

Τίτλος Διπλωματικής Εργασίας :
Σχεδίαση Και Ανάπτυξη Τυπωμένων Κυκλωμάτων
Αξιολόγησης Και Περιπτώσεων Χρήσης
Μικροκυματικών Και Χιλιοστομετρικών Πομποδεκτών

Φοιτητής : Νικόλαος Θεοδοσιάδης
Α.Μ. : 7091
Επιβλέπων : Γεώργιος Στρατάκος
Συνεπιβλέπων : Στυλιανός Μυτιληναίος

Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

- Το ενδιαφέρον για τις μπάντες των 26GHz και 28GHz λόγω των αναγκών των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων 5^{ης} γενιάς(5G), έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πομποδεκτών υπό την μορφή RFIC/MMIC.
- Για την εμπορική αξιοποίηση τους, απαιτούνται υποστηρικτικά τυπωμένα κυκλώματα αξιολόγησης(EVB).
- Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και ο σχεδιασμός μερών τέτοιων EVB όπως είναι τα ζωνοπερατά φίλτρα, οι διαιρέτες ισχύος και τα κυκλώματα προσαρμογής.

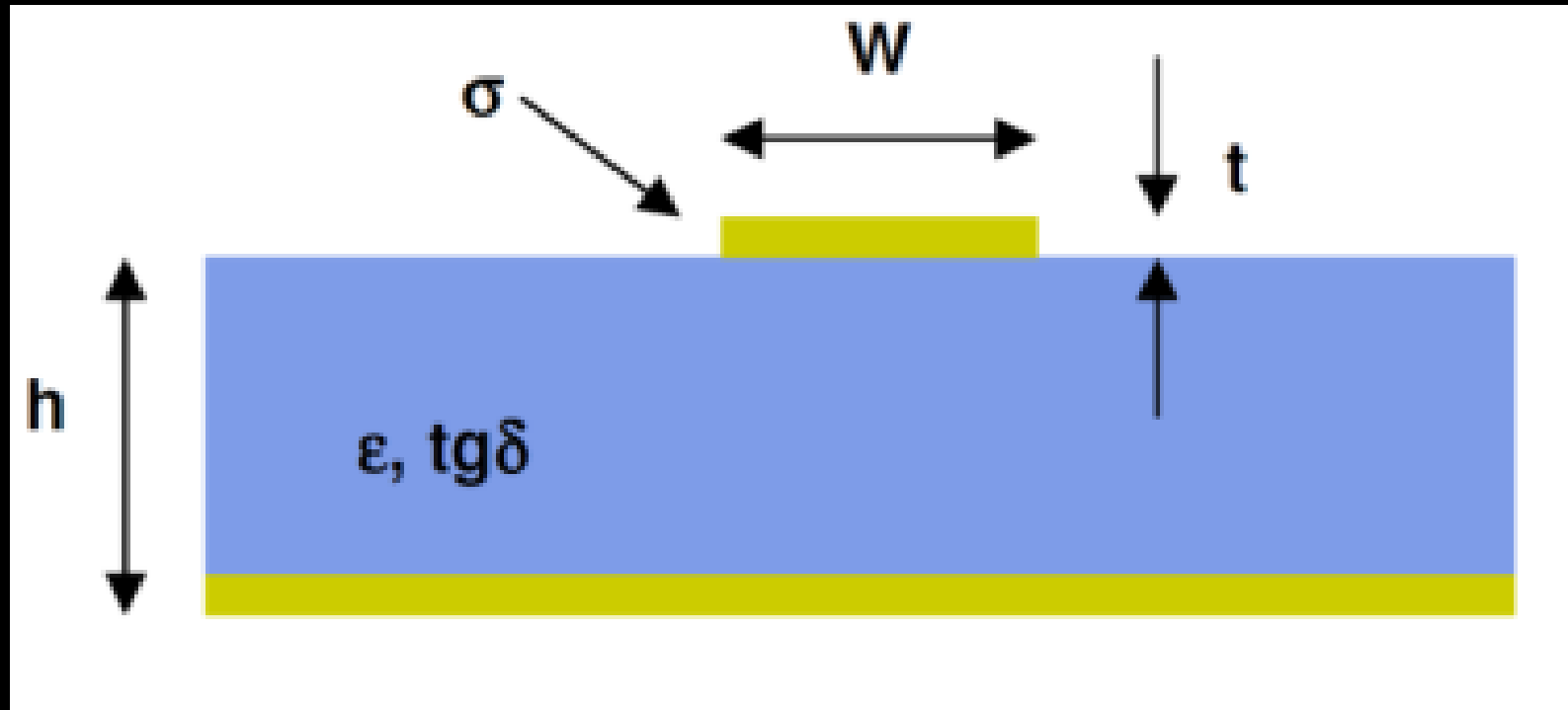
Κύρια σχεδιαστικά ζητήματα

- Στις χιλιοστομετρικές συχνότητες, το μήκος κύματος λ της τάσης/ρεύματος είναι της τάξεως των mm. Αυτό δημιουργεί πλήθος ζητημάτων που χρίζουν ιδιαίτερης προσοχής :
1. Αλλοίωση συμπεριφοράς συγκεντρωμένων στοιχείων εξαιτίας παρασιτικών φαινομένων → Απαιτείται χρήση γραμμών μεταφοράς.
 2. Απαίτηση διηλεκτρικού υποστρώματος με μικρό Df.
→ Χρήση ρητινών βασισμένες σε οργανικά μόρια (Hydrocarbon based).
 3. Ο χαλκός πρέπει να είναι ηλεκτρικά λείος για αποφυγή παρασιτικής αυτεπαγωγής
→ Rolled Annealed Copper

Υλοποίηση γραμμής μεταφοράς

- Υλοποίηση υπό την μορφή μικροταινίας.
- Αγωγός σήματος που βρίσκεται πάνω από διηλεκτρικό υλικό πάχους h στο κάτω μέρος του οποίου υπάρχει επίπεδος αγωγός γείωσης.

[1]



Ιδιότητες μικροταινίας 1/2

- Υποστηρίζει **quasi-TEM** διάδοση εξαιτίας της ηλεκτρομαγνητικής ανομοιογένειας των ιδιοτήτων του χώρου στον οποίο αναπτύσσονται τα πεδία.
- Πάχος του υποστρώματος $< \lambda/4 \rightarrow$ Αποφυγή δημιουργίας συντονισμών και διάδοσης ανεπιθύμητων τρόπων και ακτινοβολίας.
- Μέρος των πεδίων βρίσκεται μέσα στο διηλεκτρικό υλικό ενώ ένα άλλο μέρος βρίσκεται στον αέρα πάνω απο αυτό, οπότε η διάταξη περιγράφεται απο μια **ισοδύναμη(ενεργό) διηλεκτρική σταθερά**.
- Η **Z₀** επηρεάζεται απο το **πλάτος** των **αγωγών** για δεδομένο διηλεκτρικό υπόστρωμα.

Ιδιότητες μικροταινίας 2/2

- Υπάρχουν απώλειες :

1. Στους αγωγούς λόγω της πεπερασμένης αγωγιμότητας(φινίρισμα)& επιδερμικού φαινομένου.
2. Στο διηλεκτρικό υλικό λόγω μηχανισμού πόλωσης μορίων.
3. Λόγω παρασιτικής ακτινοβολίας.

Θεωρία Σχεδίασης φίλτρων 1/3

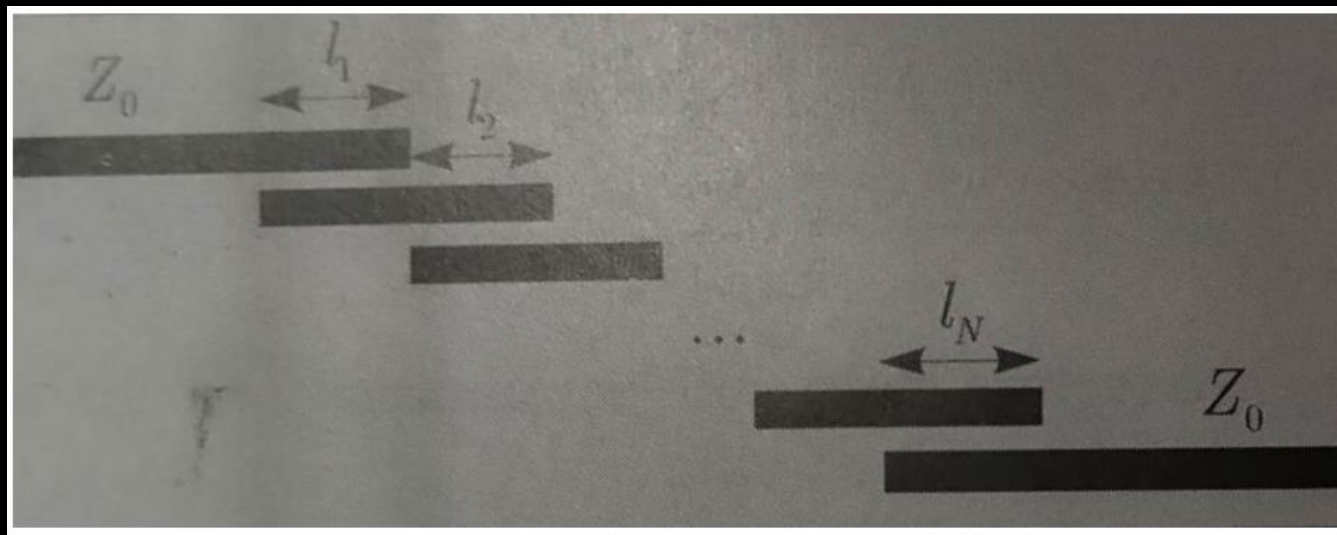
- Φίλτρα : επιλογή μπάντας, απόρριψη θορύβου και παρεμβολών -> Βελτίωση SNR δέκτη. Αποτροπή εκπομπής σημάτων εκτός μπάντας.
- Ζωνοπερατά φίλτρα → Μετάδοση σημάτων σε ένα φασματικό εύρος Δ , εξασθένιση των υπόλοιπων.
- Προσδιορισμός Δ απο συχνότητες αποκοπής f_{c1} και f_{c2} .
- Ιδανικά η καμπύλη της απόκρισης συχνοτήτων είναι τετράγωνη. Πρακτικά δεν ισχύει.
- Για αυτό → Προσδιορισμός IL @ f_{s1} & f_{s2} .
- Σημαντικό και το RL στην ζώνη διέλευσης → % ισχύος που ανακλάται.

Θεωρία Σχεδίασης φίλτρων 2/3

- Προδιαγραφές + Τύπος \rightarrow Ορίζουν τάξη.
- Τάξη \rightarrow Τιμές στοιχείων πρότυπου χαμηλοπερατού φίλτρου.
- Μετασχηματισμός συχνότητας για αλλαγή κατηγορίας φίλτρου.
- Με μετασχηματισμό αντίστασης το φίλτρο προσαρμόζεται για αντίσταση πηγής με ορισμένη τιμή.

Θεωρία Σχεδίασης φίλτρων 3/3

- Το κύκλωμα ενός πρότυπου χαμηλοπερατού φίλτρου(και των μετασχηματισμένων) βασίζεται σε συγκεντρωμένα στοιχεία.
- Απαιτείται η σύνθεση ενός ισοδύναμου κυκλώματος του οποίου τα στοιχεία θα μπορούν να κατασκευαστούν με γραμμές μεταφοράς.
- Αποδεικνύεται ότι υπάρχει τέτοιο ισοδύναμο κύκλωμα και αποτελείται από ανοικτοκυκλωμένες γραμμές $\lambda/2$ οι οποίες συζευγνύονται μεταξύ τους κατά το ήμισυ του μήκους τους. [2]



Μεθοδολογία Σχεδίασης Φίλτρων

1. Καταγραφή προδιαγραφών φίλτρου.
2. Επιλογή διηλεκτρικού υποστρώματος.
3. Υπολογισμός γεωμετρικών διαστάσεων(μήκη, πάχη & αποστάσεις αγωγών).
4. Schematic → Κυκλωματική βελτιστοποίηση.
5. Yield Analysis → Προσομοίωση Monte Carlo.
6. Layout → EM βελτιστοποίηση.

Προδιαγραφές φίλτρου

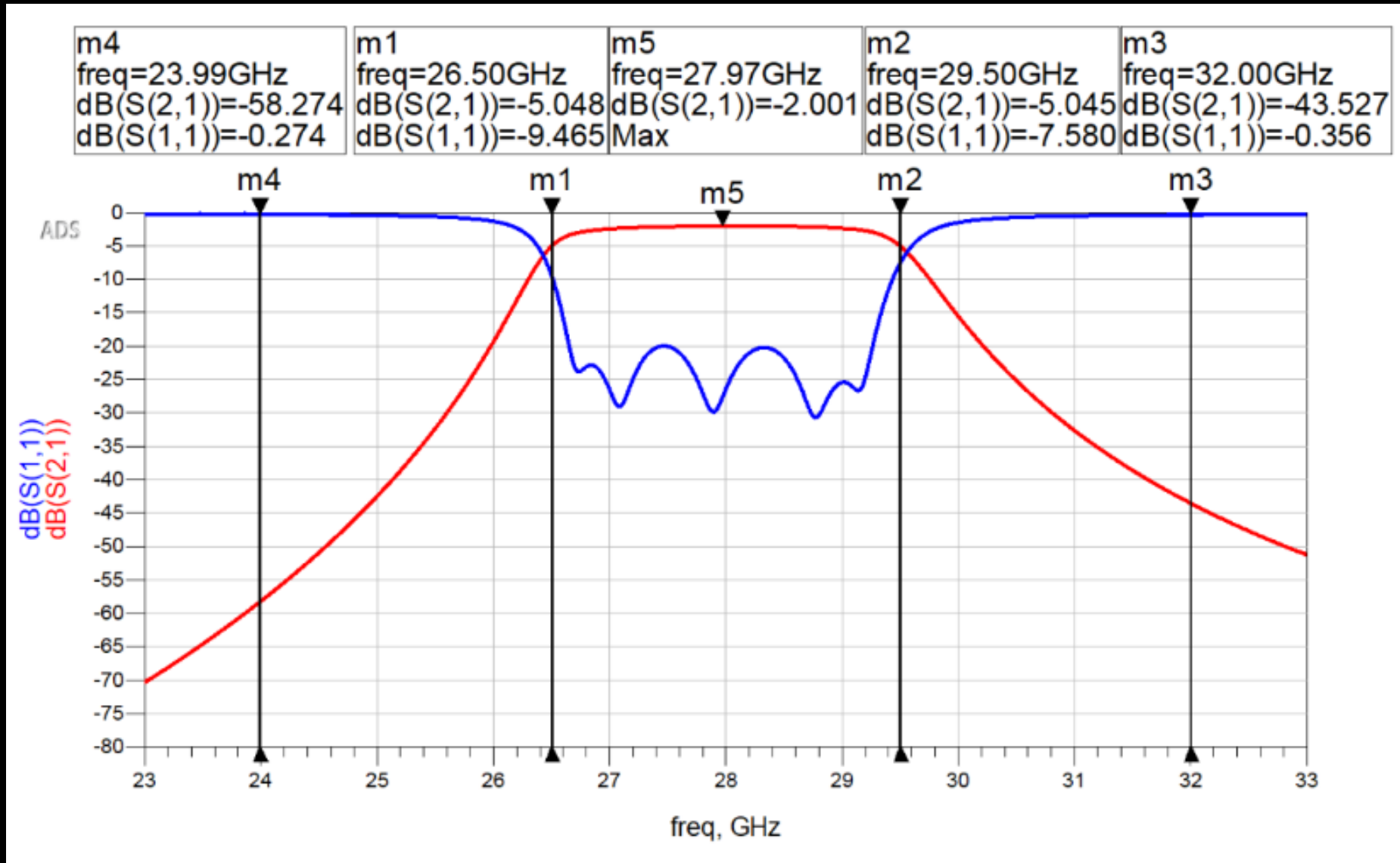
Προδιαγραφές φίλτρου I	Κατηγορία	Τύπος	Τάξη	f_{c1} (GHz)	f_{c2} (GHz)	Κυμάτωση(dB)	RL(dB)	$Z_0(\Omega)$
Edge – coupled	Ζωνοπερατό	Chebysh ev	5	26.5	29.5	≤ 0.1 dB	≥ 20 dB	50 Ω
Hairpin								

Προδιαγραφές φίλτρου II	IL(dB)	
	$f \leq f_{s1} = 24GHz$	$f \geq f_{s2} = 32GHz$
Edge – coupled	≥ 45	≥ 45
Hairpin		

Διηλεκτρικό Υπόστρωμα

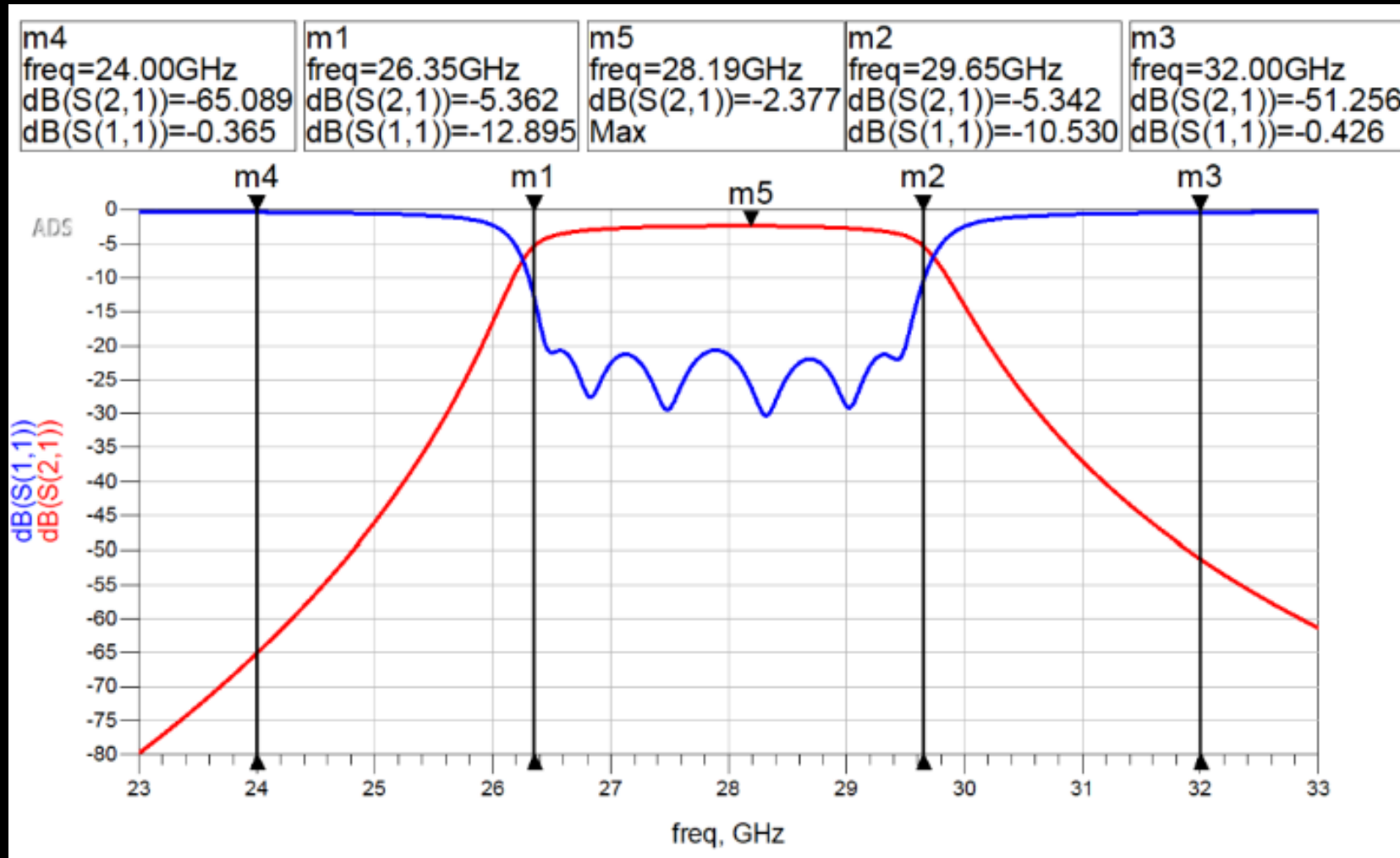
Υπόστρωμα	Dk	Df	Πάχος υποστρώματος H(mm)	Αγωγιμότητα αγωγού σ(S/m)	Πάχος αγωγού T(μm)	Τραχύτητα RMS(μm)
I – Tera MT40 (RF/MW)	3.45 +/- 0.05	0.0030	0.168 +/- 0.02	$5.96 \cdot 10^7$	35.8	0.275

Περιορισμός $s1 \geq 0.1\text{mm}$, και βελτιστοποίηση...πρόβλημα με IL @32GHz



Τροποποίηση του φίλτρου

- Η τάξη αυξάνεται σε 6^η και το BW αυξάνεται από 3GHz σε 3.3GHz και γίνεται πάλι βελτιστοποίηση :



Μελέτη της επίδρασης των κατασκευαστικών ανοχών μέσω προσομοίωσης Monte Carlo

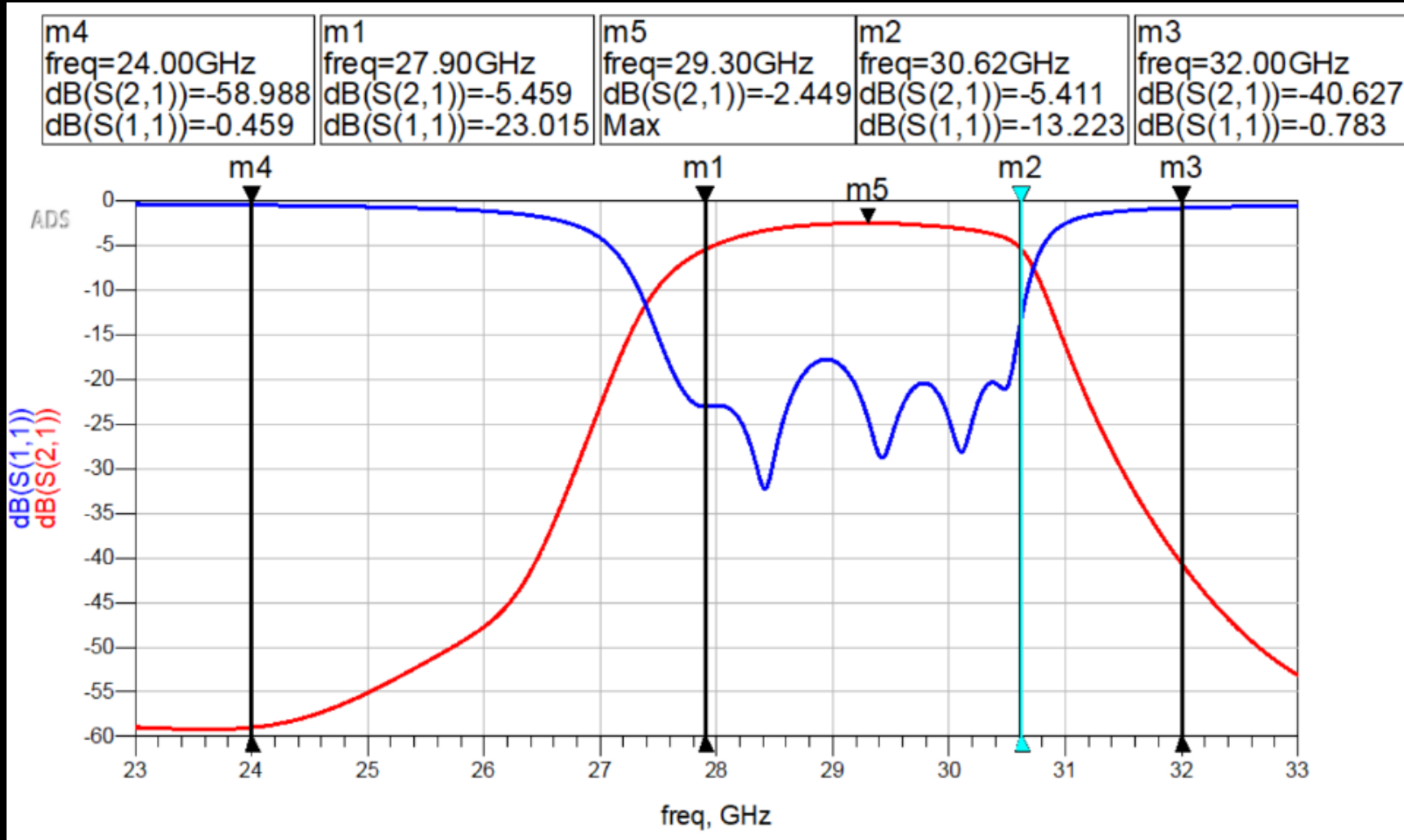
- 1.000 δείγματα \rightarrow για μια μεταβλητή.
- 10.000 δείγματα \rightarrow για όλες.
- 20% μέγιστη απόκλιση για την χειρότερη περίπτωση(0.1mm) \rightarrow +/-20 μ m απόκλιση.
- Για ασφάλεια : +/-25 μ m μέγιστη απόκλιση.
- Αποκλίσεις \rightarrow ομοιόμορφη κατανομή.
- Κριτήριο αποδοχής δείγματος : IL > 45dB @24GHz & 32GHz.

Μελέτη της επίδρασης των κατασκευαστικών ανοχών μέσω προσομοίωσης Monte Carlo

- Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι κατασκευαστικές ανοχές :
 1. Στα πλάτη παρουσιάζει σ/mean του BW : 2.2%, 0.34% της f_0 .
 2. Στις αποστάσεις παρουσιάζει σ/mean του BW : 5.2%, και αμελητέα επίδραση στην f_0 .
 3. Στα μήκη παρουσιάζει σ/mean του f_0 : 0.56%, και 1% του BW.
 4. Της Dk παρουσιάζει σ/mean του f_0 : 0.34%, και 0.55% για BW.
 5. Του πάχους του υποστρώματος παρουσιάζει σ/mean του BW : 10%, και αμελητέα επίδραση στην f_0 .

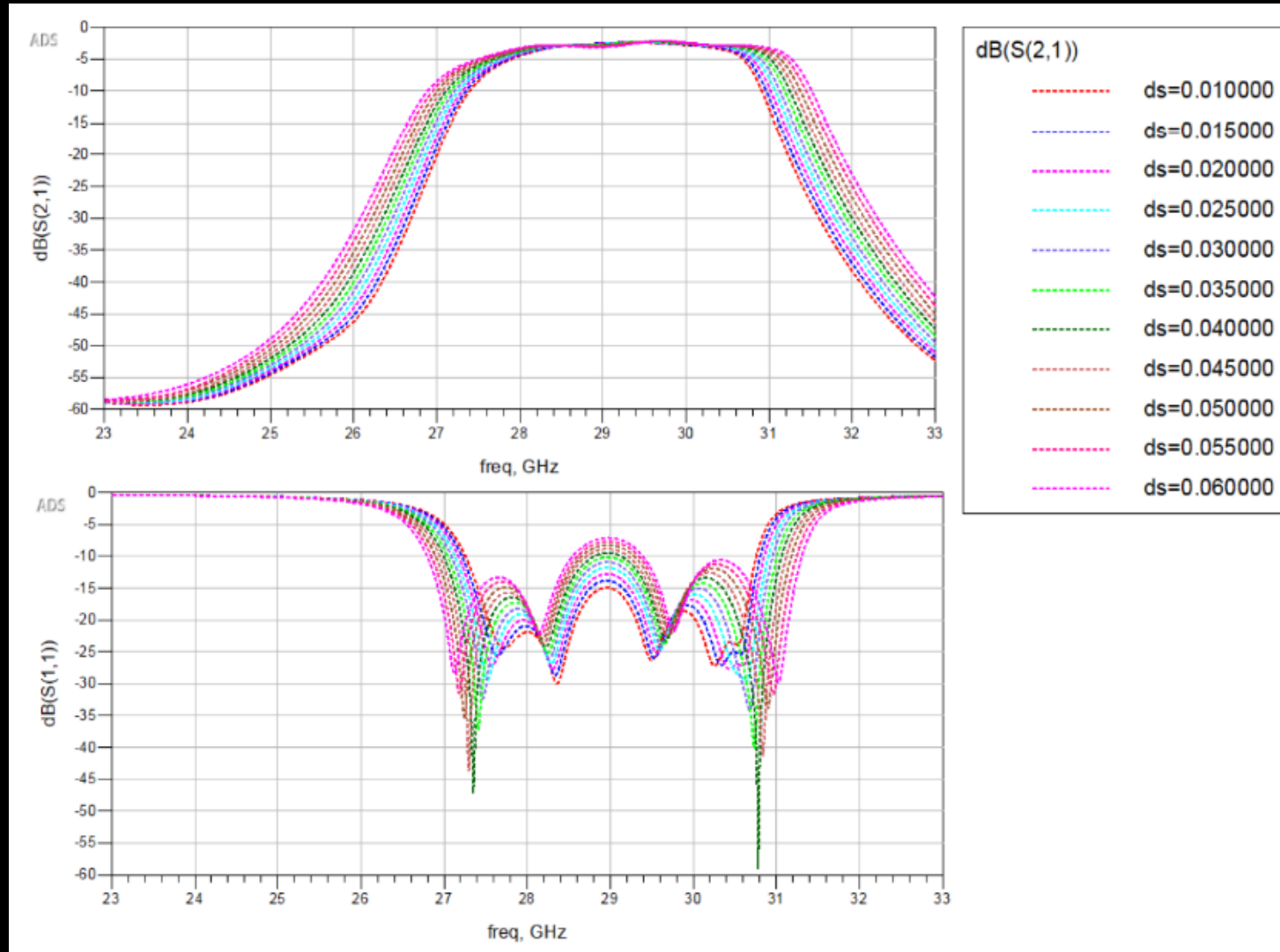
Ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση 1/5

- Αποτελέσματα EM προσομοίωσης με τις τιμές απο την κυκλωματική βελτιστοποίηση :



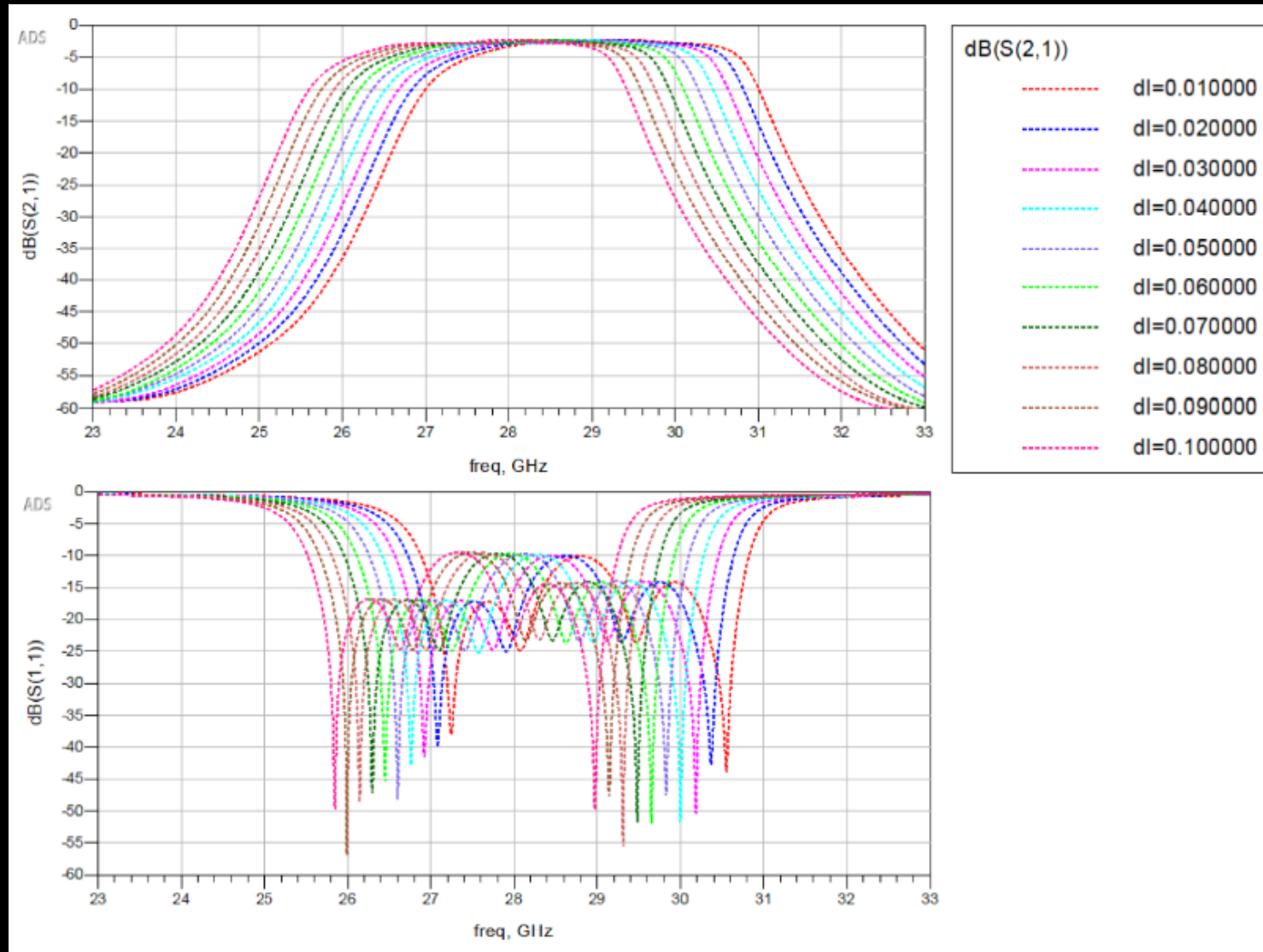
Ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση 2/5

- Βελτιστοποίηση με παραμετρική προσομοίωση με μεταβλητή ds :



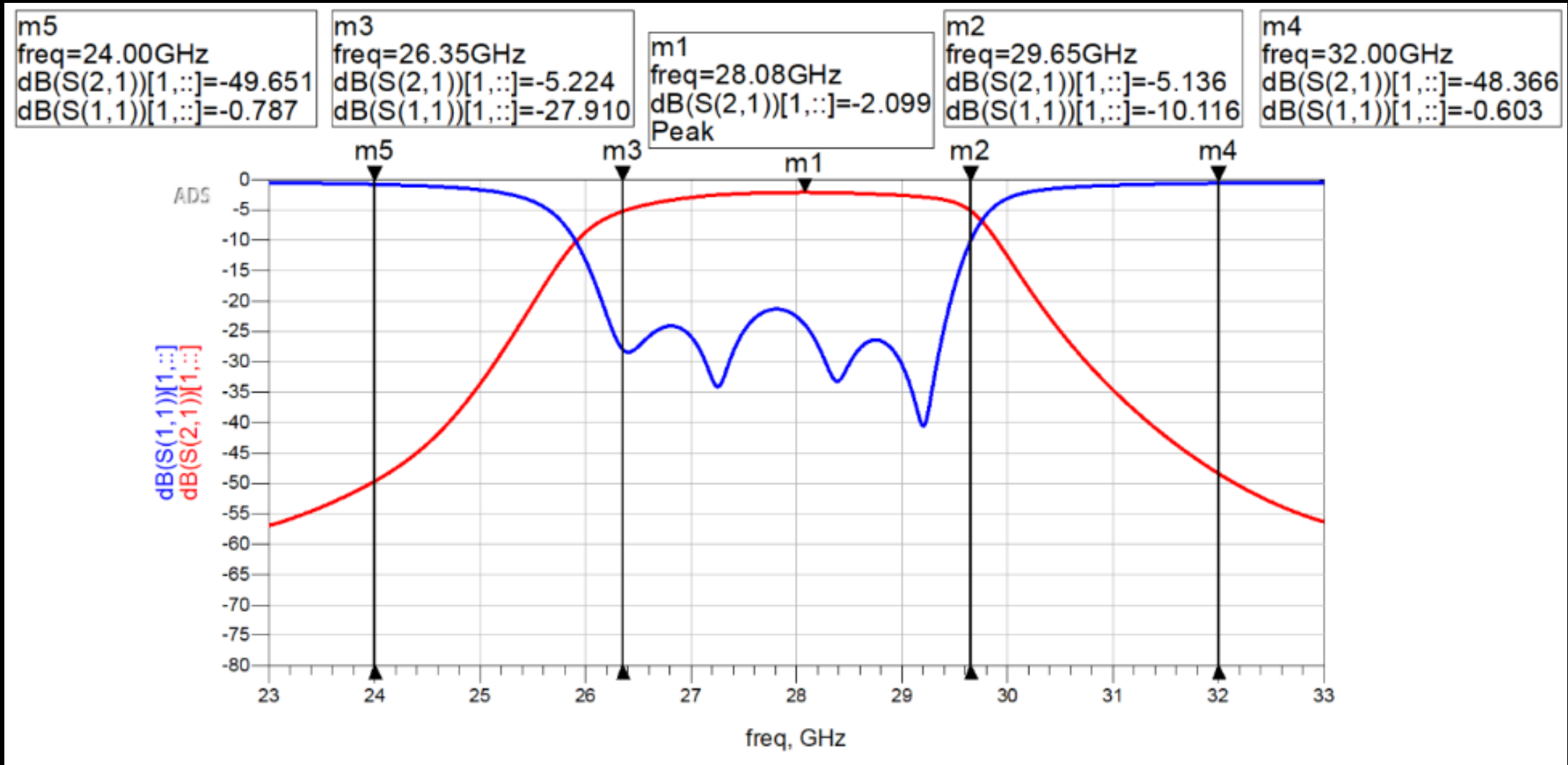
Ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση 3/5

- Βελτιστοποίηση με παραμετρική προσομοίωση με μεταβλητή dl :



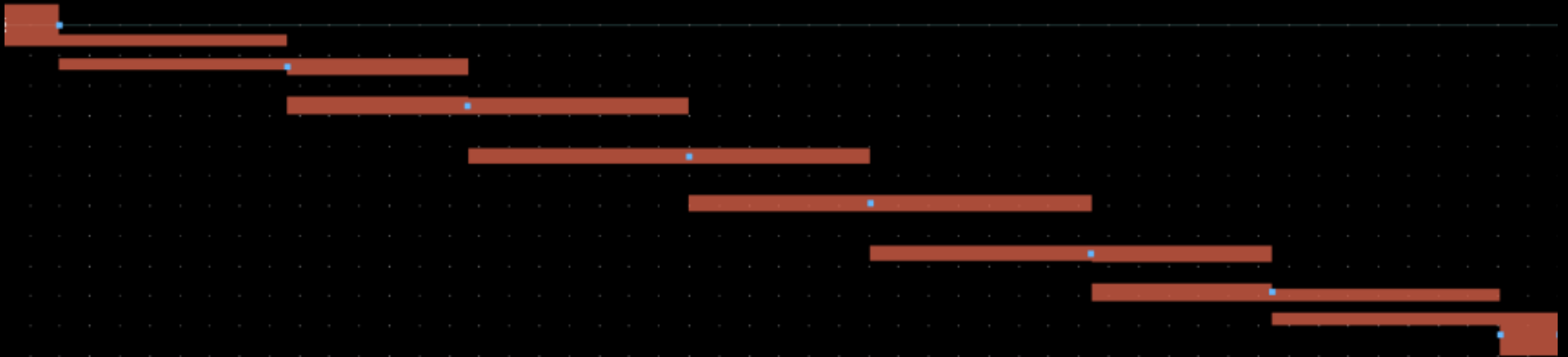
Ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση 4/5

- Τελικά αποτελέσματα EM βελτιστοποίησης :



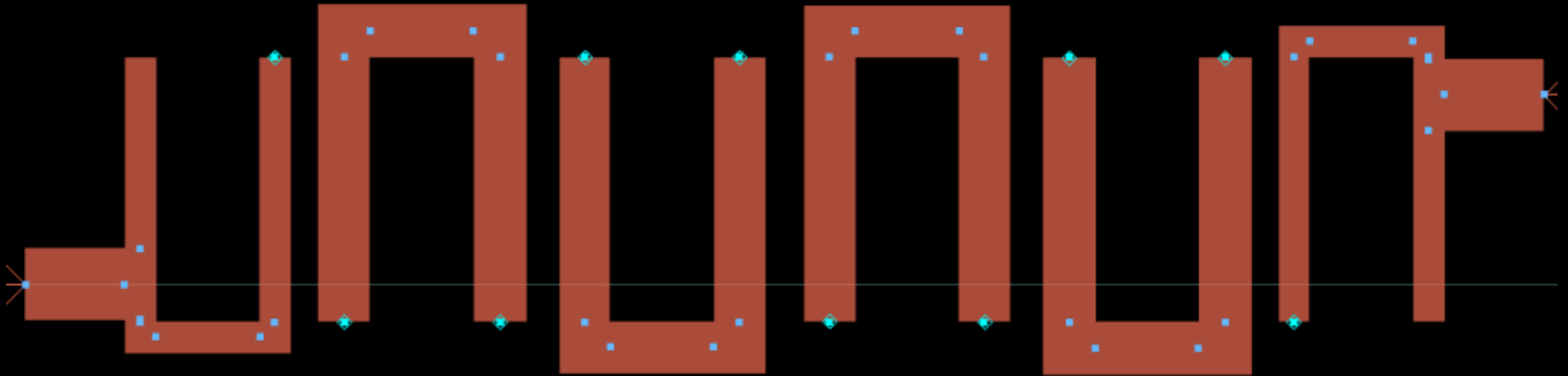
Ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση 5/5

- Φυσικό σχέδιο EM βελτιστοποιημένου σχεδίου.
- Τελικές διαστάσεις : 13.022mm X 2.926mm :



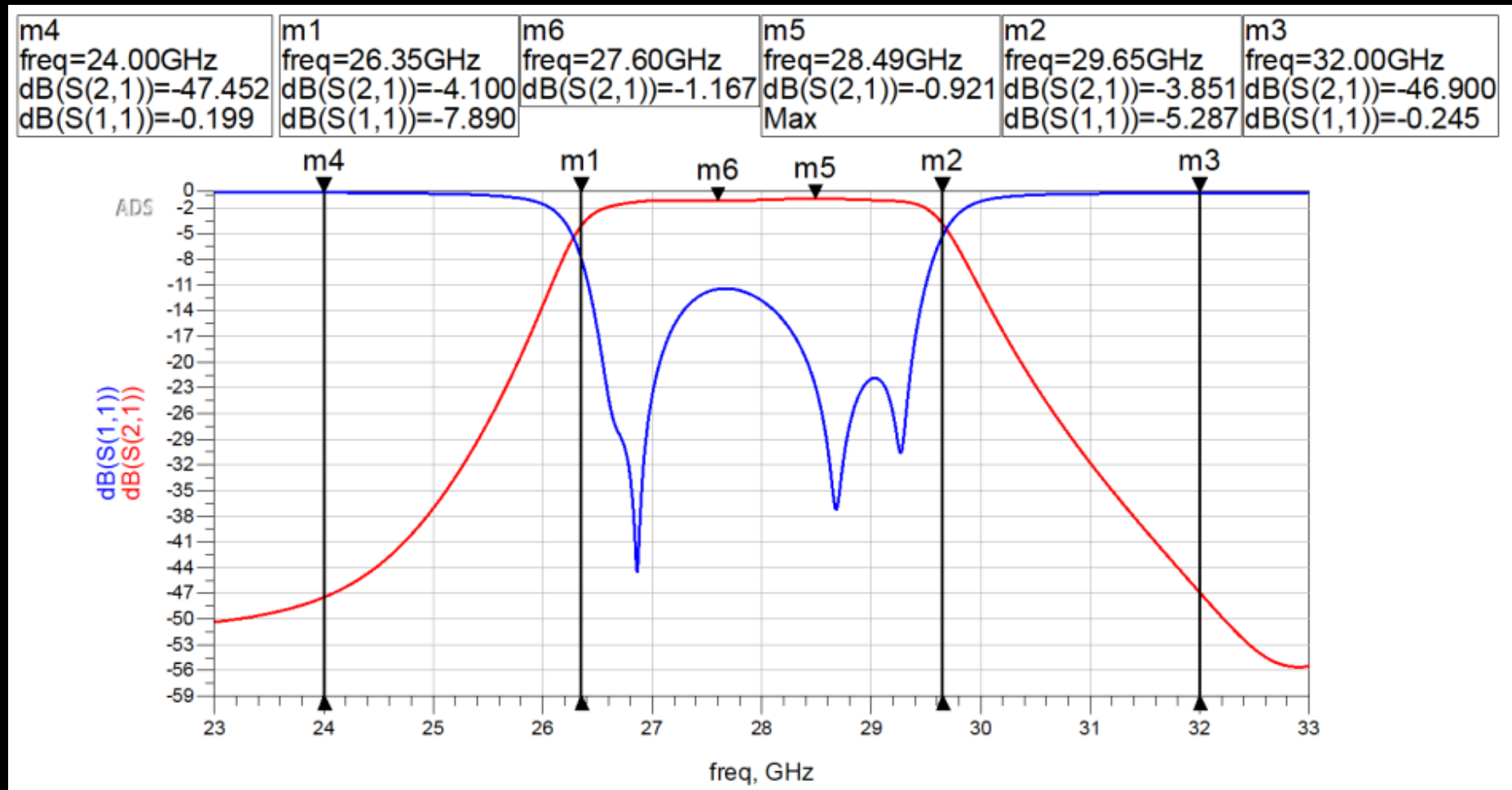
Ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση hairpin φίλτρου 1/2

- Τελικό φυσικό σχέδιο με διαστάσεις 7.615mm X 1.841mm :



Ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση hairpin φίλτρου 2/2

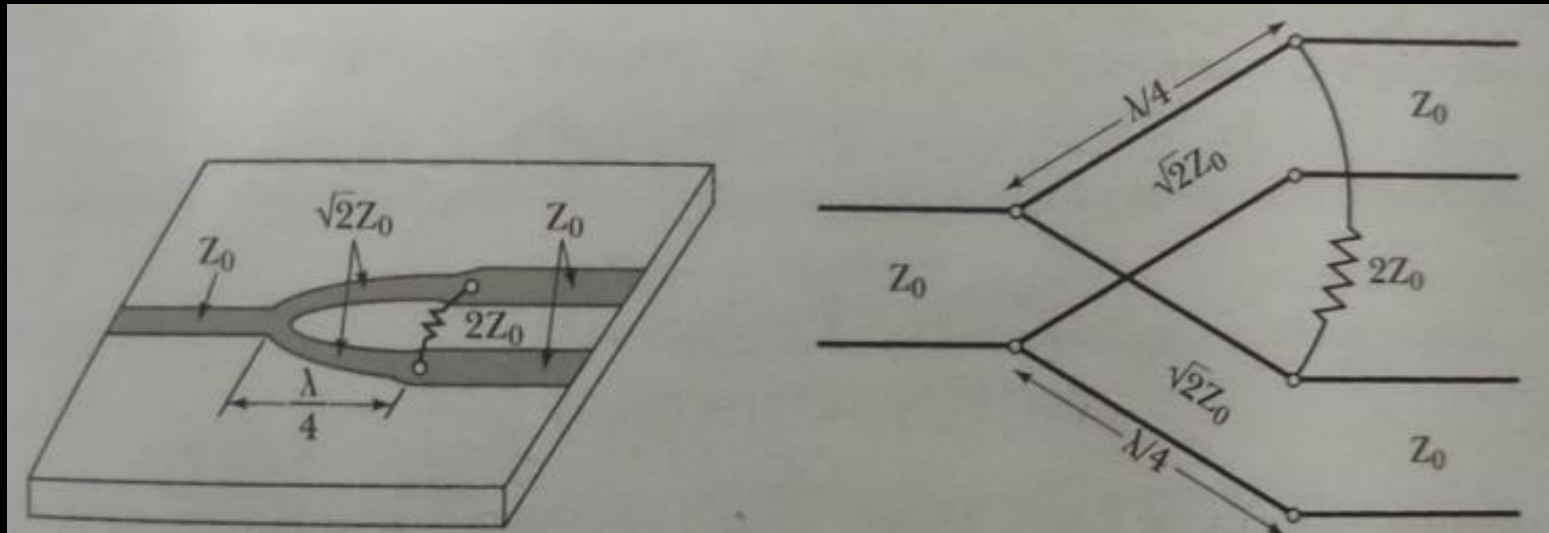
- Τελικό αποτέλεσμα της EM βελτιστοποίησης του hairpin :



Διατρέτης Wilkinson 1/4

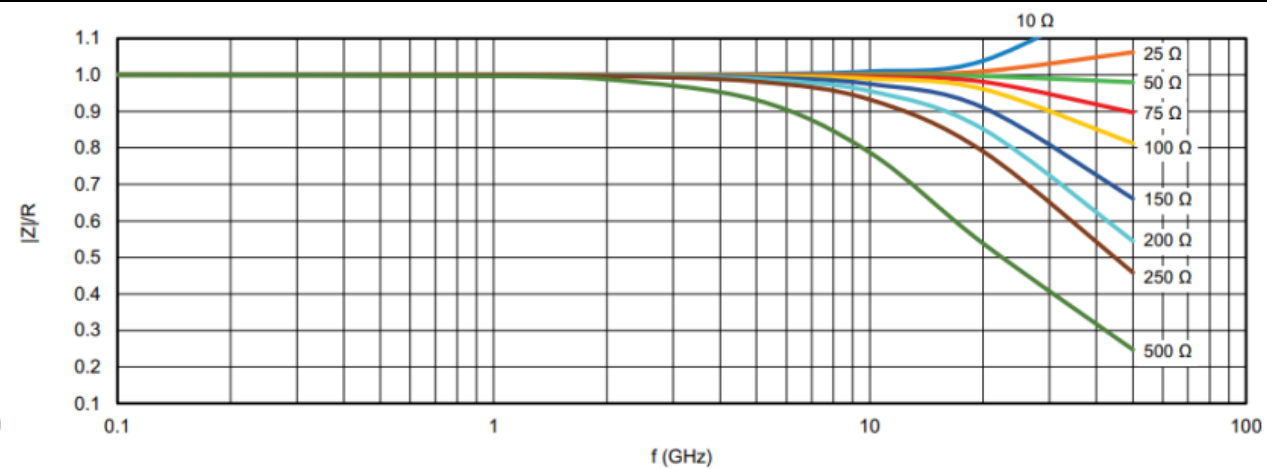
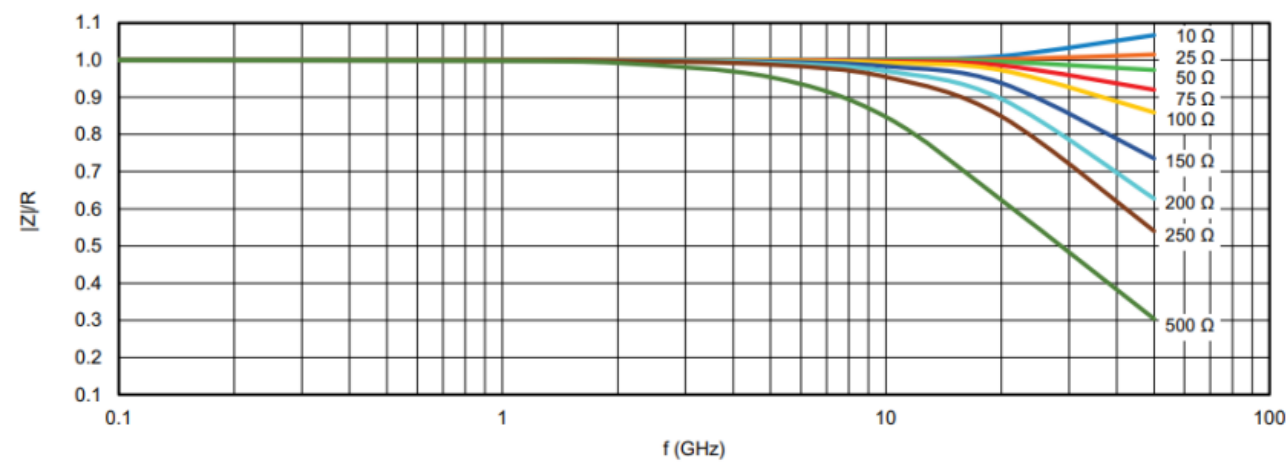
- Τρίθυρο κύκλωμα για διαίρεση/συνδυασμό ισχύος. Τα θετικά του είναι τα εξής :
 1. Προσαρμογή σε όλες τις θύρες.
 2. Απομόνωση μεταξύ των θυρών.
 3. Δεν έχει απώλειες όταν όλες οι θύρες είναι προσαρμοσμένες.
 4. Είναι παθητική διάταξη, οπότε δεν υπάρχουν απαιτήσεις για σήματα τροφοδοσίας και ελέγχου.
 5. Εύκολη κατασκευή ως επίπεδη διάταξη με μικροταινία.

[3]



Κυκλωματικό σχέδιο του διατρέτη Wilkinson 2/4

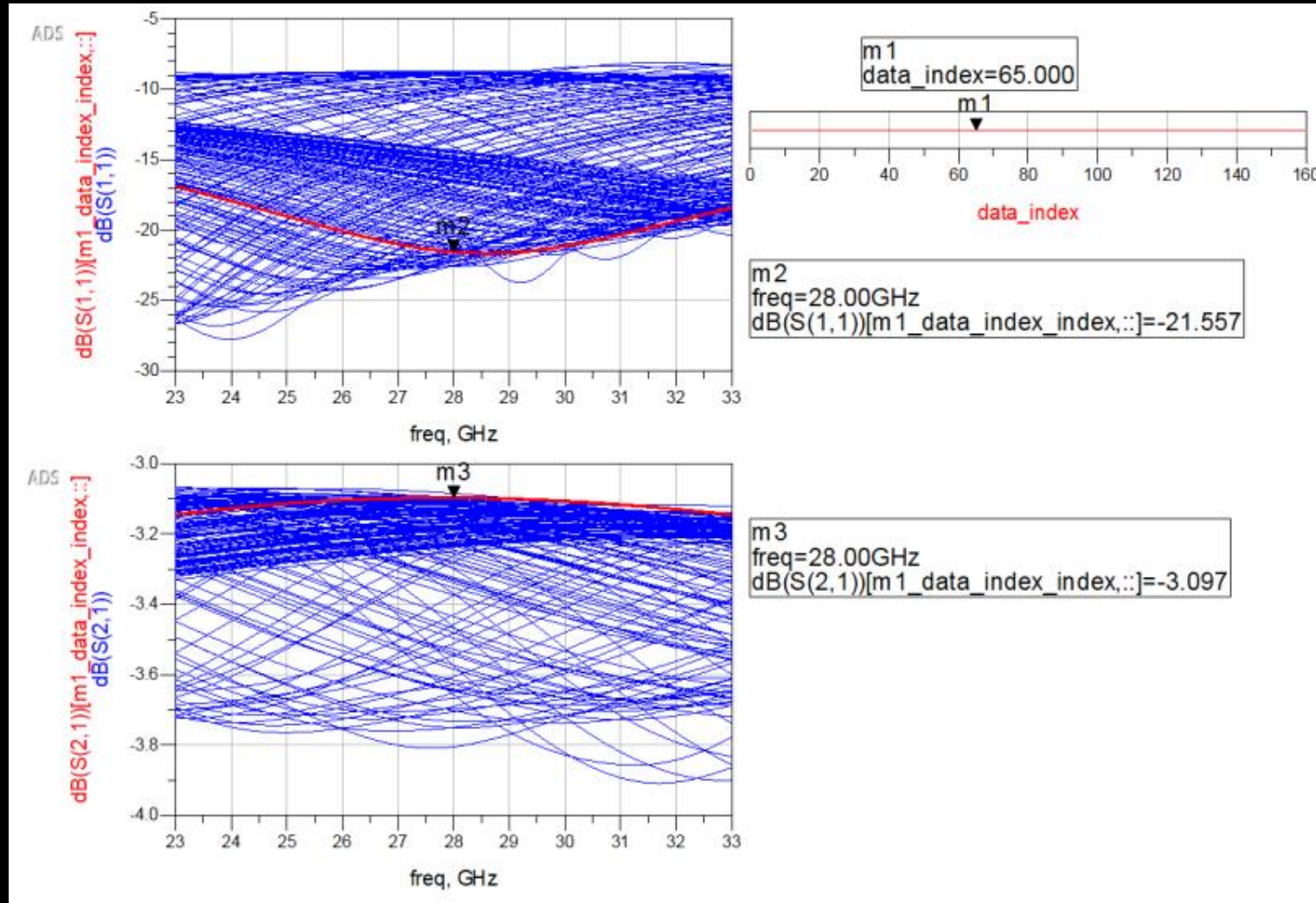
- Το μέγεθος του αντιστάτη αλλά και η ονομαστική τιμή της καθορίζουν την ανώτατη συχνότητα λειτουργίας της πριν αλλοιωθεί σημαντικά η συμπεριφορά της.
- Αριστερά είναι η απόκριση συχνοτήτων για μέγεθος 02016 , και δεξιά για 0402 :
[4]



Ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση Διατρέτη Wilkinson

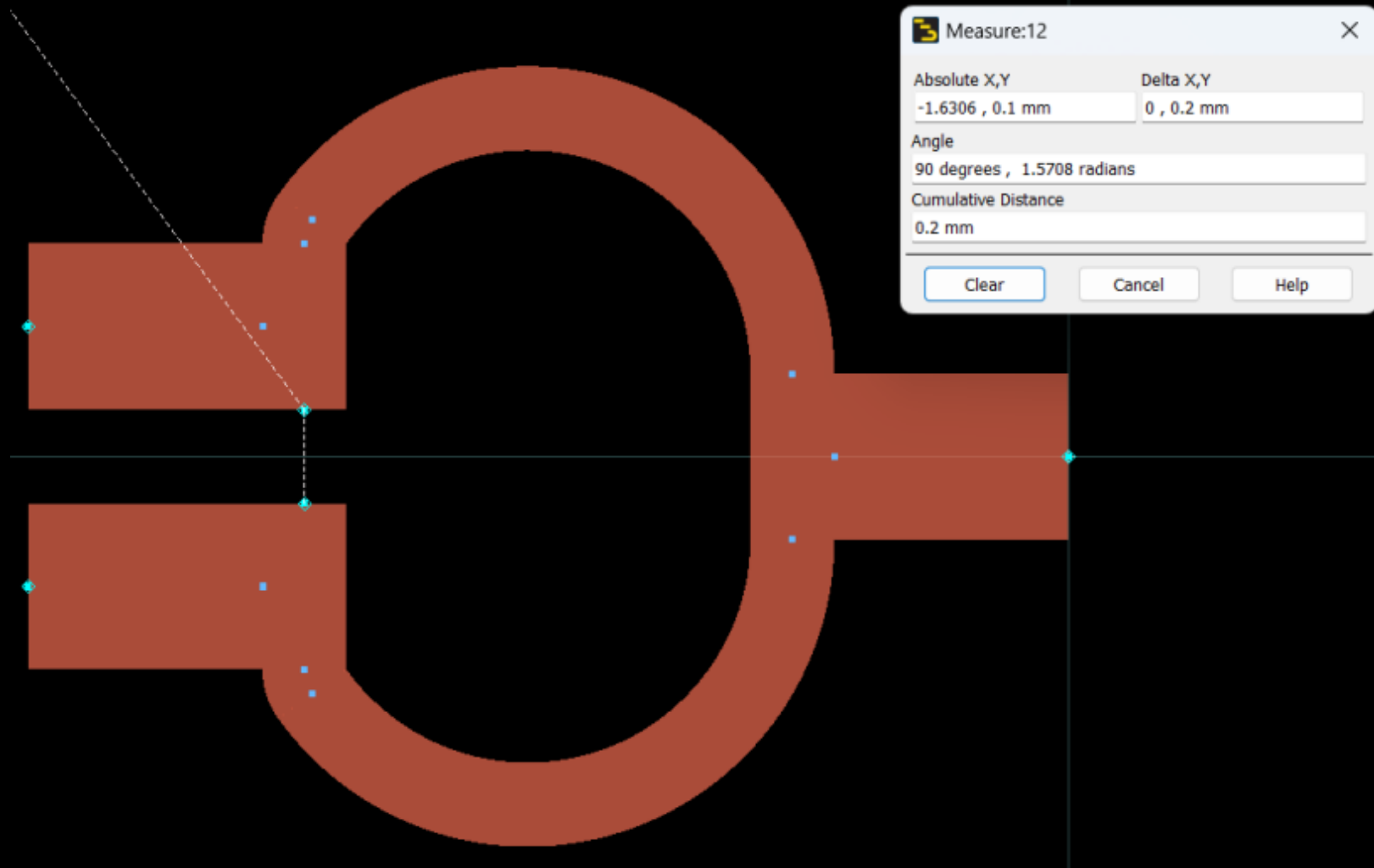
3/4

- Η βέλτιστη λύση είναι για $r = 0.565\text{mm}$ και $\theta = 144.39^\circ$



Ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση Διατρέτη Wilkinson 4/4

- Τελικό φυσικό σχέδιο, με διαστάσεις 2.237mm X 1.663mm :



Κύκλωμα Προσαρμογής 1/5

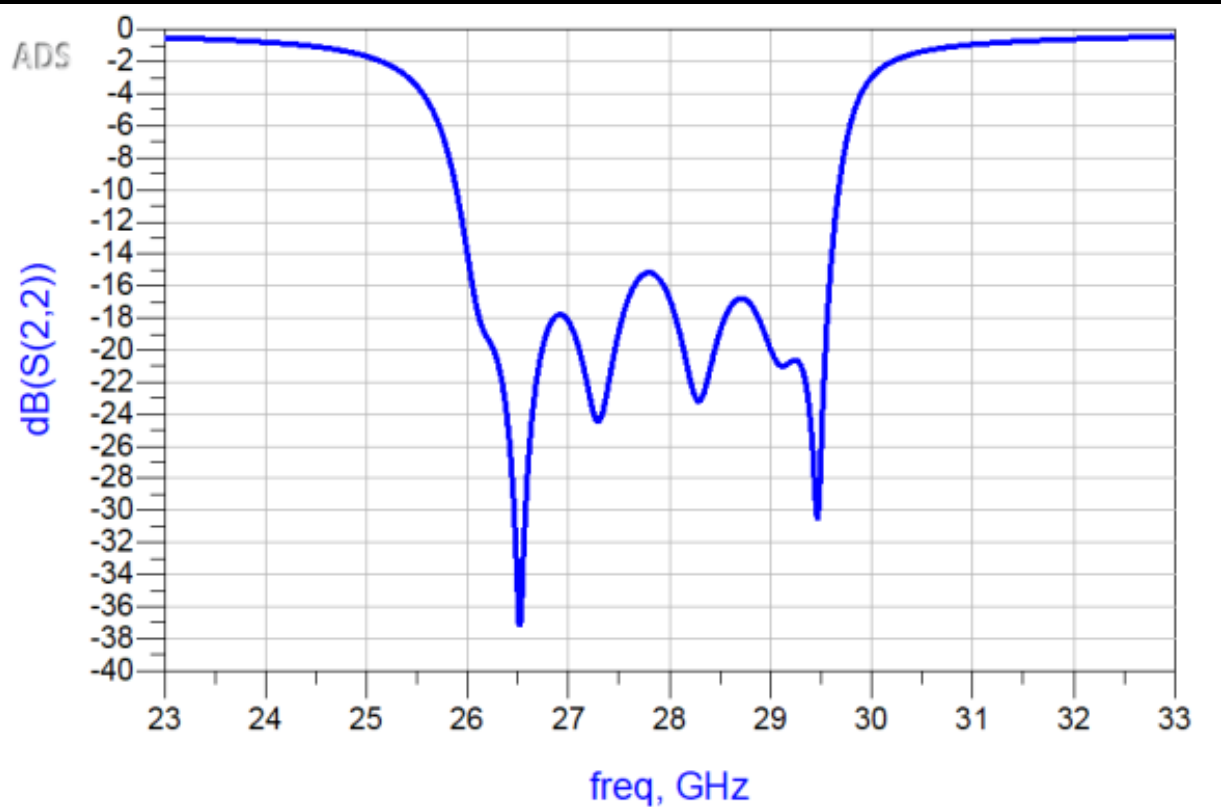
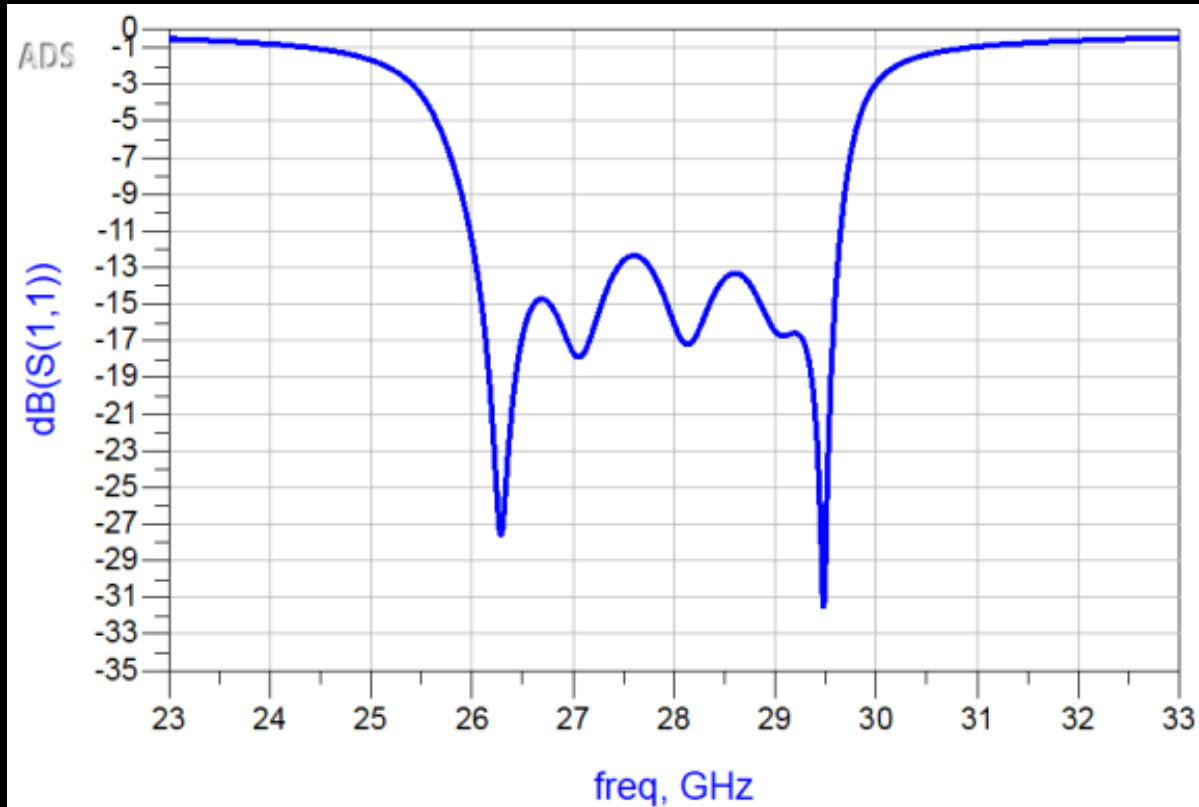
- Στην TDD λειτουργία η κεραία και το φίλτρο δεσμεύονται και απο τον πομπό αλλά και τον δέκτη σε διαφορετικές χρονικές περιόδους.
- Όταν είναι ενεργοποιημένος ο πομπός/δέκτης, είναι απενεργοποιημένος ο δέκτης/πομπός αντίστοιχα.
- Η Z_{in} της απενεργοποιημένης μονάδας δεν είναι πλέον 50Ω , οπότε υπάρχουν ανακλάσεις ισχύος.
- Χρειάζεται προσαρμογή λοιπόν.

Κύκλωμα Προσαρμογής 2/5

- Η τροποποίηση του ίδιου του φίλτρου πιθανώς είναι η βέλτιστη λύση απο άποψης χώρου. Η προσθήκη ξεχωριστού κυκλώματος προσαρμογής όμως επιτρέπει την άμεση χρήση του φίλτρου και για άλλες εφαρμογές.
- Εάν χρησιμοποιηθεί ξεχωριστό κύκλωμα προσαρμογής υπάρχουν δύο επιλογές :
 1. Σχεδίαση ενός κυκλώματος προσαρμογής μεταξύ φίλτρου και διαιρέτη ισχύος Wilkinson.
 2. Σχεδίαση ενός κυκλώματος προσαρμογής μεταξύ πομπού και διαιρέτη και ενός άλλου μεταξύ δέκτη και διαιρέτη.
- Σίγουρο πλεονέκτημα της πρώτης επιλογής είναι η μειωμένη πολυπλοκότητα. Πιθανό πλεονέκτημα της δεύτερης επιλογής είναι η μεγαλύτερη ευελιξία.

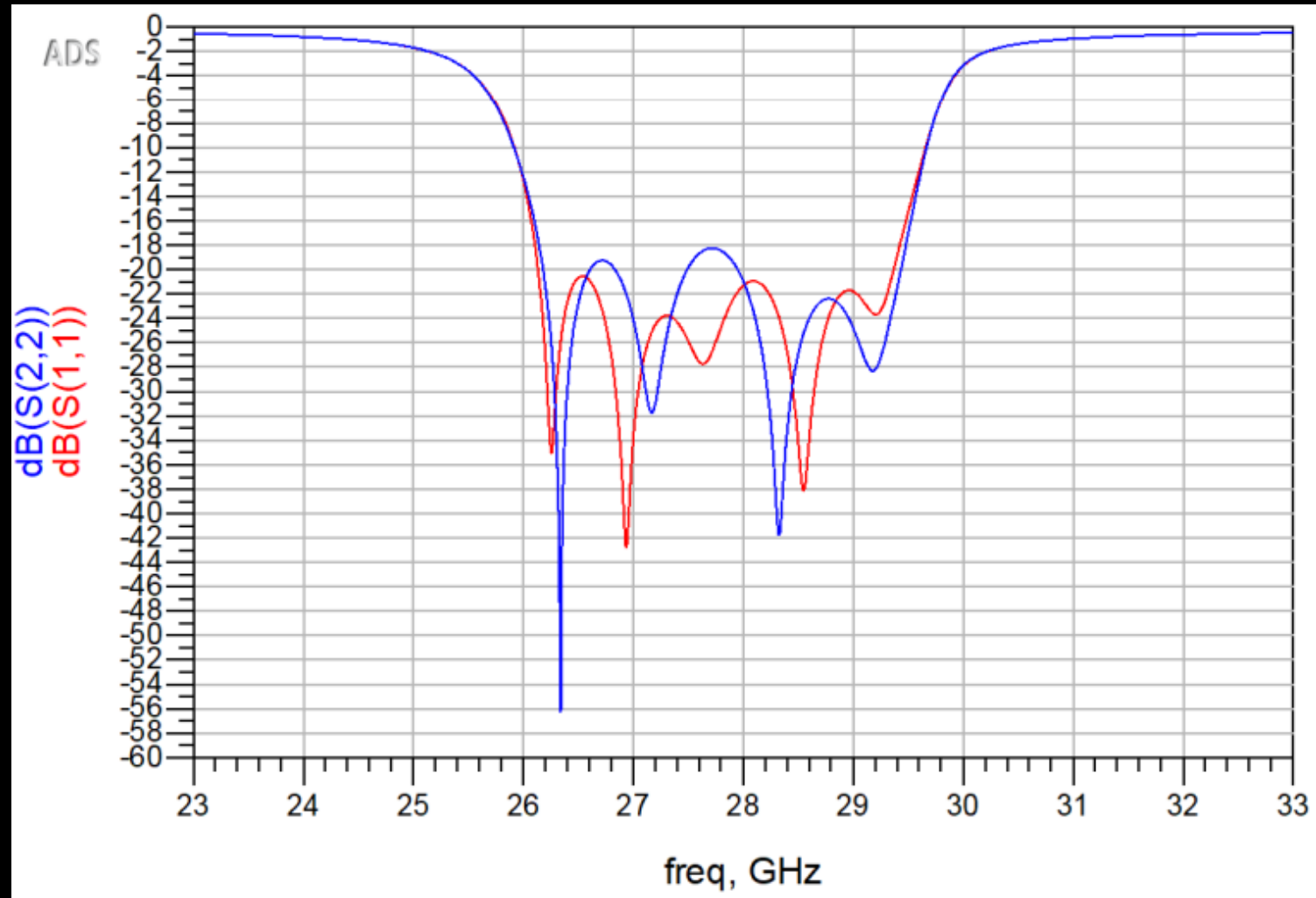
Κύκλωμα Προσαρμογής 3/5

- Αποτελέσματα κυκλωματικής προσομοίωσης στην περίπτωση που δεν υπάρχει κάποιο κύκλωμα προσαρμογής :



Κύκλωμα Προσαρμογής 4/5

- Ηλεκτρομαγνητικά βελτιστοποιημένη απόκριση κυκλώματος προσαρμογής με αναδιπλωμένα στελέχη :



Κύκλωμα Προσαρμογής 5/5

- Τελικό φυσικό σχέδιο με διαστάσεις 3.3mm X 2.533mm :



Συγκέντρωση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα 1/4

	Edge-Coupled	Hairpin
Yield(%)	70.39	58.77
Dimensions(x mm X y mm)	13.0217mm X 2.926mm	7.6149mm X 1.8413mm
Passband IL(dB)	2.099	0.921
RL(dB)	~ 20	~11
IL(dB) @24GHz, 32GHz	47.552, 46.267	46.531, 45.979

Συμπεράσματα 2/4

- Η θεωρητικά προβλεπόμενη τάξη του φίλτρου μπορεί να μην επαρκεί στην πράξη λόγω διάφορων περιορισμών που θέτει η τεχνολογία κατασκευής.
- Η απόσταση μεταξύ των αγωγών του πρώτου και του τελευταίου ζεύγους συζευγμένων γραμμών πρέπει να είναι αρκετά μικρή για την καταστολή της κυμάτωσης στην ΖΔ.
- Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την λύση αυτού του προβλήματος :
 1. Αύξηση τάξης του φίλτρου.
 2. Χρήση υλικού με μεγαλύτερη Dk .
 3. Χρήση υβριδικού υποστρώματος.
 4. Αλλαγή design.

Συμπεράσματα 3/4

- Η καθεμία απο αυτές τις επιλογές έχει θετικά και αρνητικά :
- Αύξηση της τάξης :
 - + → Μικρότερη κυμάτωση για ίδια εξασθένιση.
 - → Αυξάνονται απώλειες & διαστάσεις + πιο πολύπλοκη και χρονοβόρα EM βελτιστοποίηση.
- Αύξηση D_k :
 - + → Ίδια σύζευξη για μεγαλύτερη απόσταση αγωγών, μείωση διαστάσεων & παρασιτικής ακτινοβολίας.
 - → Το πλάτος των γραμμών πρέπει να μειωθεί. Αυτό κατασκευαστικά ίσως δεν είναι εφικτό, αλλά αυξάνει και τις απώλειες, ενώ μειώνει και το yield.
- Υβριδικό υπόστρωμα : Λεπτό υλικό μεγάλης D_k κοντά στους αγωγούς και παχύτερο υλικό αρκετά μικρότερης D_k χαμηλότερα.
 - + → Το συνολικό D_k διατηρείται μικρό, επιτρέποντας την χρήση πλατύτερων αγωγών ενώ επιτυγχάνεται μεγαλύτερη σύζευξη. Καταστέλλει τις παρασιτικές αρμονικές αποκρίσεις.
 - → Δεν προσφέρεται τυπικά απο τους κατασκευαστές.

Συμπεράσματα 4/4

- Ανοχή πάχους διηλεκτρικού → η πιο κρίσιμη παράμετρος για το yield.
- Χρήση δύο κυκλωμάτων προσαρμογής, για πομπό και δέκτη
 - + → Βελτιώνει κατά 3dB το RL σε σχέση με ένα.
 - → Αυξάνει πολυπλοκότητα EM βελτιστοποίησης & τις διαστάσεις.
- Αναδίπλωση στελεχών → 30% εξοικονόμηση χώρου.

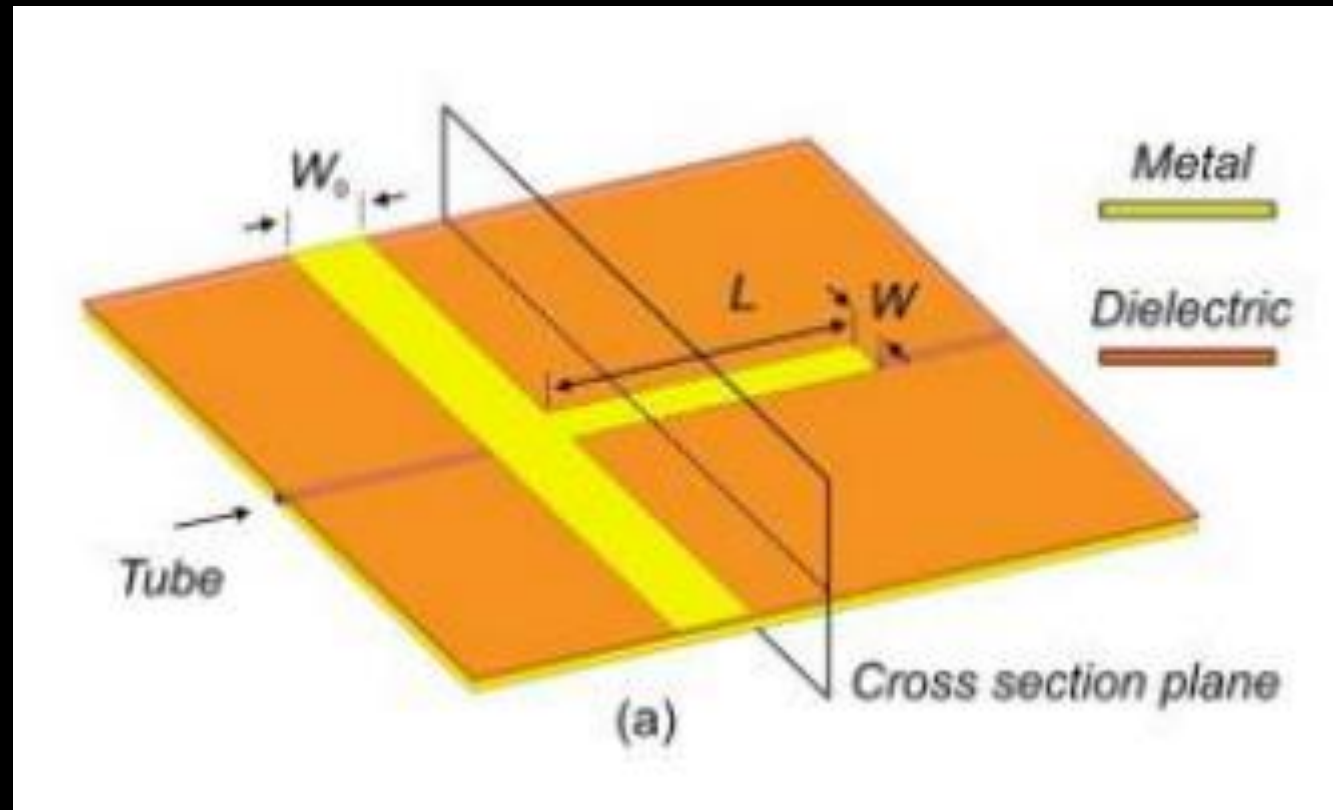
Μελλοντικές προεκτάσεις της εργασίας 1/2

- Κατασκευή και μέτρηση των διατάξεων.
- Χρήση ζευγών συζευγμένων γραμμών ανα τρεις αγωγούς.
- Μελέτη αποδοτικότερων τρόπων βελτιστοποίησης.
- Σχεδίαση 7^{ης} τάξης hairpin φίλτρου.
- Σχεδίαση με διαφορετικό υλικό υποστρώματος.

Μελλοντικές προεκτάσεις της εργασίας 2/2

- Τροποποίηση του φίλτρου έτσι ώστε να είναι προσαρμοζόμενο με πυκνωτές MEMS(θέματα αξιοπιστίας), Varactors(απώλειες), PIN διόδους(κατανάλωση ισχύος) ή ακόμα και με ροή ρευστών :

[5]



ΤΕΛΟΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ
ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ

Βιβλιογραφία εικόνων

- [1] E. BENEVENT, «Transmission lines in MMIC technology,» Università Mediterranea di Reggio Calabria, 2010.
- [2] Κ. Ε. Ε. Γιούλτσης Τραϊανός Β., Μικροκύματα Θεωρία και εφαρμογές, ΤΖΙΟΛΑ, 2016.
- [3] P. M. David, Μικροκυματική Τεχνολογία, Ελληνική 1η Έκδοση επιμ., Λ. Κωνσταντίνος, Επιμ., Εκδόσεις ίων, p. 736.
- [4] Vishay, «Vishay,» 6 Ιούλιος 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.vishay.com/doc/?53014=>
- [5] S. R. B. A. V. Diedhiou Daouda Lamine, «Microfluidically tunable microstrip filters,» IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, τόμ. 63, αρ. 7, pp. 2245-2252, 2015.