Power Electronics Packaging Symposium (APEPS), virtual event, April 26-29
- [72] T. Linz, E. Simon (2010). " Fundamental Analysis of Embroidered Contacts for Electronics in Textiles", Electronics System-Integration Technology Conference, ESTC
- [73] <https://rskr.irimee.in/sites/default/files/RESISTANCE%20WELDING.pdf>
- [74] <https://amadaweldtech.com/wp-content/uploads/2018/12/Resistance-Welding Fundamentals.pdf>
- [75] [https://www.resistanceweldsupplies.com/images/quick\\_reference\\_guides/welding\\_manual\\_site\\_v2.pdf](https://www.resistanceweldsupplies.com/images/quick_reference_guides/welding_manual_site_v2.pdf)
- [76] <https://learnmechanical.com/resistance-welding/>
- [77] [https://www.uts.edu.au/sites/default/files/Soldering\\_0.pdf](https://www.uts.edu.au/sites/default/files/Soldering_0.pdf)
- [79] [http://fpg.phys.virginia.edu/fpgweb/memos/soldering\\_instructions.pdf](http://fpg.phys.virginia.edu/fpgweb/memos/soldering_instructions.pdf)
- [80] H. Lewis, A. Ryan (2012). "Using Electrically Conductive Inks and Adhesives as a Means to Satisfy European PCB Manufacturing Directives", J. Adhes. Sci. Technol. 22 893–913
- [81] B. Amoli, J. Trinidad (2015). "Highly electrically conductive adhesives using silver nanoparticle (Ag NP)-decorated graphene: the effect of NPs sintering on the electrical conductivity improvement", J. Mater. Sci. Mater. Electron. Vol 26, p590–600. doi: 10.1007/s10854-014-2440-y
- [82] H. Lewis, F. Coughlan (2008). "An Overview of the Use of Electrically Conductive Adhesives (ECAs) as a Solder Replacement", J. Adhes. Sci. Technol. 22, 801–813. doi: 10.1163/156856108X305543
- [83] B. Amoli, A. Hu (2015). "Recent progresses on hybrid micro–nano filler systems for electrically conductive adhesives (ECAs) applications", J. Mater. Sci. Mater. Electron. Vol 26, p4730–4745. doi: 10.1007/s10854-015-3016-1
- [84] R. Aradhana, S. Mohanty (2020). "A review on epoxy-based electrically conductive adhesives", International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 99, 102596. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102596
- [85] J. Zhong, A. Kiourti (2016). "Conformal load-bearing spiral antenna on conductive textile threads. IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett. 16, 230–233
- [86] S. Alharbi ( 2018). "E-textile origami dipole antennas with graded embroidery for adaptive RF performance" . IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett. 17, 2218–2222
- [87] <https://www.analogictips.com/what-are-the-functions-and-principles-of-sparameters-part-1/>
- [88] <https://www.antenna-theory.com/m/definitions/vswr.php>
- [89] <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/smith-chart-basics>
- [90] [https://na.support.keysight.com/vna/help/latest/Tutorials/Phase\\_Devi.htm](https://na.support.keysight.com/vna/help/latest/Tutorials/Phase_Devi.htm)
- [91] [https://na.support.keysight.com/pna/help/latest/Tutorials/Group\\_Delay6\\_5.htm#group](https://na.support.keysight.com/pna/help/latest/Tutorials/Group_Delay6_5.htm#group)

# ΕΠΙΛΟΓΟΣ

## Συμβολή της διατριβής στην προαγωγή της επιστήμης

Η παρούσα διατριβή έχει σαν αντικείμενο τη μελέτη των επαφών φορέσιμων κεντημένων κεραιών.

Μερικά από τα σημεία τα οποία αποτελούν την κύρια συμβολή της παρούσας διατριβής στην προαγωγή της επιστήμης είναι τα εξής:

- Παράθεση των RF χαρακτηριστικών και των επιδόσεων των αγωγίμων υφασμάτων. Επίσης μελετάται η επίδραση της πυκνότητας και της κατεύθυνσης κεντήματος των αγωγίμων νημάτων στη λειτουργία των φορέσιμων κεραιών.
- Μελέτη των ιδιοτήτων των επαφών που χρησιμοποιούνται στις φορέσιμες κεντημένες κεραιές.
- Μετρήσεις με VNA όλων των παραμέτρων των γραμμών μεταφοράς οι οποίες διαθέτουν τις διαφορετικές επαφές που μελετήθηκαν.

Αναλυτικότερη επισήμανση αυτών των συμβολών γίνεται στην προηγούμενη ανά κεφάλαιο ανάλυση.

## Μελλοντικές προεκτάσεις

Πιθανές μελλοντικές προεκτάσεις της παρούσας διατριβής μπορεί να είναι:

- Εκτεταμένες δοκιμές ευκαμψίας και δοκιμές που αντιπροσωπεύουν τη συμπεριφορά των επαφών της κεραίας σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.
- Εναλλακτικές μέθοδοι κατασκευής επαφών για φορέσιμες κεντημένες κεραίες.