



## ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΥΨΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ (Θ)

### Ενότητα 4: Μικροκυματικές Διατάξεις

ΔΙΔΑΣΚΩΝ: Δρ. Στυλιανός Τσίτσος  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΤΕ



# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



# Ενότητα 4

---

## Μικροκυματικές Διατάξεις

Δρ. Στυλιανός Τσίτσος

# Περιεχόμενα ενότητας

---

# Σκοποί ενότητας

---

# Μικροκυματικές Διατάξεις

## ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

• Ένα μικροκυματικό σύστημα όπου όλα τα στοιχεία έχουν αντιστάσεις ίσες με τη χαρακτηριστική αντίσταση των γραμμών μεταφοράς, ονομάζεται «**προσαρμοσμένο**». Η σημαντικότητα του προσαρμοσμένου κυκλώματος είναι ότι εξαλείφει τρία πιθανά προβλήματα τα οποία προκύπτουν όταν υπάρχουν ανακλώμενα κύματα. Αυτά είναι:

- **Κυμάτωση μετάδοσης σε σχέση με τη συχνότητα:** Όταν υπάρχουν ανακλώμενα κύματα, μπορούν είτε να ενισχύσουν το ένα το άλλο είτε να ακυρώσουν μερικώς το ένα το άλλο, γεγονός που εξαρτάται από τις σχετικές φάσεις των κυμάτων, οι οποίες με τη σειρά τους εξαρτώνται από τη συχνότητα και το μήκος της διαδρομής των σημάτων. Μέσα σε μία ζώνη συχνοτήτων, θα υπάρχει εναλλαγή μεταξύ ενίσχυσης και ακύρωσης, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα μία διακύμανση της μεταδιδόμενης ισχύος. Αυτή η διακύμανση ονομάζεται «**κυμάτωση**» και μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία πολλών τύπων μικροκυματικών συστημάτων και ιδιαίτερα τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

- **Μειωμένη στάθμη σήματος:** Ένα συνηθισμένο πρόβλημα σε μικροκυματικές ενεργές συσκευές όπως οι δίοδοι και τα τρανζίστορ, είναι ότι παρουσιάζουν πολύ υψηλή ανάκλαση έτσι ώστε η χρήσιμη ισχύς του σήματος στα συστήματα ελαττώνεται σημαντικά. Αυτό είναι ιδιαίτερα φανερό σε «ενεργά» στοιχεία όπως οι ενισχυτές και οι μείκτες.

- **Μεγαλύτερο σφάλμα μετρήσεως:** Ένα σημαντικό πρόβλημα κατά την εκτέλεση μετρήσεων ακριβείας της ισχύος σε οποιαδήποτε μικροκυματική συσκευή, είναι η «αβεβαιότητα κακής προσαρμογής» της μετρήσεως. Τα ανακλώμενα κύματα συνδυάζονται μεταξύ τους κατά τυχαίο τρόπο, «κρύβοντας» την ισχύ του αρχικού προσπίπτοντος κύματος που επιθυμούμε να μετρήσουμε. Έτσι, η μετρούμενη ισχύς είναι το επιθυμητό σήμα συν ένα άγνωστο στοιχείο που αποτελείται από ανακλάσεις.

# Μικροκυματικές Διατάξεις

• Μία σημαντική παράμετρος ενός κυκλώματος προσαρμογής είναι το **εύρος ζώνης** μέσα στο οποίο η προσαρμογή είναι αποτελεσματική, επειδή πολλά συστήματα πρέπει να λειτουργούν σε ένα ευρύ πεδίο συχνότητας. Το εύρος ζώνης ενός κυκλώματος συχνά εκφράζεται ως ποσοστό:

$$\text{Εύρος ζώνης (\%)} = 100 \cdot (f_U - f_L) / f_o$$

όπου  $f_U$  η ανώτερη συχνότητα λειτουργίας,  $f_L$  η κατώτερη συχνότητα λειτουργίας και  $f_o$  η κεντρική συχνότητα.

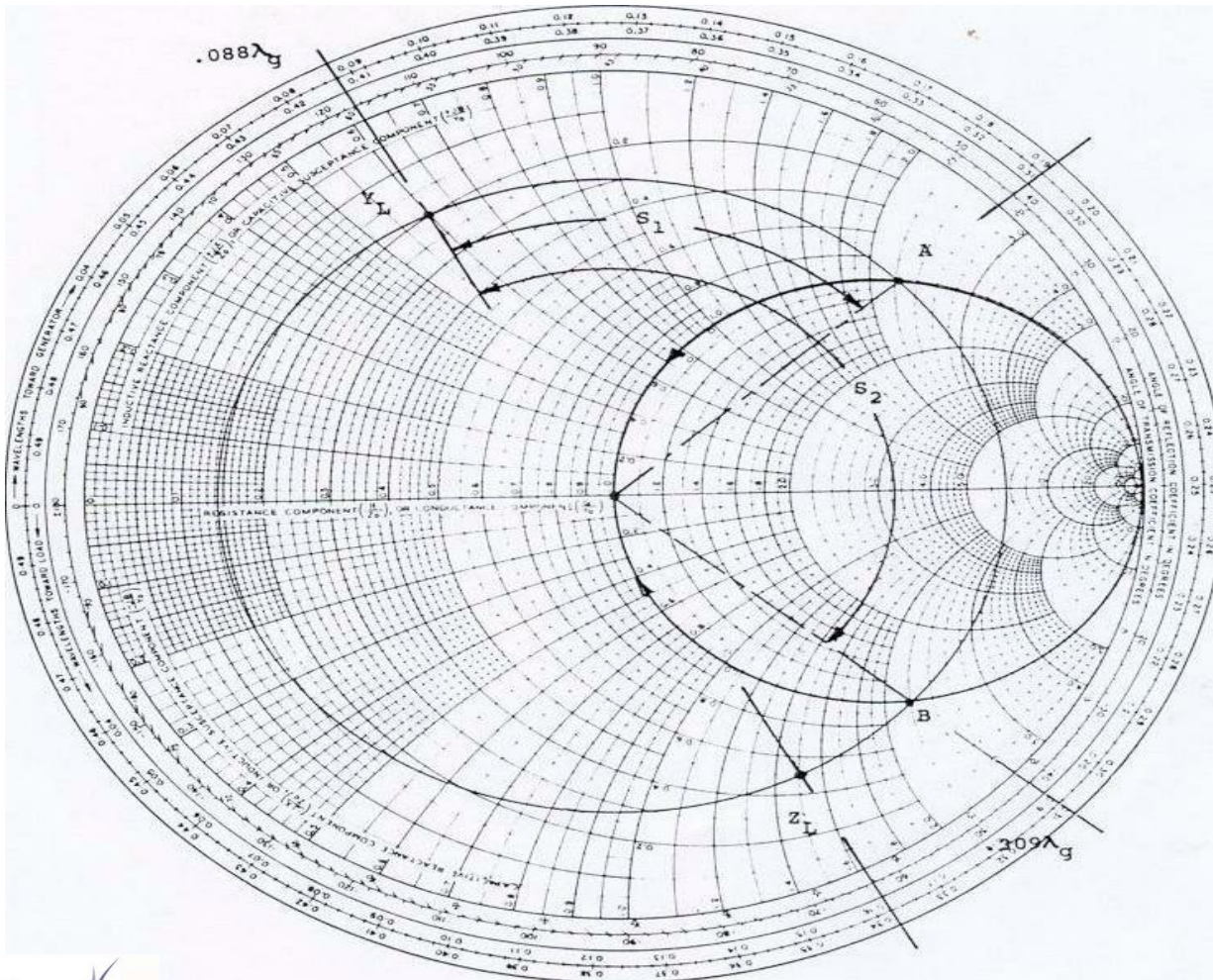
• Οι μέθοδοι προσαρμογής μπορούν να διαχωρισθούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Την **«προσαρμογή χωρίς απώλειες»**, όπου τα στοιχεία κυκλώματος που χρησιμοποιούνται δεν απορροφούν μικροκυματική ενέργεια. Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι καθόλου μικροκυματική ισχύς δεν χάνεται ανωφελώς στο κύκλωμα προσαρμογής. Το μειονέκτημα είναι ότι αυτές οι τεχνικές χρησιμοποιούνται σε σχετικά στενές ζώνες συχνότητας, για παράδειγμα λιγότερο από 10%. Για να επιτύχουμε μεγαλύτερα εύρη ζώνης πρέπει να χρησιμοποιήσουμε υπολογιστικά προγράμματα (Computer Aided Design, CAD). Η ισχύς αυτών των προγραμμάτων έχει συντελέσει στην ανάπτυξη κυκλωμάτων υπερ-ευρείας ζώνης, με εύρη ζώνης από 2-20 GHz σε μερικές περιπτώσεις.

- Την **«προσαρμογή με απώλειες»**, η οποία μπορεί να πετύχει πολύ ευρείας ζώνης αποτελέσματα χωρίς τη χρήση υπολογιστή, αλλά χρησιμοποιεί στοιχεία προσαρμογής με απώλειες, με αποτέλεσμα την υποβαθμισμένη απόδοση του συστήματος. Έτσι επιτυγχάνονται εξαιρετικά μεγάλα εύρη ζώνης, πλησιάζοντας το θεωρητικό όριο, από  $dc$  στην υψηλότερη συχνότητα λειτουργίας, που είναι ένα εύρος ζώνης 200%.

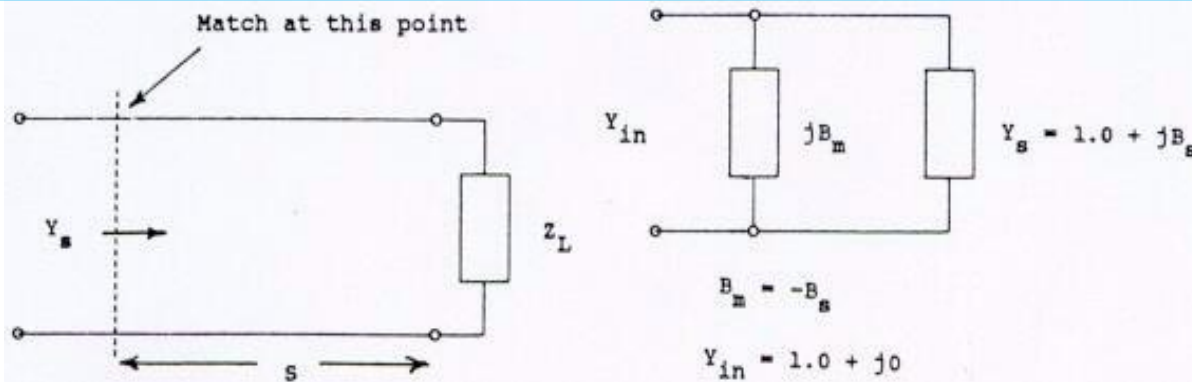


# Μικροκυματικές Διατάξεις



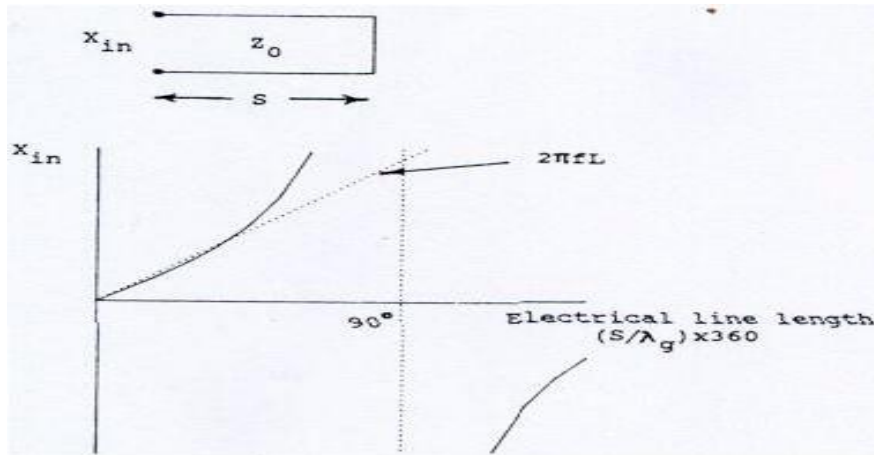
**Σχήμα 1:** Προσαρμογή σύνθετης αντίστασης  $Z_L$ . Το σημείο  $A$  παριστάνει τη θέση μίας παράλληλης επαγωγικής προσαρμογής, ενώ το σημείο  $B$  τη θέση μίας παράλληλης χωρητικής προσαρμογής.

# Μικροκυματικές Διατάξεις



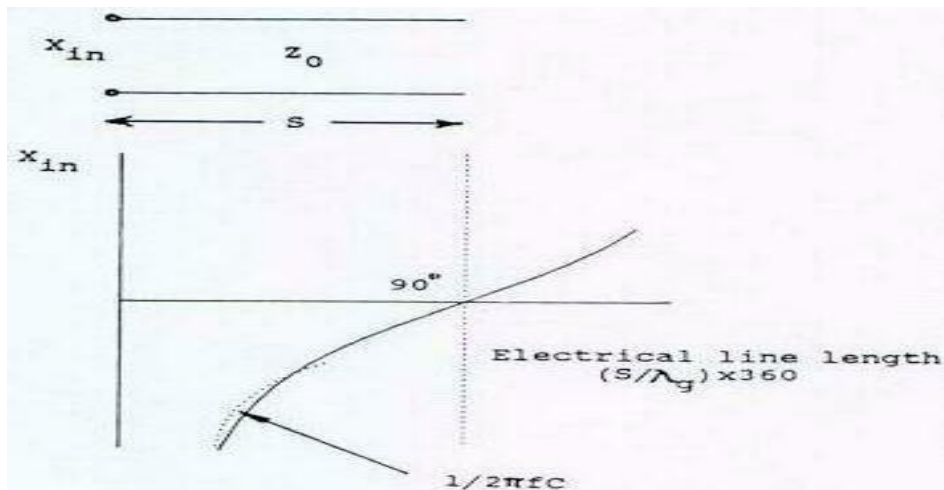
Σχήμα 2: Η συνθήκη για μία διακλαδισμένη αντίσταση προσαρμογής.

## Πρακτικά στοιχεία συντονισμού



Σχήμα 3: Μία βραχυκυκλωμένη γραμμή έχει ιδιότητες μιας επαγωγής όταν η γραμμή μεταφοράς είναι μικρότερη σε μήκος από το ένα τέταρτο του μήκους κύματος στη συχνότητα λειτουργίας.

# Μικροκυματικές Διατάξεις



**Σχήμα 4:** Μία γραμμή ανοιχτού κυκλώματος που είναι μικρότερη σε μήκος από το ένα τέταρτο του μήκους κύματος έχει παρόμοια συμπεριφορά με έναν πυκνωτή.

- Η χαρακτηριστική αντίσταση μιας γραμμής μεταφοράς δίνεται από τη σχέση:

Μία γραμμή μεταφοράς με μία χαμηλή χαρακτηριστική αντίσταση πρέπει να έχει μία υψηλή τιμή του  $C$ , ενώ μία γραμμή με υψηλή χαρακτηριστική αντίσταση πρέπει να έχει μία υψηλή τιμή του  $L$ . Έτσι, **γραμμές υψηλής αντίστασης βρίσκουν εφαρμογή ως πηνία σε σειρά** και **γραμμές χαμηλής αντίστασης μπορούν να αντικατασταθούν από παράλληλους πυκνωτές**. Αυτή είναι μία χρήσιμη τεχνική, δεδομένου ότι το μήκος της γραμμής μεταφοράς είναι μικρότερο από ένα τέταρτο του μήκους κύματος. Στην πράξη, ένα καλός κανόνας είναι να κρατάμε το μήκος της γραμμής μικρότερο από το ένα όγδοο του μήκους κύματος, για να προλάβουμε τα φαινόμενα γραμμής μεταφοράς πριν αυτά γίνουν παρατηρήσιμα.

# Μικροκυματικές Διατάξεις

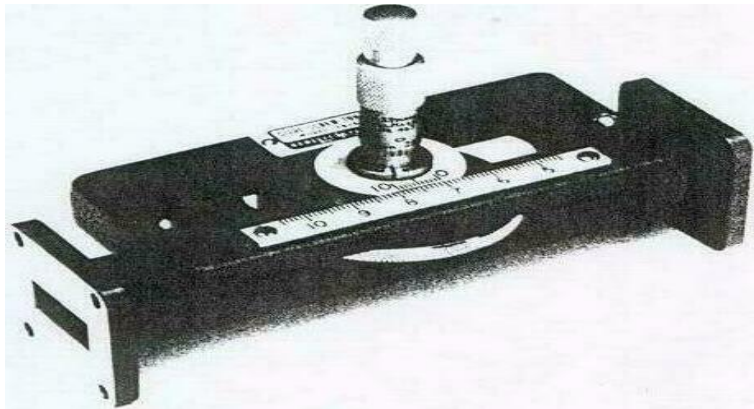
## Διακριτά στοιχεία συντονισμού

- Ο λόγος για τον οποίο αντικαθιστούμε συμβατικά πηνία και πυκνωτές με τμήματα γραμμής μεταφοράς, είναι ότι αυτά τα στοιχεία χάνουν τις χρήσιμες ιδιότητές τους σε μερικές εκατοντάδες  $MHz$  εξαιτίας των φαινομένων αυτο-συντονισμού. Η επαγωγή ενός πυκνωτή, αν και μικρή, γίνεται εμφανής σε αυτές τις υψηλές συχνότητες. Το αποτέλεσμα είναι όπως ένα συντονισμένο κύκλωμα  $LC$  σε σειρά και ο πυκνωτής γίνεται επαγωγικός σε υψηλές συχνότητες. Παρόμοια φαινόμενα συμβαίνουν σε ένα πηνίο όπου η πολύ μικρή χωρητικότητα μεταξύ των σπειρών του, τελικά συντονίζεται με την επαγωγή για να δημιουργήσει ένα παράλληλο συντονισμένο κύκλωμα  $LC$ .
- Οι συχνότητες στις οποίες συμβαίνουν αυτοί οι συντονισμοί είναι δύσκολο να προβλεφθούν ακριβώς, εξαιτίας απλών αποκλίσεων στην κατασκευαστική διαδικασία αυτών των στοιχείων κυκλώματος. Επομένως, πρέπει να λειτουργούμε ασφαλώς κάτω από τις συχνότητες συντονισμού ώστε να μπορούμε να προβλέψουμε τα αποτελέσματα των  $L$  και  $C$  σε κυκλώματα υψηλών συχνοτήτων. Μικροσκοπικοί πυκνωτές που ονομάζονται πυκνωτές “chip” είναι διαθέσιμοι σε συχνότητες μέχρι  $20 GHz$ . Είναι κατασκευασμένοι από διηλεκτρικό υλικό πολύ χαμηλών απωλειών, με πάχος μερικά χιλιοστά της ίντσας. Παρόμοιες προσπάθειες με πηνία έχουν δώσει πηνία «τυπωμένου κυκλώματος» που είναι αρκετά μικρά για να ωθήσουν τη συχνότητα αυτο-συντονισμού μέσα στο μικροκυματικό πεδίο.
- Παρά τις προσπάθειες αυτές, τα περισσότερα κυκλώματα προσαρμογής χρησιμοποιούν γραμμές μεταφοράς για να υλοποιήσουν τα χωρητικά και επαγωγικά φαινόμενα που είναι το θεμέλιο για κυκλώματα προσαρμογής αντίστασης. Η κύρια αιτία είναι ότι αυτές οι γραμμές είναι εύκολο να κατασκευαστούν ως μέρος μικροταινιακής γραμμής και άλλων μορφών υβριδικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Χρησιμοποιώντας ένα διακριτό στοιχείο κυκλώματος απαιτεί χειροκίνητη λειτουργία τοποθέτησης και σύνδεσης του πυκνωτή “chip” ή του πηνίου τυπωμένου κυκλώματος, πράγμα που ανεβάζει την τιμή του στοιχείου. Για τις πιο απαιτητικές εφαρμογές, όμως, διακριτοί πυκνωτές και πηνία θα παρέχουν επιπλέον περιθώριο απόδοσης όταν επιθυμούμε μεγάλα εύρη ζώνης.

# Μικροκυματικές Διατάξεις

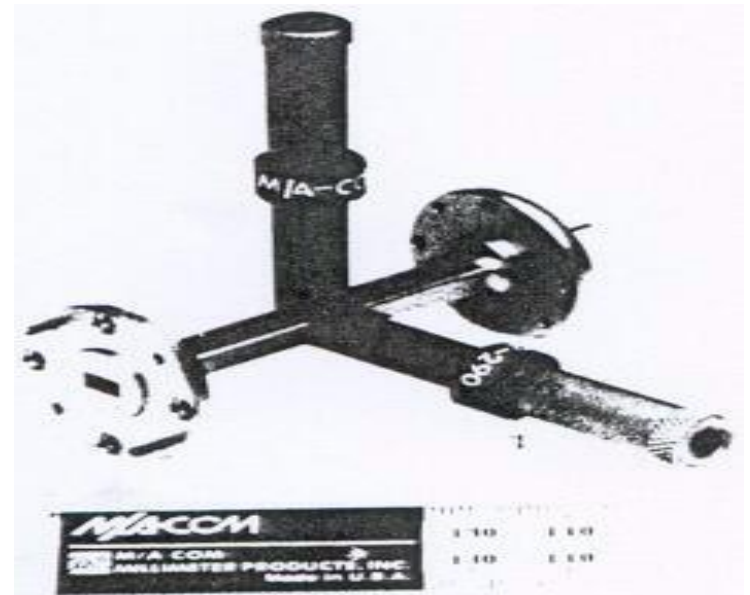
## Κυκλώματα προσαρμογής διαθέσιμα στο εμπόριο

- Συχνά έχουμε περιπτώσεις όπου ένα κύκλωμα προσαρμογής δεν μπορεί να ενσωματωθεί στο φορτίο. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιούμε κυκλώματα προσαρμογής που είναι διαθέσιμα στο εμπόριο. Αυτά τα κυκλώματα μπορεί να είναι σε μορφή κυματοδηγού ή ομοαξονική μορφή.

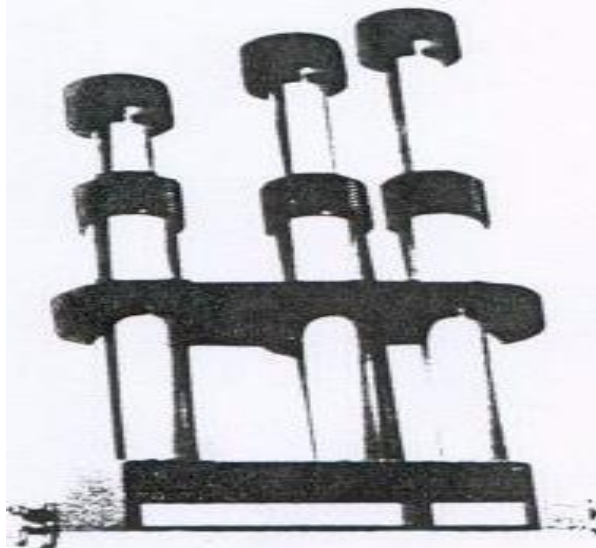


**Σχήμα 5:** Ένας προσαρμογέας κυματοδηγού με ολίσθηση βίδας. Η θέση και το βάθος του μεταλλικού άκρου επαφής (probe) μπορούν να μεταβληθούν.

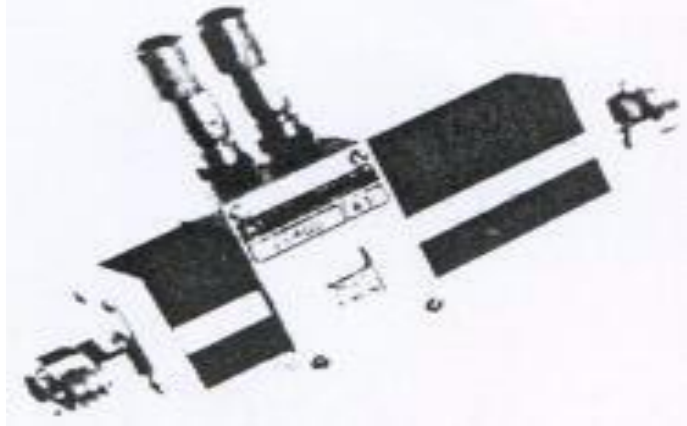
**Σχήμα 6:** Ένας προσαρμογέας κυματοδηγού *E-H*. Μεταβάλλοντας τις θέσεις των βραχυκυκλωμάτων στους κάθετους βραχίονες, οποιαδήποτε αντίσταση μπορεί να προσαρμοστεί.



# Μικροκυματικές Διατάξεις



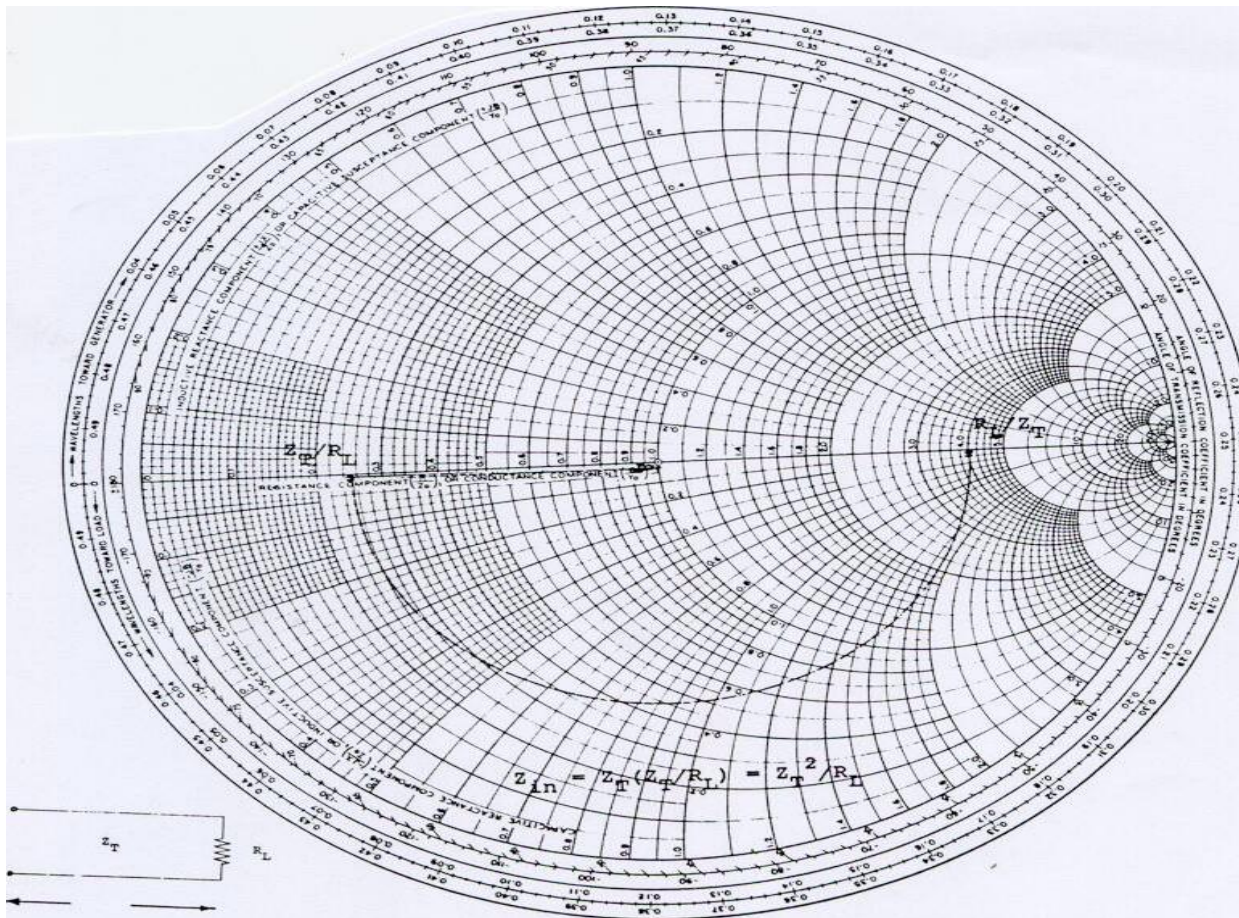
**Σχήμα 7:** Ένας ομοαξονικός προσαρμογέας τριπλού-stub. Το μήκος των stubs μπορεί να μεταβληθεί ανεξάρτητα.



**Σχήμα 8:** Ένας ομοαξονικός προσαρμογέας διπλής ολίσθησης βίδας. Το βάθος και οι σχετικές θέσεις των δύο μεταλλικών άκρων επαφής (probes) μπορούν να μεταβληθούν.

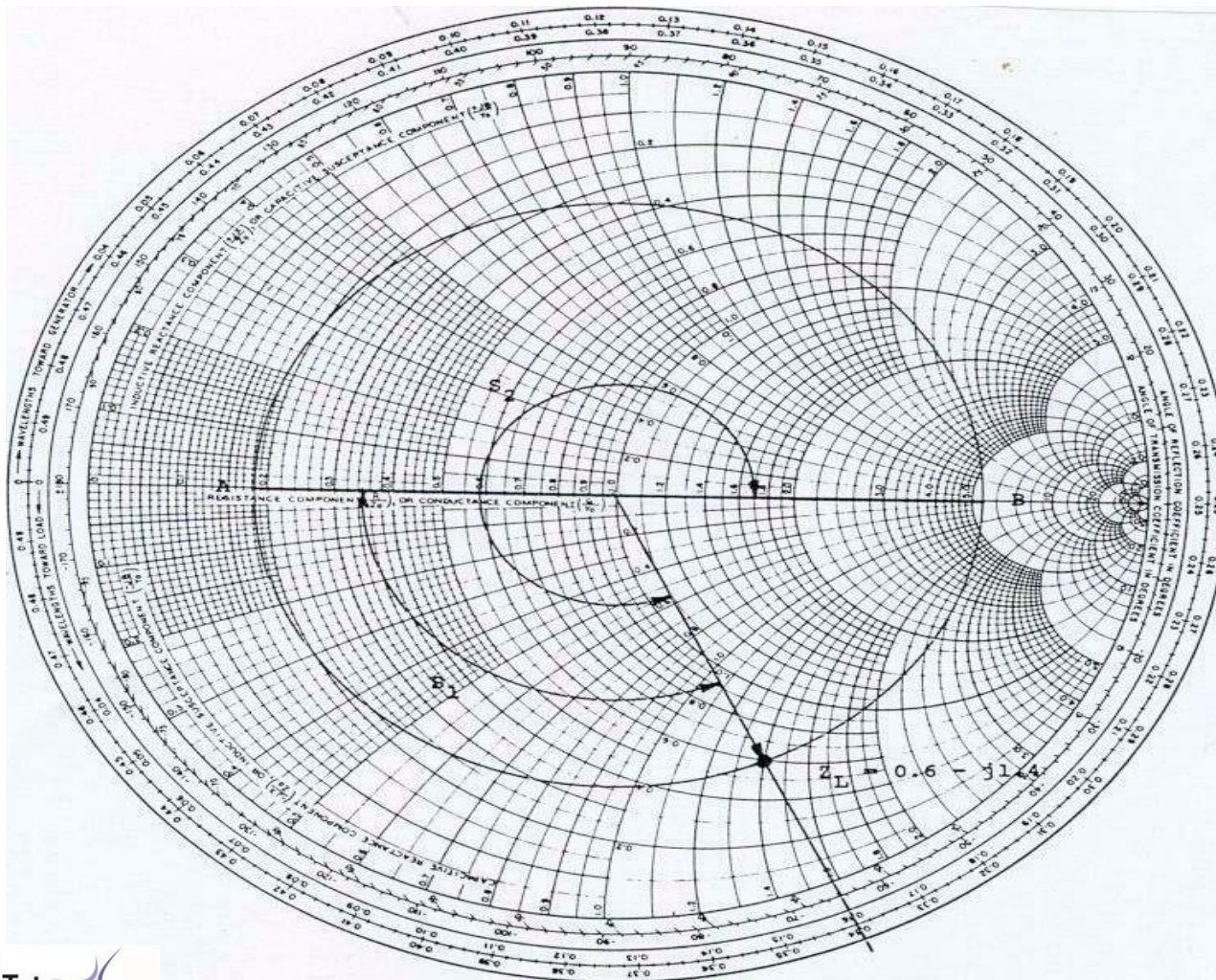
# Μικροκυματικές Διατάξεις

## Ο μετασχηματιστής ενός τετάρτου κύματος



Σχήμα 9: Μετασχηματιστής ενός τετάρτου κύματος που προσαρμόζει ένα ωμικό φορτίο.

# Μικροκυματικές Διατάξεις



**Σχήμα 10:**  
Μετασχηματιστής ενός τετάρτου κύματος που προσαρμόζει ένα αυθαίρετο φορτίο  $Z_L$ .

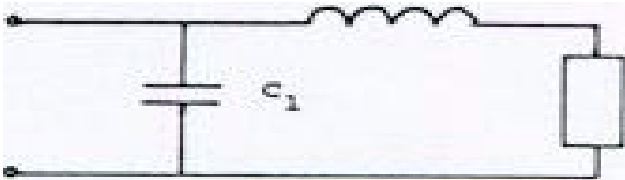


# Μικροκυματικές Διατάξεις

## Ο μετασχηματιστής βηματικής αντίστασης

• Μία μέθοδος για την αύξηση του εύρους ζώνης του μετασχηματιστή προσαρμογής ενός τετάρτου κύματος, είναι να χρησιμοποιήσουμε μία σειρά γραμμών ενός τετάρτου μήκους κύματος με αντιστάσεις που είναι βηματικές μεταξύ της τιμής του φορτίου και της  $Z_0$ . Καθώς ο αριθμός των στοιχείων του μετασχηματιστή αυξάνει, οι τιμές αντίστασης των ξεχωριστών στοιχείων είναι κοντά μεταξύ τους. Τελικά, προσεγγίζουμε έναν άλλο τύπο προσαρμογής γραμμής που είναι η διαβαθμισμένη γραμμή. Αυτή χρησιμοποιεί ένα τμήμα προσαρμογής μιας γραμμής μεταφοράς, η οποία απλά μεταβάλλει τη χαρακτηριστική αντίσταση ομαλά από  $Z_0$  στην  $R_L$  μέσα σε μία απόσταση μερικών μηκών οδηγούμενου κύματος. Κάνοντας τη μετάβαση αρκετά βαθμιαία, οι ανακλάσεις διατηρούνται αμελητέα μικρές, με αποτέλεσμα ένα καλά προσαρμοσμένο φορτίο.

## Χαμηλοπερατά και υψηλοπερατά κυκλώματα προσαρμογής



**Σχήμα 11:** Ένα χαμηλοπερατό πρωτότυπο κύκλωμα προσαρμογής σύνθετης αντίστασης χρησιμοποιώντας διακριτά στοιχεία.



**Σχήμα 12:** Ένα υψηλοπερατό πρωτότυπο κύκλωμα προσαρμογής σύνθετης αντίστασης χρησιμοποιώντας διακριτά στοιχεία.

## Σχεδιασμός με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή (CAD)

# Τέλος Ενότητας

---

