7. ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

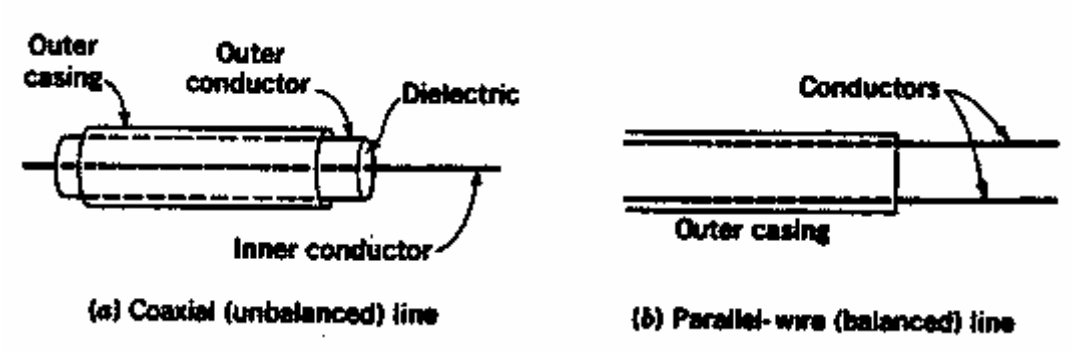
Σε πολλά τηλεπικοινωνιακά συστήματα συχνά είναι απαραίτητη η διασύνδεση σημείων τα οποία απέχουν μια ορισμένη απόσταση το ένα από το άλλο. Ένα τυπικό παράδειγμα είναι η σύνδεση ανάμεσα στον πομπό και στην κεραία του. Αν η συχνότητα είναι αρκετά μεγάλη, μια τέτοια απόσταση μπορεί να είναι μια εκτίμηση κλάσματος του μήκους κύματος που διαδίδεται. Τότε γίνεται απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι ιδιότητες των καλωδίων διασύνδεσης, καθώς πλέον δεν λειτουργούν σαν βραχυκυκλώματα. Επομένως, γίνεται προφανές ότι το μέγεθος, ο διαχωρισμός και η γενική διάταξη του συστήματος των καλωδίων είναι σημαντικά θέματα υπό αυτές τις συνθήκες .

Τα ενσύρματα συστήματα τα οποία έχουν ιδιότητες που δεν μπορούν να παραληφθούν λέγονται γενικά γραμμές μεταφοράς . Στο κεφάλαιο αυτό σκοπεύουμε να τις αντιμετωπίσουμε με ιδιαίτερη προσοχή. Θα ξεκινήσουμε με κάποια θεμελιώδη θέματα και στη συνέχεια θα αναφερθούμε σε ιδιότητες, όπως η *χαρακτηριστική αντίσταση* των γραμμών μεταφοράς. Ακολουθεί το *διάγραμμα Smith* και οι εφαρμογές του, οι οποίες βρίσκουν εφαρμογή σε πολλά προβλήματα που μπορούν να λυθούν με τη βοήθειά του. Τέλος, αναφέρονται διάφορα στοιχεία γραμμών μεταφοράς που χρησιμοποιούνται ευρέως, όπως *stubs*, *κατευθυνόμενοι couplers* και μετασχηματιστές ισορροπημένης σε μη ισορροπημένη γραμμή (*baluns*).

Οι γραμμές μεταφοράς θα αντιμετωπιστούν με πρακτικό τρόπο. Θα θεωρηθεί ότι δεν απαιτείται προσέγγιση θεμελιώδους θεωρίας κυκλωμάτων. Και αυτό γιατί είτε μια τέτοια παρουσίαση έχει ήδη γίνει σε ένα μάθημα θεωρίας κυκλωμάτων, είτε γιατί αποφασίστηκε ότι δεν πρέπει να γίνει στο συγκεκριμένο μάθημα. Σε κάθε περίπτωση, το υλικό που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο είναι επαρκές .

7-1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

Οι γραμμές μεταφοράς είναι ένα μέσο μεταφοράς σημάτων ή ισχύος από ένα σημείο σε ένα άλλο. Από έναν τέτοιο γενικό ορισμό, οποιοδήποτε σύστημα καλωδίων μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί μια ή περισσότερες γραμμές μεταφοράς. Ωστόσο, αν πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ιδιότητες αυτών των γραμμών, οι γραμμές θα μπορούσαν να διευθετηθούν με έναν απλό, συμβατό τρόπο. Αυτό θα έκανε πιο εύκολη τη διαδικασία υπολογισμού των ιδιοτήτων τους και θα τις έκανε συμβατές για κάθε τύπο γραμμής μεταφοράς. Επομένως, στην πράξη η διευθέτηση όλων των γραμμών μεταφοράς γίνεται με έναν ομοιόμορφο τρόπο. Αυτό απλοποιεί τους υπολογισμούς, μειώνει τα κόστη και προσδίδει άνεση .



Σχήμα 7-1 Γραμμές μεταφοράς

7-1.1 Θεμελιώδη Θέματα Γραμμών Μεταφοράς

Υπάρχουν δυο τύποι γραμμών μεταφοράς που κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται. Στο σχήμα 7-1b παρουσιάζεται η γραμμή παραλλήλων καλωδίων (ισορροπημένη) και στο σχήμα 7-1a παρουσιάζεται η ομοαξονική γραμμή (μη ισορροπημένη).

Η γραμμή παράλληλου-καλωδίου εφαρμόζεται όπου απαιτούνται ιδιότητες ισορροπίας : για παράδειγμα , κατά την σύνδεση διπλωμένης διπολικής (folded dipole) κεραίας σε ένα δέκτη τηλεόρασης ή μιας ρομβικής κεραίας σε έναν HF πομπό. Αντίθετα, η ομοαξονική γραμμή χρησιμοποιείται όταν απαιτούνται μη ισορροπημένες ιδιότητες, όπως στην διασύνδεση ενός πομπού που εκπέμπει ευρέως με την γειωμένη του κεραία. Επίσης, όπως θα δειχτεί, εφαρμόζεται σε UHF και μικροκυματικές συχνότητες για την αποφυγή του κινδύνου της ακτινοβολίας από την ίδια την γραμμή μεταφοράς.

Οποιοδήποτε σύστημα αγωγών είναι πιθανό να ακτινοβολεί αν η απόσταση που χωρίζει τους αγωγούς προσεγγίζει το μισό του μήκους κύματος στην συχνότητα λειτουργίας. Αυτό είναι πολύ πιο πιθανό να εμφανιστεί σε μια γραμμή παράλληλου-καλωδίου από ότι σε μια ομοαξονική γραμμή, του οποίου ο εξωτερικός αγωγός περιβάλει τον εσωτερικό και είναι συνεχώς γειωμένος. Επομένως, οι γραμμές παράλληλου-καλωδίου δεν χρησιμοποιούνται ποτέ για μικροκύματα, ενώ οι ομοαξονικές γραμμές μπορούν να εφαρμοστούν για συχνότητες μέχρι το πολύ 18 GHz. Στο κεφάλαιο 10 θα δούμε ότι και οι κυματοδηγοί έχουν περιορισμούς στην συχνότητα. Ωστόσο, σε γενικές γραμμές ισχύει ότι υπάρχει όριο στην μικρότερη χρησιμοποιούμενη συχνότητα, κάτω από περίπου 1 GHz, όπου οι διαστάσεις της διατομής των κυματοδηγών γίνονται ενοχλητικά μεγάλες. Έτσι, ανάμεσα σε 1 και 18 GHz χρησιμοποιούνται κυματοδηγοί ή ομοαξονικές γραμμές ανάλογα με τις απαιτήσεις και την εφαρμογή αν και οι κυματοδηγοί κανονικά δεν χρησιμοποιούνται κάτω από το 1 GHz και οι ομοαξονικές γραμμές κανονικά δεν χρησιμοποιούνται πάνω από τα 18 GHz.

Περιγραφή Σε κάθε γενική ομάδα ή τύπο γραμμών μεταφοράς υπάρχει μια εκπληκτική ποικιλία από διάφορα είδη, που χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές. Μια αναζήτηση σε ένα εγχειρίδιο κατασκευαστή είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντική. Παρουσιάζει, όπως φαίνεται και στον πίνακα 7-1 για έναν αριθμό γραμμών, τις διαφορετικές μορφές των γραμμών και συνδέσμων, μαζί με τα χαρακτηριστικά, τις βαθμολογίες και τις εφαρμογές τους [1]. Οι γραμμές μπορεί να είναι άκαμπτες ή εύκαμπτες, εναέριες ή γεμάτες με διάφορα διηλεκτρικά, με λείους ή με ραβδώσεις αγωγούς ανάλογα με τις συνθήκες. Επίσης είναι διαθέσιμες

διαφορετικές διάμετροι και ιδιότητες. Οι εύκαμπτες γραμμές φυσικά πλεονεκτούν έναντι των άκαμπτων , καθώς μπορούμε να τις λυγίσουμε ώστε να ακολουθήσουν οποιαδήποτε φυσική μορφή και είναι πιο εύκολη η αποθήκευση και μεταφορά τους. Αντίθετα, οι άκαμπτες γραμμές μπορούν γενικά να μεταφέρουν πολύ μεγαλύτερη ισχύ, και είναι πιο εύκολο να χρησιμοποιήσουμε για διηλεκτρικό τον αέρα από το να τις γεμίσουμε με στερεό διηλεκτρικό . Αυτό είναι σημαντικό, ειδικά για μεγάλη ισχύ, καθώς όλα τα στερεά διηλεκτρικά έχουν σημαντικά μεγαλύτερες απώλειες από ότι ο αέρας, ειδικά όσο αυξάνονται οι συχνότητες.

Οι άκαμπτες ομοαξονικές γραμμές με διηλεκτρικό τον αέρα αποτελούνται από έναν εσωτερικό και έναν εξωτερικό αγωγό, οι οποίοι διαχωρίζονται κάθε λίγα εκατοστά του μέτρου με spacers διηλεκτρικού μικρής απώλειας. Μπορεί να υπάρχει περίβλημα γύρω από τον εξωτερικό αγωγό για να αποφεύγεται η διάβρωση, κάτι που δεν συνηθίζεται. Ένα εύκαμπτο σύρμα με διηλεκτρικό τον αέρα γενικά έχει ραβδώσεις τόσο στον εσωτερικό όσο και στον εξωτερικό αγωγό, με κατεύθυνση δεξιάς γωνίας στο μήκος του και ένα σπειροειδές διηλεκτρικό υλικό ανάμεσά τους .

TABLE 7-1 Selected Transmission Lines (Coaxial Unless Otherwise Stated)

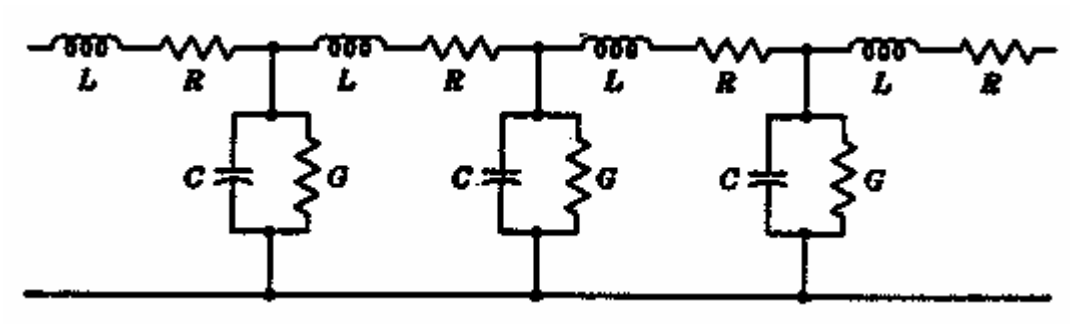
JAN TYPE, NO.	OUTSIDE DIAMETER, mm	Z_0, ohms	DIELECTRIC MATERIAL	VELOCITY FACTOR	ATTENUATION PER METER, dB @ 100 MHz	ATTENUATION PER METER, dB @ 1 GHz	AVERAGE POWER RATING, kW @ 100 MHz	AVERAGE POWER RATING, kW @ 1 GHz	NOTES
RG-58C/U	5.0	53.5	PE[a]	0.66	0.18	0.72	0.18	0.05	Small flexible
RG-213/U	10.3	52.0	PE[a]	0.66	0.08	0.28	0.68	0.19	Medium flexible (previously RG-8/U)
RG-218/U	22.1	52.0	PE[a]	0.66	0.03	0.14	2.0	0.50	Large LA[b], HP[c] (previously RG-17A/U)
RG-11A/U	10.5	75.0	PE[a]	0.66	0.08	0.28	0.68	0.19	Medium flexible, video
RG-85A/U	39.8	75.0	PE[a]	0.66	0.03	0.14	2.0	0.50	Large LA[b], HP[c], armored
RG-55B/U	8.4	53.5	PE[a]	0.66	0.15	0.56	0.18	0.05	Small, microwave (previously RG-5B/U)
RG-211A/U	18.5	50.0	PTFE[d]	0.70	0.10	0.39	22.0	5.5	High temperature, semiflexible
(⅛ in)	22.2	50.0	PTFE[d] pins	0.81	0.01	0.04	4.8	1.6	Rigid } Essentially air dielectric,
(3⅛ in)	79.4	50.0	PTFE[d] pins	0.81	0.003	0.01	52	17	Rigid } with PTFE[d] separating pins
(6⅛ in)	155.6	75.0	PTFE[d] pins	0.81	0.001	0.005[e]	150	46[e]	Rigid } at regular intervals
(\12-50J)	12.7	50.0	PTFE[d] spiral	0.81	0.03	0.09	24	7	Air dielectric, flexible
RG-57A/U	15.9	95.0	PE[a]	0.66					Twin conductor, flexible
		300.0	Foam PE[a]	0.82	0.04[f]	—[g]			Twin lead, flexible

[a]Polyethylene.
[b]Low attenuation.
[c]High power.
[d]Polytetrafluoroethylene (Teflon).
[e]At 900 MHz.
[f]Approximately.
[g]Maximum frequency is 150 MHz.

Πίνακας 7-1 Επιλεγμένες γραμμές μεταφοράς (ομοαξονικές αν δεν ορίζεται διαφορετικά)

Η ικανότητα των γραμμών μεταφοράς να μεταχειρίζονται ισχύ επηρεάζεται από αφύσικη ηλεκτρική εκκένωση ανάμεσα στους αγωγούς εξαιτίας κλίσης υψηλής τάσης που περιορίζει το διηλεκτρικό. Εξαρτάται από τον τύπο του διηλεκτρικού υλικού που χρησιμοποιείται, όπως και από την απόσταση ανάμεσα στους αγωγούς. Έτσι, για τα καλώδια υψηλής ισχύος που χρησιμοποιούνται στους πομπούς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί άζωτο υπό πίεση για το γέμισμα του καλωδίου και μείωση της

αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης. Επειδή το άζωτο είναι λιγότερο αντιδραστικό από το οξυγόνο που υπάρχει στον αέρα, επιπλέον περιορίζεται και η διάβρωση. Επίσης, για την απομάκρυνση της ξηρασίας χρησιμοποιείται ξερός αέρας υπό πίεση. Είναι προφανές ότι καθώς αυξάνεται η μεταδιδόμενη ισχύς, πρέπει να αυξάνονται και οι cross-sectional διαστάσεις του καλωδίου. Για παράδειγμα, για άκαμπτο χάλκινο ομοαξονικό καλώδιο με διηλεκτρικό τον αέρα με εξωτερική διάμετρο 22.5 mm έχει μια μέγιστη ισχύ 43 kW. Αυτό αυξάνεται σε 400 kW για εξωτερική διάμετρο 80 mm και σε 3 MW για 230-mm εξωτερική διάμετρο. Όπως θα δούμε, η εσωτερική διάμετρος πρέπει να αλλάξει μαζί με την εξωτερική διάμετρο, για να εξασφαλίσουμε σταθερή τιμή για όλες τις ιδιότητες των γραμμών .

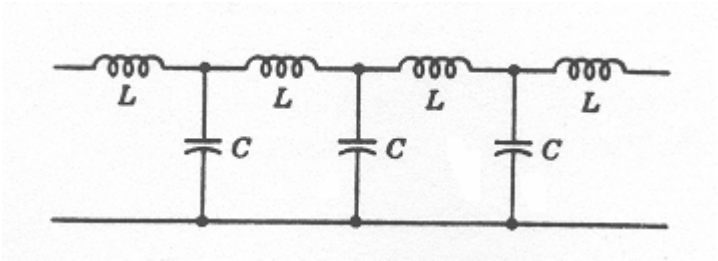


Σχήμα 7-2 Γενικό ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς

Ισοδύναμη αναπαράσταση κυκλώματος Καθώς κάθε αγωγός έχει συγκεκριμένο μήκος και διάμετρο, πρέπει να έχει αντίσταση και επαγωγή . Επειδή υπάρχουν δυο καλώδια που είναι τοποθετημένα κοντά το ένα στο άλλο, πρέπει μεταξύ τους να υπάρχει πυκνωτής . Τέλος, ο διαχωρισμός των καλωδίων γίνεται με ένα μέσο που καλείται *διηλεκτρικό*, το οποίο δεν μπορεί να είναι τέλειο στη μόνωσή του . Η τρέχουσα απώλεια δια μέσου αυτού μπορεί να αναπαρασταθεί με παράλληλη αγωγιμότητα. Το ισοδύναμο κύκλωμα που προκύπτει φαίνεται στο σχήμα 7-2 . Όλες οι ποσότητες που παρουσιάζονται είναι ανάλογες με το μήκος της γραμμής, και είναι ασήμαντες αν δεν έχουν μετρηθεί και δεν παραθέτονται ανά μονάδα μήκους .

Σε ραδιοσυχνότητες, η επαγωγική αντίσταση είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίσταση. Επίσης, η χωρητική ευαισθησία είναι πολύ μεγαλύτερη από την παράλληλη αγωγιμότητα. Έτσι μπορούν να αγνοηθούν τα R και G και τότε προκύπτει μια γραμμή που θεωρείται ότι προκαλεί αμελητέες απώλειες (σαν μια πολύ καλή προσέγγιση για RF υπολογισμούς). Το ισοδύναμο κύκλωμα απλοποιείται και παίρνει τη μορφή του σχήματος 7-3 .

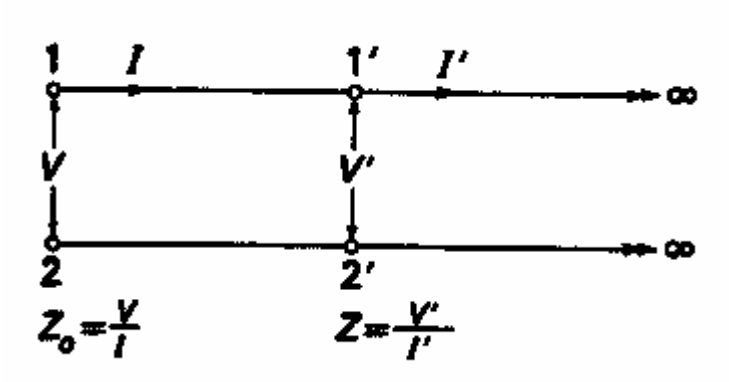
Σημειώνουμε ότι οι ποσότητες L, R, C και G που φαίνονται στα σχήματα 7-2 και 7-3 μετρώνται όλες ανά μονάδα μήκους , π.χ. ανά μέτρο , γιατί εμφανίζονται συνεχώς κατά μήκος της γραμμής. Επομένως κατανέμονται σε όλο το μήκος της γραμμής. Σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να θεωρηθούν ότι συσσωρεύονται σε ένα μόνο σημείο της .



Σχήμα 7-3 Γραμμή μεταφοράς RF ισοδύναμο κύκλωμα

7-1.2 Χαρακτηριστική Αντίσταση

Οποιοδήποτε κύκλωμα που περιέχει σύνθετες αντιστάσεις σε σειρά και διακλάδωση πρέπει να έχει μια σύνθετη αντίσταση στην είσοδο. Για τη γραμμή μεταφοράς αυτή η σύνθετη αντίσταση εισόδου θα εξαρτάται από τον τύπο της γραμμής, το μήκος της και τον τρόπο που τελειώνει. Για την απλοποίηση της περιγραφής και των υπολογισμών, η σύνθετη αντίσταση εισόδου κάτω από σταθερές, απλές και εύκολα αναπαραγωγίσιμες συνθήκες λαμβάνεται σαν σημείο αναφοράς και λέγεται η *χαρακτηριστική αντίσταση* της γραμμής. *Εξ ορισμού, η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς Z_0 είναι η αντίσταση που μετριέται στην είσοδο της γραμμής όταν το μήκος της είναι άπειρο.* Υπό αυτές τις συνθήκες, ο τρόπος που γίνεται ο τερματισμός δεν ασκεί καμία επίδραση στο τέλος της γραμμής μεταφοράς και για αυτό δεν αναφέρεται στον ορισμό.



Σχήμα 7-4 Άπειρη γραμμή

Μέθοδοι υπολογισμού Τώρα μπορεί να αποδειχτεί ότι η χαρακτηριστική αντίσταση μιας γραμμής θα μετρηθεί στην είσοδό της, όταν στο τέλος της γραμμής η αντίσταση είναι Z_0 , ανεξάρτητα από το μήκος της γραμμής. Αυτό είναι σημαντικό καθώς για να γίνουν μετρήσεις , είναι πολύ πιο εύκολη η αναπαραγωγή μιας τέτοιας περίπτωσης από μια γραμμή άπειρου μήκους.

Αν μια γραμμή έχει άπειρο μήκος, όλη η ισχύς που εισέρχεται σε αυτήν θα απορροφηθεί. Πρέπει να είναι εμφανές ότι όσο αυξάνεται η απόσταση από την είσοδο, η τάση και το ρεύμα θα μειώνονται κατά μήκος της γραμμής σαν αποτέλεσμα των πτώσεων τάσης στην επαγωγή και των διαρροών ρεύματος στους πυκνωτές. Από την έννοια του απείρου, τα σημεία 1'-2' του σχήματος 7-4 είναι τόσο μακριά από το τέλος αυτής της γραμμής όσο είναι και τα σημεία 1-2. Επομένως, η σύνθετη αντίσταση στα 1'-2' (από δεξιά) είναι επίσης Z_0 , αν και το ρεύμα και η τάση έχουν μικρότερη τιμή από ότι στα 1-2. Μπορούμε λοιπόν να θεωρήσουμε ότι τα τερματικά εισόδου βλέπουν ένα τμήμα της γραμμής ως τα σημεία 1'-2' , που ακολουθείται από

ένα κύκλωμα που έχει αντίσταση εισόδου ίση με Z_0 . Είναι προφανές ότι δεν έχει σημασία από τι αποτελείται το κύκλωμα δεξιά των 1'-2' , εφόσον έχει αντίσταση εισόδου ίση με την χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής. *Άρα, η Z_0 θα μετρηθεί στην είσοδο της γραμμής μεταφοράς αν η έξοδος τερματίζει στην Z_0 .*

Από τη θεωρία των φίλτρων προκύπτει ότι η χαρακτηριστική αντίσταση ενός επαναληπτικού κυκλώματος που αποτελείται από στοιχεία σε σειρά και παράλληλα δίνεται ως :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \qquad \textbf{(7-1)}$$

όπου Z = εν σειρά αντίσταση ανά τμήμα
= $R + j\omega L$ (Ω/m εδώ) και είναι η εν σειρά αντίσταση ανά μονάδα μήκους
Y = παράλληλη είσοδος ανά τμήμα
= $G + j\omega C$ (S/m εδώ) και είναι η είσοδος διακλάδωσης ανά μονάδα μήκους

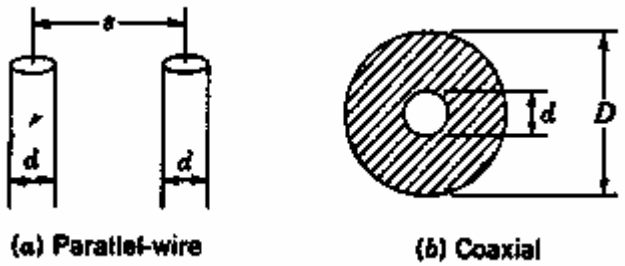
Επομένως

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \qquad \textbf{(7-2)}$$

Από την σχέση (7-2) προκύπτει ότι η χαρακτηριστική αντίσταση μιας γραμμής μεταφοράς μπορεί να είναι μιγαδικός αριθμός κάτι που συμβαίνει συχνά ειδικά σε γραμμές επικοινωνίας π.χ. τηλεφωνία σε συχνότητες φωνής. Σε ραδιοσυχνότητες, όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα ωμικά στοιχεία του ισοδύναμου κυκλώματος γίνονται ασήμαντα, και η έκφραση του Z_0 γίνεται :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \qquad \textbf{(7-3)}$$

το L μετριέται σε henrys ανά μέτρο και το C σε farads ανά μέτρο, από όπου προκύπτει ότι η σχέση 7-3 παρουσιάζει την χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής σε ohms και είναι σωστή ως προς τις διαστάσεις. Επίσης , η σχέση 7-3 δείχνει ότι *αυτή η χαρακτηριστική αντίσταση είναι ωμική στις ραδιοσυχνότητες* .



Σχήμα 7-5 Γεωμετρία γραμμής μεταφοράς

Φυσικά, η χαρακτηριστική αντίσταση προσδιορίζεται από τη γεωμετρία , το μέγεθος και την απόσταση των αγωγών αλλά και από την διηλεκτρική σταθερά του μονωτικού

υλικού που τους χωρίζει. Με βάση τα παραπάνω μπορούν να υπολογιστούν οι διάφοροι όροι που είναι κάποιας σημασίας , όπως φαίνεται στο σχήμα 7-5 :

Για την παράλληλη γραμμή έχουμε :

$$Z_0 = 276 \log \frac{2s}{d} \qquad \mathbf{\Omega} \qquad \textbf{(7-4)}$$

Για την ομοαξονική γραμμή έχουμε :

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{k}} \log \frac{D}{d} \qquad \mathbf{\Omega}^{1} \qquad \textbf{(7-5)}$$

όπου k είναι η διηλεκτρική σταθερά του μονωτικού υλικού.

Είναι φανερό ότι η σχέση 7-4 δε λαμβάνει υπόψη τη διηλεκτρική σταθερά του μονωτικού υλικού. Αυτό ισχύει γιατί για παράλληλες γραμμές το υλικό αυτό είναι πολύ συχνά ο αέρας και η διηλεκτρική του σταθερά είναι μονάδα. Η μορφή του Z_0 για ισορροπημένη γραμμή με στερεό διηλεκτρικό υλικό είναι σχεδόν ίδια , εκτός ότι ο πρώτος όρος γίνεται $276/\sqrt{k}$.

Το εύρος τιμών των χαρακτηριστικών αντιστάσεων για τις ισορροπημένες γραμμές είναι συνήθως 150 – 600 Ω και για ομοαξονικές γραμμές 40 – 150 Ω, όπου και οι δυο περιορίζονται από τη γεωμετρία τους. Αυτό αλλά και ο τρόπος που χρησιμοποιούνται οι τύποι των χαρακτηριστικών αντιστάσεων παρουσιάζονται στα επόμενα τρία παραδείγματα .

Παράδειγμα 7-1 Ένα τμήμα RG-59B/U ομοαξονικού καλωδίου έχει 75-Ω χαρακτηριστική αντίσταση και ονομαστική χωρητικότητα 69pF/m. Ποια είναι η επαγωγή του ανά μέτρο ; Αν η διάμετρος του εσωτερικού αγωγού είναι 0.584 mm και η διηλεκτρική σταθερά του μονωτικού υλικού είναι 2.23 , ποια είναι η διάμετρος του εξωτερικού αγωγού ;

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$L = Z_0^2 C = 75^2 x 69 x 10^{-12} = 3.88 x 10^{-7} = 0.388 \mu H / m$$

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{k}} \log \frac{D}{d}$$

$$\log \frac{D}{d} = \frac{Z_0}{138/\sqrt{k}} = \frac{75}{138/\sqrt{2.23}} = 0.81$$

$$D = Dxanti \log 0.81 = 0.584 x 6.457 = 3.77 mm$$

Παράδειγμα 7-2 Ποια είναι η ελάχιστη τιμή που θα μπορούσε να έχει η χαρακτηριστική αντίσταση παράλληλης γραμμής με διηλεκτρικό τον αέρα;

[1] Ο αριθμός 138 δεν είναι όσο περιττός φαίνεται , ισούται με 120π/e , όπου 120π=377 Ω είναι η αντίσταση του κενού χώρου και e είναι η βάση του συστήματος φυσικού αλγορίθμου. Το 276 είναι φυσικά 2 x 138

Η ελάχιστη χαρακτηριστική αντίσταση υπάρχει όταν το 2s/d είναι επίσης ελάχιστο και αυτό επιτυγχάνεται όταν τα δυο καλώδια του σχήματος 7-5a έρθουν σχεδόν σε επαφή. Τότε s = d και έχουμε :

$$Z_{0,\min} = 276\log 2x1 = 276x0.3010 = 83\Omega$$

Παράδειγμα 7-3 Ένα ομοαξονικό καλώδιο , με εσωτερική διάμετρο 0.025mm και με μονωτικό υλικό που έχει διηλεκτρική σταθερά 2.56 , έχει χαρακτηριστική αντίσταση 2000Ω. Ποια πρέπει να είναι η εξωτερική διάμετρος του αγωγού ;

$$\log\frac{D}{d} = \frac{Z_0}{138/\sqrt{k}} = \frac{2{,}000}{138/\sqrt{2.56}} = 2{,}000x\frac{1.6}{138} = 23.1884$$

$$D = dxanti\log 23.1884 = 0.025x10^{23}x1.543 = 3.86x10^{21}mm$$

$$= 3.86x10^{15}km = \frac{3.86x10^{15}}{9.44x10^{12}} = 409 \text{ έτη φωτός}$$

Ένα έτος φωτός , όπως δηλώνει και το όνομά του, είναι η απόσταση που διανύεται από το φως σε ένα χρόνο με ταχύτητα 300,000 km ανά δευτερόλεπτο. Η μορφή των 409 ετών φωτός είναι σχεδόν 100 φορές η απόσταση του πιο κοντινού αστέρα (Proxima Centauri) από το ηλιακό σύστημα και το παράδειγμα αυτό προσπαθεί να δείξει συμπερασματικά ότι μια τόσο μεγάλη χαρακτηριστική αντίσταση απλά δεν είναι δυνατή .

Αν υπάρχει ανάγκη για χαρακτηριστική αντίσταση μεγάλης τιμής, έχει αποδειχτεί ότι οι αγωγοί πρέπει να είναι πολύ μικροί για να δώσουν μεγάλη επαγωγή ανά μονάδα μήκους. Επιπλέον, η μεταξύ τους απόσταση πρέπει να είναι πολύ μεγάλη για να δώσουν όσο το δυνατό μικρότερη διακλαδισμένη χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους. Τα όρια όμως της απόστασης κάποια στιγμή τελειώνουν. Στην αντίθετη πλευρά της κλίμακας, βρίσκει εφαρμογή το ακριβώς αντίθετο. Οι αποστάσεις ανάμεσα στους αγωγούς γίνονται ενοχλητικά μικρές για ομοαξονικές γραμμές. Γίνονται αδύνατες για παράλληλες γραμμές, καθώς θα υπήρχε επικάλυψη αγωγών αν γινόταν προσπάθεια για Z_0 μικρότερη από 83 Ω .

7-1.3 Απώλειες σε γραμμές μεταφοράς

Τύποι απωλειών Υπάρχουν τρεις τρόποι με τους οποίους μπορεί να υπάρξει απώλεια ενέργειας πριν αυτή φτάσει στο φορτίο, όταν εφαρμοστεί σε μια γραμμή μεταφοράς, αυτοί είναι : ακτινοβολία, θέρμανση αγωγού και θέρμανση διηλεκτρικού.

Υπάρχουν απώλειες λόγω ακτινοβολίας καθώς η γραμμή μεταφοράς μπορεί να συμπεριφέρεται σαν μια κεραία αν η απόσταση των αγωγών είναι κατά εκτίμηση ένα κλάσμα του μήκους κύματος. Αυτό αναφέρεται στην ενότητα 9-1.1 και εμφανίζεται περισσότερο στις παράλληλες γραμμές παρά στις ομοαξονικές γραμμές. Οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας είναι δύσκολο να εκτιμηθούν και κανονικά μετρούνται αντί να υπολογίζονται. Αυξάνονται με την συχνότητα για οποιαδήποτε γραμμή μεταφοράς και τελικά τερματίζουν την χρησιμότητα της γραμμής για κάποια υψηλή συχνότητα.

Η θέρμανση αγωγού ή απώλεια I^2R, είναι ανάλογη του ρεύματος και επομένως αντιστρόφως ανάλογη με την χαρακτηριστική αντίσταση. Επίσης

αυξάνεται με την συχνότητα λόγω του επιδερμικού φαινομένου. Η θέρμανση διηλεκτρικού είναι ανάλογη της τάσης που υπάρχει στο διηλεκτρικό και επομένως αντιστρόφως ανάλογη της χαρακτηριστικής αντίστασης για κάθε μεταδιδόμενη ισχύς. Αυξάνεται με την συχνότητα (για στερεές διηλεκτρικές γραμμές) γιατί βαθμιαία χειροτερεύουν οι ιδιότητες με την αύξηση της συχνότητας για οποιοδήποτε διηλεκτρικό μέσο. Ωστόσο για τον αέρα, η θέρμανση διηλεκτρικού παραμένει αμελητέα. Καθώς οι δυο τελευταίες απώλειες είναι ανάλογες του μήκους, συνήθως συνδυάζονται και δίνονται από τους κατασκευαστές σε διαγράμματα εκφρασμένα σε decibels ανά 100 μέτρα. Πρακτικά για ομοαξονικές γραμμές στο 1GHz, αυτές οι απώλειες ποικίλουν έως το πολύ 200 dB/100 m για στερεό διηλεκτρικό, εύκαμπτη γραμμή 6-mm, και τουλάχιστον 0.94 dB/100 m για άκαμπτη, με διηλεκτρικό τον αέρα γραμμή 127-mm.

Παράγοντας ταχύτητας Η ταχύτητα του φωτός και όλων των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εξαρτάται από το μέσο που μεταδίδονται. Είναι πολύ κοντά στα 3 x 10^8 m/s στο κενό και μικρότερη σε όλα τα άλλα μέσα. Η ταχύτητα του φωτός σε ένα μέσο δίνεται ως :

$$v = \frac{v_c}{\sqrt{k}} \qquad \textbf{(7-6)}$$

όπου v = ταχύτητα στο μέσο
v_c = ταχύτητα του φωτός στο κενό
k = διηλεκτρική σταθερά του μέσου (1 για το κενό και κοντά στο 1 για τον αέρα)

Ο *παράγοντας ταχύτητας* για μια διηλεκτρική ουσία, και επομένως για ένα καλώδιο, είναι ο λόγος μείωσης της ταχύτητας και έτσι δίνεται ως :

$$v_f = \frac{1}{\sqrt{k}} \qquad \textbf{(7-7)}$$

Οι διηλεκτρικές σταθερές των υλικών που χρησιμοποιούνται συνήθως στις γραμμές μεταφοράς ποικίλουν από 1.2 έως 2.8, για παράγοντες ταχύτητας από 0.9 έως 0.6. Επίσης, επειδή $v = f\lambda$ και f είναι σταθερά, το μήκος κύματος λ μειώνεται και αυτό με έναν λόγο που ισούται με τον παράγοντα ταχύτητας. Αυτό όπως θα δούμε είναι πολύ σημαντικό για τους υπολογισμούς σε *stub*.

7-1.4 Στάσιμα Κύματα

Αν μια γραμμή μεταφοράς δεν έχει απώλειες και είναι άπειρου μήκους ή τερματίζεται στην χαρακτηριστική της αντίσταση, όλη η ισχύς που εφαρμόζεται στην γραμμή από μια γεννήτρια στην μια άκρη απορροφάται από το φορτίο στην άλλη άκρη. Αντίστροφα, αν ένα πεπερασμένο τμήμα γραμμής τερματίζεται σε αντίσταση που δεν ισούται με την χαρακτηριστική αντίσταση, μπορεί να εκτιμηθεί ότι τμήμα της ισχύος που εφαρμόζεται (αλλά όχι όλη) θα απορροφηθεί από το σημείο τερματισμού. Η υπόλοιπη ισχύς θα *ανακλαστεί*.

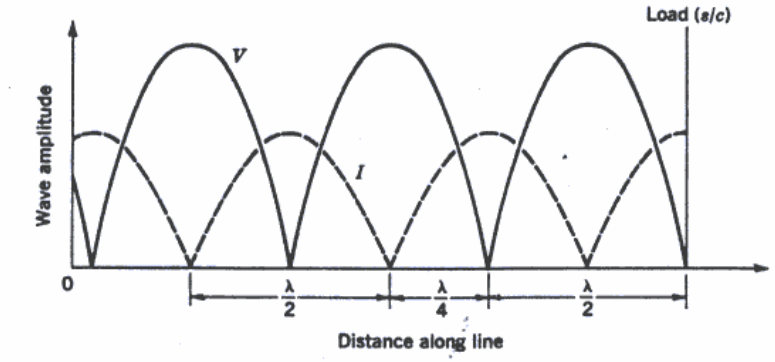
Ανακλάσεις από μη τέλειο τερματισμό Όταν μια γραμμή μεταφοράς δεν τελειώνει σωστά, η ισχύς που δεν απορροφάται από το φορτίο στέλνεται πίσω προς την

γεννήτρια, οπότε προφανώς δεν υπάρχει αποδοτικότητα. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά ανάμεσα στην αντίσταση του φορτίου και στην χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής, τόσο μεγαλύτερη είναι η μη αποδοτικότητα.

Μια γραμμή που τερματίζεται στην χαρακτηριστική της αντίσταση λέγεται *μη συντονισμένη (nonresonant)* ή *επίπεδη (flat)* γραμμή. Η τάση και το ρεύμα σε μια τέτοια γραμμή είναι σταθερές σε όλο το μήκος της, αν στην γραμμή δεν υπάρχουν απώλειες, ή μειώνονται εκθετικά (όσο προσεγγίζεται το φορτίο), αν η γραμμή έχει απώλειες. Όταν μια γραμμή τερματίζεται σε ένα βραχυκύκλωμα ή σε ένα ανοικτό κύκλωμα, δεν θα υπάρχει καθόλου απώλεια της ισχύος και όλη θα ανακλαστεί πίσω στην γεννήτρια. Αν στη γραμμή δεν υπάρχουν απώλειες, πρέπει να είναι δυνατό να σταλεί ένα κύμα και μετά γρήγορα να αντικατασταθεί η γεννήτρια με ένα βραχυκύκλωμα. Η ισχύς στη γραμμή θα μετακινείται εμπρός και πίσω, χωρίς να ελαττώνεται ποτέ γιατί στην γραμμή δεν υπάρχουν απώλειες. Η γραμμή τότε λέγεται *συντονισμένη* λόγω της ομοιότητάς της με ένα συντονισμένο LC κύκλωμα, στο οποίο η ισχύς κινείται εμπρός και πίσω ανάμεσα στο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο. Αν η αντίσταση φορτίου έχει μια τιμή ανάμεσα σε 0 και Z_0 ή ανάμεσα σε Z_0 και ∞, εξακολουθούν να υπάρχουν ταλαντώσεις. Ωστόσο, αυτή τη φορά το πλάτος μειώνεται με το χρόνο πιο απότομα όσο η τιμή της αντίστασης φορτίου πλησιάζει το Z_0.

Στάσιμα κύματα Όταν εφαρμόζεται ισχύς σε μια γραμμή μεταφοράς από μια γεννήτρια, εμφανίζεται τάση και ρεύμα που οι τιμές τους εξαρτώνται από την χαρακτηριστική αντίσταση και την ισχύ. Τα κύματα τάσης και ρεύματος κινούνται προς το φορτίο με ταχύτητα λίγο μικρότερη από v_c, ανάλογα με τον παράγοντα ταχύτητας. Αν $Z_L = Z_0$, το φορτίο απορροφά όλη την ισχύ και δεν γίνεται καμία ανάκλαση. Τότε τα μόνα κύματα που υπάρχουν είναι της τάσης και του ρεύματος που κινούνται από τη γεννήτρια στο φορτίο.

Αν το Z_L δεν ισούται με το Z_0, ένα μέρος της ισχύος απορροφάται και το υπόλοιπο ανακλάται. Έτσι έχουμε ένα σύνολο από κύματα, V και I, που κινούνται προς το φορτίο και το ανακλώμενο σύνολο που κινείται πίσω στη γεννήτρια. Αυτά τα δυο σύνολα των κινούμενων κυμάτων, τα οποία κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις, δημιουργούν έναν τύπο παρεμβολής που είναι γνωστός ως *στάσιμα κύματα (standing waves)*, δηλαδή παλμοί κατά μήκος της γραμμής. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 7-6 για μια γραμμή βραχυκυκλώματος. Προκύπτει ότι εμφανίζονται σταθερή τάση και ρεύμα καθώς και ελάχιστα (κόμβοι) και μέγιστα (αντι-κόμβοι) ρεύματος. Χωρίζονται με το μισό του μήκους κύματος του σήματος, όπως θα εξηγηθεί. Σημειώνουμε ότι οι κόμβοι τάσης και οι αντι-κόμβοι ρεύματος συμπίπτουν πάνω στη γραμμή, όπως και οι κόμβοι ρεύματος και οι αντι-κόμβοι τάσης.



Σχήμα 7-6 Γραμμή χωρίς απώλειες που τερματίζεται σε βραχυκύκλωμα

Προς το παρόν θεωρούμε μόνο τα προς τα εμπρός κινούμενα κύματα τάσης και ρεύματος. Στο φορτίο, η τάση θα είναι μηδενική και το ρεύμα μέγιστο επειδή το φορτίο είναι ένα βραχυκύκλωμα. Σημειώνουμε ότι το ρεύμα έχει πεπερασμένη τιμή καθώς η γραμμή έχει αντίσταση. Σε αυτό το σημείο, οι ίδιες συνθήκες εφαρμόζονται επίσης σε ένα σημείο που είναι ακριβώς ένα μήκος κύματος στην πλευρά της γεννήτριας του φορτίου κ.ο.κ Το ρεύμα στο φορτίο είναι πάντα μέγιστο παρόλο που το μέγεθος αυτού του μεγίστου ποικίλει κυκλικά με τον χρόνο, καθώς το κύμα που εφαρμόζεται είναι ημιτονοειδές.

Η ανάκλαση που πραγματοποιείται στο βραχυκύκλωμα επηρεάζει τόσο την τάση όσο και το ρεύμα. Το ρεύμα τώρα ξεκινά να κινείται πίσω στη γεννήτρια, χωρίς αλλαγή στη φάση, αλλά η τάση *ανακλάται με αναστροφή φάσης 180°* [2]. Σε ένα σημείο που είναι ακριβώς ένα τέταρτο του μήκους κύματος από το φορτίο, το ρεύμα είναι μόνιμα μηδενικό (όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-6). Αυτό γίνεται επειδή τα προς τα εμπρός και τα ανακλασμένα κύματα ρεύματος είναι ακριβώς 180° εκτός της φάσης τους, καθώς το ανακλασμένο κύμα έπρεπε να διανύσει μια απόσταση $\lambda/4 + \lambda/4 = \lambda/2$ μεγαλύτερη σε σχέση με το προς τα εμπρός κύμα. Άρα αυτά τα δυο αναιρούνται και δημιουργείται ένας κόμβος ρεύματος. Το κύμα τάσης έπρεπε επίσης να διανύσει επιπλέον απόσταση $\lambda/2$, αλλά καθώς υποβλήθηκε αναστροφή φάσης 180° στην ανάκλαση, η συνολική αλλαγή της φάσης της είναι 360°. Έτσι θα γίνει ενίσχυση, με αποτέλεσμα να εμφανιστεί αντι-κόμβος τάσης σχεδόν στο ίδιο σημείο με τον κόμβο του ρεύματος.

Σε ένα σημείο που απέχει το μισό του μήκους κύματος από το φορτίο θα υπάρχει μηδενική τάση και μέγιστο ρεύμα. Αυτό προκύπτει γιατί τα προς τα εμπρός και τα αντίστροφα κύματα ρεύματος είναι σε φάση (το ρεύμα έπρεπε να διανύσει συνολική απόσταση ενός μήκους κύματος για να επιστρέψει σε αυτό το σημείο). Ταυτόχρονα, τα κύματα τάσης θα αναιρεθούν γιατί πρέπει να προστεθεί στην επιπλέον απόσταση που πρέπει να διανύσει το ανακλώμενο κύμα, αναστροφή φάσης 180° στην ανάκλαση. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7-6 όλες αυτές οι συνθήκες επαναλαμβάνονται σε αποστάσεις μισού μήκους κύματος. Κάθε φορά που λαμβάνεται ένα σημείο αυτό είναι $\lambda/2$ πιο μακριά από το φορτίο σε σχέση με ένα προηγούμενο σημείο και το ανακλώμενο κύμα έπρεπε να διανύσει μια μεγαλύτερη απόσταση κατά ένα μήκος κύματος. Επομένως, έχει την ίδια σχέση με το προς τα εμπρός κύμα όπως είχε στο αρχικό σημείο.

Τονίζεται ότι αυτή η κατάσταση είναι μόνιμη για οποιοδήποτε φορτίο και προσδιορίζεται από αυτό. Τα κύματα αυτά είναι *στάσιμα κύματα*. Όλοι οι κόμβοι ορίζονται μόνιμα ως ελάχιστα και όλοι οι αντι-κόμβοι ως μέγιστα, τον οποίων οι θέσεις είναι σταθερές (αλλά έχουν πλάτη που ποικίλουν ημιτονοειδώς, ακριβώς όπως το σήμα που εφαρμόζεται). Οι περισσότερες από αυτές τις συνθήκες εφαρμόζονται όταν υπάρχει ανοικτό κύκλωμα, εκτός ότι το πρώτο ελάχιστο του ρεύματος (και το μέγιστο της τάσης) είναι τώρα στο φορτίο, αντί για απόσταση ένα τέταρτο μήκους κύματος μακριά από αυτό. Καθώς το φορτίο καθορίζει τη θέση του πρώτου κόμβου ρεύματος, ο τύπος του φορτίου μπορεί να προκύψει από αυτή τη θέση.

Λόγος στάσιμου κύματος (Standing-wave ratio - SWR) *Ο λόγος του μέγιστου ρεύματος προς το ελάχιστο ρεύμα σε μια γραμμή μεταφοράς λέγεται λόγος στάσιμου κύματος, καθώς είναι ο λόγος της μέγιστης προς ελάχιστης ισχύς, που ισούται με τον λόγο ρεύματος*. Το SWR είναι μέτρο κακής προσαρμογής ανάμεσα στο φορτίο και τη γραμμή, και είναι η πρώτη και πιο σημαντική ποσότητα που υπολογίζεται για ένα συγκεκριμένο φορτίο. Το SWR ισούται με τη μονάδα (μια αρκετά επιθυμητή

κατάσταση) όταν το φορτίο ταιριάζει τέλεια. Όταν η γραμμή τερματίζει σε εντελώς ωμικό φορτίο, ο λόγος στάσιμου κύματος είναι :

$$SWR = \frac{Z_0}{R_L} \qquad \text{ή} \qquad SWR = \frac{R_L}{Z_0} \qquad (\text{ανάλογα πιο είναι μεγαλύτερο}) \qquad \textbf{(7-8)}$$

όπου R_L είναι το ωμικό φορτίο.

Συνήθως τοποθετούμε την μεγαλύτερη ποσότητα στον αριθμητή του λόγου, ώστε ο λόγος να είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Αυτό δεν οδηγεί σε σύγχυση. Ανεξάρτητα από το αν το ωμικό φορτίο είναι το μισό ή το διπλάσιο της χαρακτηριστικής αντίστασης της γραμμής, ο λόγος της μέγιστης τάσης προς την ελάχιστη τάση είναι 2:1 και ο βαθμός κακής προσαρμογής είναι ο ίδιος και στις δυο περιπτώσεις.

Αν το φορτίο είναι πολύ αντιδραστικό, το SWR θα είναι άπειρο. Το ίδιο ισχύει και για τερματισμό βραχυκυκλώματος ή ανοικτού κυκλώματος. Καθώς και στις τρεις περιπτώσεις δεν υπάρχει απορρόφηση ισχύος, το ανακλασμένο κύμα έχει το ίδιο μέγεθος με το προς τα εμπρός κύμα. Σε κάποιο σημείο πάνω στη γραμμή θα γίνει ολοκληρωτική εξουδετέρωση, δίνοντας τάση μηδενική και έτσι το SWR πρέπει να είναι άπειρο. Όταν το φορτίο είναι μιγαδικό, το SWR μπορεί να υπολογιστεί αλλά είναι πολύ πιο εύκολο να προσδιοριστεί από μια διάταξη υπολογισμού γραμμής μεταφοράς ή να μετρηθεί.

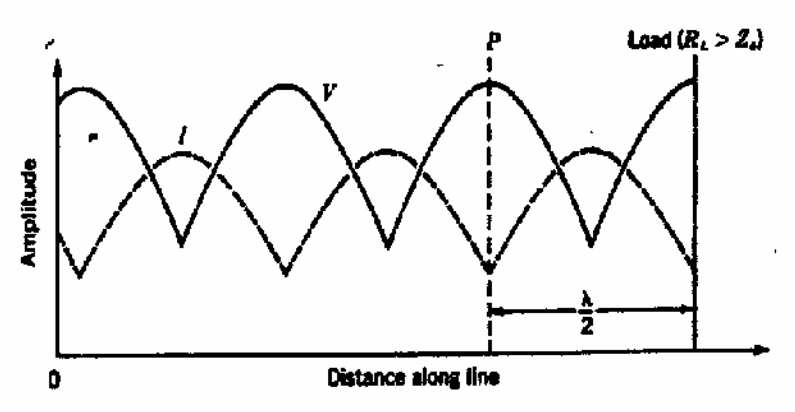
Όσο πιο μεγάλο είναι το SWR, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της κακής προσαρμογής ανάμεσα στη γραμμή και το φορτίο ή στην περίπτωση αυτή ανάμεσα στη γεννήτρια και στη γραμμή. Σε πραγματικές γραμμές, η απώλεια ισχύος αυξάνεται με το SWR, και έτσι αναζητούμε μικρή τιμή για τον λόγο στάσιμου κύματος εκτός αν η γραμμή μεταφοράς χρησιμοποιείται σαν μη ωμική αντίσταση ή σαν συντονισμένο κύκλωμα. Αυτό θα παρουσιαστεί στην ενότητα 7-1.5.

Κανονικοποίηση αντίστασης Είναι σύνηθες να κανονικοποιείται η αντίσταση σε σχέση με την γραμμή με την οποία συνδέεται, δηλαδή να διαιρείται η αντίσταση με την χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής, ως εξής :

$$z_L = \frac{Z_L}{Z_0} \qquad \textbf{(7-9)}$$

και έτσι προκύπτει η κανονικοποιημένη αντίσταση. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο γιατί η συμπεριφορά της γραμμής εξαρτάται όχι από την απόλυτη τιμή της αντίστασης φορτίου αλλά από την τιμή του σε σχέση με το Z_0. Αυτό μπορούμε να το δούμε από τη σχέση 7-8. Το SWR σε μια γραμμή θα είναι 2, ανεξάρτητα από το αν είτε Z_0=75 Ω και R_L=150 Ω ή Z_0=300 Ω και R_L=600 Ω. Επιπλέον, η κανονικοποίηση της αντίστασης δίνει δυνατότητες για διαγράμματα γραμμών μεταφοράς. Άρα, ως προς αυτό το στοιχείο είναι παρόμοια με την διαδικασία που χρησιμοποιείται για να παραχθούν οι γενικές καμπύλες απόκρισης για συντονισμένα κυκλώματα και RC-coupled ενισχυτές.

Έστω μια αντίσταση που συνδέεται σε γραμμή μεταφοράς, ώστε $R_L \neq Z_0$. Καθώς η τάση και το ρεύμα αλλάζουν κατά μήκος της γραμμής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-7, το ίδιο θα γίνεται και με την αντίσταση ή την εμπέδηση. Ωστόσο, οι συνθήκες επαναλαμβάνονται κάθε μισό μήκος κύματος. Έτσι η εμπέδηση στο σημείο P θα ισούται με αυτή του φορτίου, αν το σημείο P απέχει μισό μήκος κύματος από το φορτίο και στην γραμμή δεν υπάρχουν απώλειες.



Σχήμα 7-7 Γραμμή χωρίς απώλειες που τερματίζεται με αντίσταση μεγαλύτερη από Z_0 (το SWR της τάσης ισούται με το SWR του ρεύματος)

7-1.5 Γραμμές τετάρτου και μισού μήκους κύματος

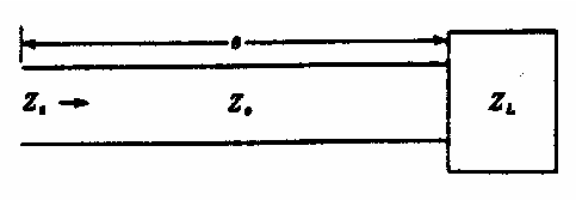
Τμήματα των γραμμών μεταφοράς που το μήκος τους είναι ακριβώς ένα τέταρτο του μήκους κύματος ή το μισό του μήκους κύματος έχουν σημαντικές ιδιότητες μετασχηματισμού εμπέδησης και συχνά χρησιμοποιούνται για αυτό τον σκοπό σε ραδιοσυχνότητες. Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε γραμμές αυτού του είδους.

Αντιστροφή εμπέδησης από γραμμές ενός τέταρτου μήκους κύματος Έστω το Σχήμα 7-8, στο οποίο φαίνεται ένα φορτίο αντίστασης Z_L που συνδέεται με ένα τμήμα γραμμής μεταφοράς μήκους s που έχει χαρακτηριστική εμπέδηση Z_0. Όταν το μήκος s είναι ακριβώς ένα τέταρτο του μήκους κύματος (ή περιττός αριθμός του τετάρτου μήκους κύματος) και στην γραμμή δεν υπάρχουν απώλειες, τότε η εμπέδηση Z_s, όταν κοιτάζουμε προς το φορτίο είναι :

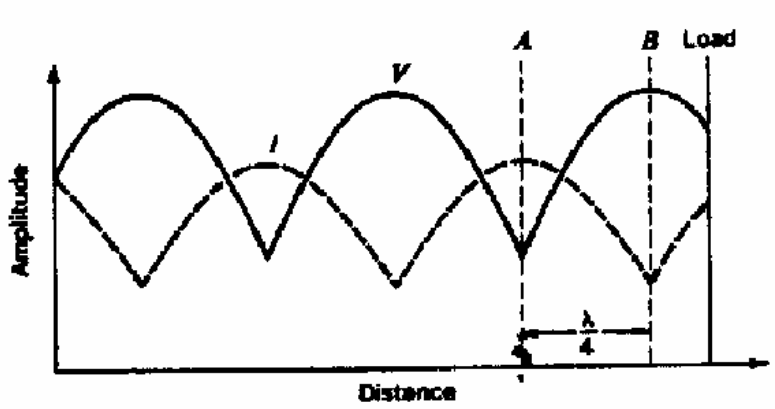
$$Z_s = \frac{Z_0^2}{Z_L} \qquad \textbf{(7-10)}$$

Η εξίσωση 7-10 παριστάνει μια πολύ σημαντική και θεμελιώδη σχέση, την οποία είναι πολύ δύσκολο να παράγουμε εδώ, αλλά που η ορθότητά της μπορεί να αποδειχτεί στη συνέχεια. Εκτός αν το φορτίο είναι ωμικό και ισούται με την χαρακτηριστική εμπέδηση της γραμμής με την οποία συνδέεται, δημιουργούνται στάσιμα κύματα τάσης και ρεύματος κατά μήκος της γραμμής, με ρυθμό επανάληψης κόμβου (και αντι-κόμβου) ίσο με λ/2. Αυτό έχει ήδη αποδειχτεί και παρουσιάζεται στο Σχήμα 7-9. Σημειώνουμε ότι εδώ τα ελάχιστα του ρεύματος και της τάσης δεν είναι μηδενικά, το φορτίο δεν είναι βραχυκύκλωμα και επομένως ο λόγος στάσιμου κύματος δεν είναι άπειρος. Σημειώνουμε ακόμα ότι οι κόμβοι ρεύματος διαχωρίζονται από τους κόμβους τάσης με απόσταση λ/4, όπως και προηγούμενα.

Είναι προφανές ότι στο σημείο Α (κόμβος τάσης, αντι-κόμβος ρεύματος) η εμπέδηση της γραμμής είναι χαμηλή και στο σημείο Β (αντι-κόμβος τάσης, κόμβος ρεύματος) γίνεται το αντίθετο, δηλαδή είναι υψηλή. Για να αλλάξουμε την εμπέδηση στο Α, θα ήταν απαραίτητο να αλλάξουμε το SWR στην γραμμή. Αν τα SWR αυξάνονταν, το ελάχιστο της τάσης στο Α θα ήταν μικρότερο και το ίδιο θα γινόταν και με την εμπέδηση στο Α.



Σχήμα 7-8 Γραμμή με φορτίο



Σχήμα 7-9 Στάσιμα κύματα κατά μήκος γραμμής μεταφοράς κακής προσαρμογής; Αντιστροφή στην αντίσταση

Όμοια, το μέγεθος της μέγιστης τάσης στο Β θα αυξάνονταν και το ίδιο θα γινόταν και με την εμπέδηση στο Β. Επομένως η αύξηση στο Z_B συνοδεύεται με μείωση στο Z_A (αν τα Α και Β απέχουν λ/4). Συνολικά μπορούμε να πούμε ότι η εμπέδηση στο Α είναι αντιστρόφως ανάλογη με την εμπέδηση στο Β. Η εξίσωση 7-10 παρουσιάζει τη σχέση αυτή μαθηματικώς και επίσης παρέχει την σταθερά αναλογικότητας, που είναι το τετράγωνο της χαρακτηριστικής εμπέδησης της γραμμής μεταφοράς. Η σχέση αυτή ισχύει το ίδιο καλά και όταν τα δύο σημεία δεν είναι κόμβοι και αντι-κόμβοι ρεύματος και από το Σχήμα 7-9 προκύπτει ότι επίσης εφαρμόζεται όταν η απόσταση που χωρίζει τα σημεία είναι τρία, τέσσερα, εφτά κ.ο.κ τέταρτα του μήκους κύματος.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα ιδιότητα της γραμμής τετάρτου-κύματος προκύπτει αν στη σχέση 7-10 κανονικοποιήσουμε τις σύνθετες αντιστάσεις ως προς Z_0. Διαιρώντας και τα δυο μέρη με Z_0 έχουμε :

$$\frac{Z_s}{Z_L} = \frac{Z_0}{Z_L} \qquad \textbf{(7-11)}$$

αλλά $\frac{Z_s}{Z_L} = z_s$ και $\frac{Z_L}{Z_0} = z_L$

άρα $\frac{Z_0}{Z_L} = \frac{1}{z_L}$

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω αποτελέσματα στη σχέση 7-11 προκύπτει :

$$z_s = \frac{1}{z_L} = y_L \qquad \textbf{(7-12)}$$

όπου y_L είναι η κανονικοποιημένη είσοδος του φορτίου.

Η σχέση 7-12 είναι πολύ σημαντική. Εκφράζει ότι αν συνδεθεί μια γραμμή τετάρτου μήκους κύματος με μια εμπέδηση, τότε η κανονικοποιημένη εμπέδηση εισόδου αυτής της γραμμής ισούται με την κανονικοποιημένη είσοδο φορτίου. Και οι δύο πρέπει να κανονικοποιηθούν σε σχέση με τη γραμμή. Σημειώνουμε ότι εδώ δεν υπάρχει καμία αντίφαση καθώς όλες οι κανονικοποιημένες ποσότητες είναι αδιάστατες. Επίσης, αυτή η σχέση είναι ανεξάρτητη από την χαρακτηριστική εμπέδηση της γραμμής, μια ιδιότητα πολύ σημαντική στην πράξη.

Μετασχηματιστής τετάρτου-κύματος και προσαρμογή αντίστασης Σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές γραμμών μεταφοράς, απαιτείται το φορτίο να ισοδυναμεί (σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό) με την γραμμή. Σαν γενικός κανόνας, αυτό περιλαμβάνει τον συντονισμό πέρα από την ανεπιθύμητη αντίσταση φορτίου (αν υπάρχει) και τον μετασχηματισμό της εμπέδησης που προκύπτει στην τιμή που απαιτείται. Οι συνηθισμένοι μετασχηματιστές RF μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι το μέσο του εύρους VHF. Ωστόσο, αυτή η συμπεριφορά δεν είναι πολύ καλή για συχνότητες πολύ μεγαλύτερες από αυτή, λόγω του ότι υπάρχει υπερβολική αυτεπαγωγή διαρροής και χωρητικότητα διασποράς. Η γραμμή τέταρτου-κύματος παρέχει μοναδικές δυνατότητες για μετασχηματισμό εμπέδησης μέχρι τις υψηλότερες συχνότητες, και είναι συμβατή με τις γραμμές μεταφοράς.

Από τη σχέση 7-10 φαίνεται ότι η εμπέδηση στην είσοδο μιας τετάρτου κύματος γραμμής εξαρτάται από δυο ποσότητες: αυτές είναι η εμπέδηση φορτίου (η οποία είναι σταθερή για οποιοδήποτε φορτίο σε μια σταθερή συχνότητα) και η χαρακτηριστική εμπέδηση της γραμμής μεταφοράς διασύνδεσης. Αν αυτό το Z_0 μπορεί να μεταβάλλεται, η εμπέδηση που βλέπουμε στην είσοδο στον λ/4 μετασχηματιστή θα μεταβάλλεται αντίστοιχα και το φορτίο θα είναι ισοδύναμο με την χαρακτηριστική εμπέδηση της κύριας γραμμής. Αυτό ισοδυναμεί με την αλλαγή της σειράς του λόγου του μετασχηματιστή για να προκύψει μια συγκεκριμένη τιμή στην αντίσταση εισόδου για οποιαδήποτε αντίσταση φορτίου. Το παράδειγμα που ακολουθεί παρουσιάζει την διαδικασία.

Παράδειγμα 7-4 Θέλουμε να εφαρμόσουμε φορτίο 200-Ω σε γραμμή μεταφοράς 300-Ω, για να μειώσουμε το SWR στην γραμμή κατά 1. Ποια πρέπει να είναι η χαρακτηριστική αντίσταση του μετασχηματιστή τετάρτου κύματος για αυτή την περίπτωση , αν συνδέεται άμεσα στο φορτίο;

Καθώς θέλουμε να ικανοποιείται η συνθήκη SWR=1 κατά μήκος της γραμμής, η αντίσταση Z_s στην είσοδο του λ/4 μετασχηματιστή πρέπει να ισούται με την χαρακτηριστική αντίσταση Z_0 της κύριας γραμμής. Έστω Z_o' η χαρακτηριστική αντίσταση του μετασχηματιστή, τότε από τη σχέση (7-10) έχουμε:

$$Z_s = \frac{Z'^2_0}{Z_L} = Z_0 \quad \text{(για την κύρια γραμμή)}$$
$$Z'_0 = \sqrt{Z_0 Z_L} = \sqrt{200 \times 300} = 245\Omega \qquad \textbf{(7-13)}$$

Η σχέση (7-13) προέκυψε για την συγκεκριμένη άσκηση αλλά είναι γενική για εφαρμογές και είναι πολύ σημαντική.

Πρέπει να γίνει κατανοητό ότι ο μετασχηματιστής τετάρτου κύματος έχει μήκος λ/4 μόνο σε μια συχνότητα. Επομένως είναι αρκετά ανεξάρτητος της συχνότητας και σε αυτό το σημείο είναι αρκετά παρόμοιος με ένα συντονισμένο high-Q κύκλωμα. Η διαφορά ανάμεσα στον μετασχηματιστή γραμμής μεταφοράς και έναν συνηθισμένο συντονισμένο μετασχηματιστή έχει σχέση με την κατασκευή τους , ενώ η πρακτική τους συμπεριφορά είναι ίδια. Αυτή η ιδιότητα κάνει τον μετασχηματιστή τετάρτου κύματος χρήσιμο σαν φίλτρο, ώστε να μην φτάνουν ανεπιθύμητες συχνότητες στο φορτίο, συχνά την κεραία. Αντίθετα, αν απαιτείται εφαρμογή αντίστασης ευρείας ζώνης, ο μετασχηματιστής πρέπει να κατασκευαστεί από καλώδιο υψηλής αντίστασης για να μειωθεί το Q , αυξάνοντας έτσι το εύρος ζώνης.

Πρέπει επίσης να αναφέρουμε πως όλη η διαδικασία γίνεται κάπως πιο πολύπλοκη αν το φορτίο είναι μιγαδικό, αντί για ωμικό όπως έχει θεωρηθεί ως τώρα. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά ο μετασχηματιστής τετάρτου κύματος αλλά τώρα πρέπει να συνδεθεί σε μια προϋπολογισμένη απόσταση από το φορτίο. Γενικά συνδέεται με το κοντινότερο ωμικό σημείο στο φορτίο, του οποίου η θέση μπορεί να βρεθεί με μια διάταξη υπολογισμού γραμμής μεταφοράς, όπως είναι το γράφημα Smith.

Γραμμή μισού-μήκους κύματος Έχουμε ήδη δει πως οι κόμβοι και αντι-κόμβοι ρεύματος και τάσης επαναλαμβάνονται κάθε μισό μήκος κύματος κατά μήκος μιας mismatched γραμμής μεταφοράς. Επομένως, ένας μετασχηματιστής μισού μήκους κύματος έχει την ιδιότητα ότι η αντίσταση εισόδου του ισούται με την αντίσταση του φορτίου που τοποθετείται στο τέλος της γραμμής μισού κύματος. Αυτή η ιδιότητα είναι ανεξάρτητη από την χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής, αλλά εξαρτάται από την συχνότητα.

Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα από αυτή την ιδιότητα. Για παράδειγμα, συχνά δεν είναι πρακτικό να γίνεται άμεση μέτρηση της αντίστασης του φορτίου. Σε μια τέτοια περίπτωση, η αντίσταση μπορεί να μετρηθεί κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς που συνδέεται στο φορτίο, σε απόσταση που είναι μισού μήκους κύματος (ή ολόκληρος αριθμός από μισά μήκη κύματος) από το φορτίο. Ξανά, μερικές φορές είναι απαραίτητο να γίνει η γραμμή μεταφοράς κλειστό κύκλωμα σε ένα σημείο στο οποίο δεν υπάρχει φυσική πρόσβαση. Θα προκύψουν τα ίδια αποτελέσματα αν τοποθετηθεί το κλειστό κύκλωμα κατά μισό μήκος κύματος μακριά από το φορτίο. Αν μια κλειστού κυκλώματος μισού μήκους κύματος γραμμή μεταφοράς συνδεθεί με την κύρια γραμμή, η δεύτερη θα γίνει στο σημείο αυτό βραχυκύκλωμα, αλλά μόνο στη συχνότητα που η παράλληλη γραμμή είναι μισού μήκους κύματος. Αυτή η συχνότητα δεν θα περάσει το σημείο αυτό, αλλά θα το περάσουν άλλες συχνότητες, ειδικά αν είναι πολύ απομακρυσμένες από την αρχική συχνότητα. Έτσι η κλειστού κυκλώματος παράλληλη μισού μήκους κύματος γραμμή μεταφοράς έχει γίνει ένα φίλτρο αποκοπής ζώνης. Τέλος, αν είναι γνωστή η συχνότητα του σήματος, μια κλειστού κυκλώματος γραμμή μεταφοράς μπορεί να συνδεθεί με την γεννήτρια αυτής της συχνότητας, και μπορεί να μετρηθεί με μεγάλη ακρίβεια το μισό του μήκους κύματος πάνω σε αυτή την γραμμή. Γνωρίζοντας την συχνότητα και το μήκος κύματος, μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα του κύματος πάνω στην γραμμή. Έτσι μπορεί να προσδιοριστεί ο παράγοντας της ταχύτητας και η διηλεκτρική σταθερά του μονωτικού.

7.1.6 Ιδιότητες αντίστασης των γραμμών μεταφοράς

Ακριβώς όπως ένα κατάλληλο τμήμα μιας γραμμής μεταφοράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μετασχηματιστής, έτσι και άλλες διατάξεις των γραμμών μεταφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν σειριακές ή παράλληλες επαγωγικές ή χωρητικές αντιστάσεις. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα ευχάριστο, τα κυκλώματα αυτά μπορούν να δουλέψουν σε πολύ υψηλές συχνότητες (αντίθετα με τα LC κυκλώματα) και επιπρόσθετα είναι συμβατά με τις γραμμές μεταφοράς.

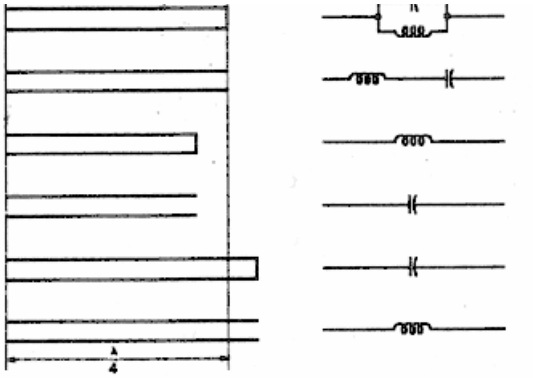
Γραμμές ανοικτού και κλειστού κυκλώματος ως συντονισμένα κυκλώματα Η σύνθετη αντίσταση εισόδου ενός τμήματος της γραμμής μεταφοράς μήκους λ/4 με βραχυκυκλωμένο το άλλο άκρο της είναι άπειρη και έτσι το κλειστό αυτό κύκλωμα συμπεριφέρεται ως ανοικτό. Ωστόσο, το παραπάνω συμβαίνει μόνο στην περίπτωση όπου το μήκος της γραμμής είναι ακριβώς ίσο με λ/4. Για τις γειτονικές συχνότητες, το μήκος της γραμμής θα είναι λίγο μεγαλύτερο ή μικρότερο από λ/4 και έτσι η σύνθετη αντίσταση της βραχυκυκλωμένης γραμμής δεν θα είναι άπειρη. Μάλιστα, όσο περισσότερο απομακρυνόμαστε στη συχνότητα από την αρχική συχνότητα (λ/4) τόσο η σύνθετη αντίσταση της γραμμής θα μειώνεται. Από αυτή την παρατήρηση, οδηγούμαστε στο ότι το τμήμα αυτό της γραμμής μεταφοράς είναι ένα κύκλωμα συντονισμού σε παράλληλη συνδεσμολογία ή τουλάχιστον ένα κύκλωμα το οποίο συμπεριφέρεται σύμφωνα με ένα τέτοιο κύκλωμα. Για το λόγο αυτό, ένα τέτοιο κύκλωμα χρησιμοποιείται συχνά στη ζώνη των UHF ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ως κύκλωμα δεξαμενής – ταλαντωτή.

Στην περίπτωση όπου η γραμμή έχει ανοικτό κύκλωμα στο άλλο άκρο, και έχει μήκος λ/4, με παρόμοιο συλλογισμό καταλήγουμε πως συμπεριφέρεται ως ένα LC κύκλωμα συντονισμού σε συνδεσμολογία σειράς. Παρόμοια, μια γραμμή μήκους λ/2 με βραχυκυκλωμένο το άλλο άκρο θα συμπεριφέρεται ως ένα κύκλωμα συντονισμού σε σειρά, σύμφωνα με τα όσα περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Τέτοιου είδους γραμμές με ανοικτό η βραχυκυκλωμένο το άλλο άκρο μπορούν έτσι να χρησιμοποιηθούν σε υψηλές συχνότητες στη θέση LC κυκλωμάτων. Στην πράξη, οι γραμμές με βραχυκυκλωμένο το άλλο άκρο προτιμούνται, ακριβώς επειδή οι γραμμές ανοικτού κυκλώματος τείνουν να εκπέμπουν το σήμα που μεταφέρουν.

Ιδιότητες γραμμών για διάφορα μήκη Επαναλαμβάνοντας τα όσα περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο, ένα τμήμα μιας γραμμής μεταφοράς μήκους λ/4 με βραχυκυκλωμένο το άλλο άκρο (ή ισοδύναμα ένα τμήμα μιας γραμμής μεταφοράς με μήκος λ/2 και ανοικτό-κυκλωμένο το άλλο άκρο) συμπεριφέρεται *ακριβώς* όπως ένα κύκλωμα συντονισμού σε παράλληλη σύνδεση. Έτσι, αν η συχνότητα λειτουργίας μειωθεί, η επαγωγική αντίσταση του κυκλώματος μειώνεται και η χωρητική αντίσταση του αυξάνεται. Στην περίπτωση αυτή, το ρεύμα το οποίο διαρρέει το κύκλωμα είναι κατά κύριο λόγο επαγωγικό και έτσι η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος είναι μόνο επαγωγική. Η μείωση της συχνότητας λειτουργίας θα απαιτούσε μια μακρύτερη γραμμή μεταφοράς, αφού το μήκος κύματος θα αυξανόταν. Άρα, η μείωση της συχνότητας λειτουργίας για μια γραμμή μεταφοράς δεδομένου μήκους, ισοδυναμεί με τη μείωση του μήκους της γραμμής μεταφοράς. Από αυτό το συλλογισμό συμπεραίνουμε πως οι γραμμές μεταφοράς με μικρότερο μήκος από λ/4, οι οποίες έχουν βραχυκυκλωμένο το άλλο άκρο τους, θα εμφανίζουν μόνο επαγωγική αντίσταση εισόδου. Παρόμοια, μια γραμμή μικρότερη από λ/4 με ανοικτό-κυκλωμένο το άλλο άκρο της θα εμφανίζει μόνο χωρητική αντίσταση εισόδου. Οι συνδυασμοί

μηκών και τερματιστών (ανοικτό ή βραχυκυκλωμένο άκρο) για τις γραμμές μεταφοράς, μαζί με τα ισοδύναμα κυκλώματα παρουσιάζονται στο σχήμα 7.10.

Stubs: Στην περίπτωση όπου μια γραμμή μεταφοράς οδηγεί ένα φορτίο Z_L, και απαιτείται *ταίριασμα* (matching) τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν μετασχηματιστή ενός τετάρτου του μήκους κύματος στην περίπτωση όπου το φορτίο Z_L είναι Ωμικό. Στην περίπτωση όπου η αντίσταση του φορτίου είναι μιγαδική (σύνθετη αντίσταση), ένας από τους τρόπους με τους οποίους μπορούμε να επιτύχουμε το ταίριασμα με τη γραμμή μεταφοράς είναι να προσαρμόσουμε την αντίσταση με ένα πηνίο ή έναν πυκνωτή και στη συνέχεια να χρησιμοποιήσουμε τον μετασχηματιστή ενός τετάρτου του μήκους κύματος. Οι βραχυκυκλωμένες γραμμές μεταφοράς χρησιμοποιούνται συχνότερα στις πολύ υψηλές συχνότητες σε σχέση με συσσωρευτικά στοιχεία. Μια τέτοια γραμμή μεταφοράς ονομάζεται stub. Η διαδικασία ταιριάσματος που ακολουθείται στην περίπτωση αυτή είναι η ακόλουθη:



Σχήμα 7-10 μέρη γραμμών μεταφοράς και τα LC ισοδύναμα

1. Υπολογισμός της σύνθετης αγωγιμότητας του φορτίου
2. Υπολογισμός της μαγνητικής επιδεκτικότητας του stub
3. Σύνδεση του stub στο φορτίο, η προκύπτουσα σύνθετη αγωγιμότητα θα είναι η αγωγιμότητα του φορτία G
4. Μετασχηματισμός της αγωγιμότητας σε αντίσταση και υπολογισμός της αντίστασης Z_0' του μετασχηματιστή ενός τετάρτου του μήκους κύματος όπως προηγουμένως.

Παράδειγμα 7.5 Ένα φορτίο σύνθετης αντίστασης 200+j75 Ω πρόκειται να ταιριαστεί με μια γραμμή μεταφοράς αντίστασης 300 Ω με σκοπό να πετύχουμε SWR=1 για τα στάσιμα κύματα. Υπολογίστε την αντίσταση του stub και την χαρακτηριστική αντίσταση του μετασχηματιστή ενός τετάρτου του μήκους κύματος όταν και οι δύο συνδέονται κατευθείαν στο φορτίο.

1. $Y_L = \frac{1}{Z_L} = \frac{1}{200+j75} = \frac{200-j75}{(200+j75)(200-j75)} = \frac{200-j75}{40000+5625} = (4.38-j1.64)\times 10^{-3}$

2. $B_{stub} = 1.64\times 10^{-3} S \qquad X_{stub} = \frac{-1}{1.64\times 10^{-3}} = -610\Omega$

3. Με συνδεμένο το stub,

$$Y_L = G_L = 4.38 \times 10^{-3} S$$

4. $R_L = \dfrac{1}{G_L} = \dfrac{1}{4.38 \times 10^{-3}} = 228\Omega$

και έτσι

$$Z_0' = \sqrt{Z_0 Z_L} = \sqrt{300 \times 228} = 262\Omega$$

Μεταβολή αντίστασης κατά μήκος μιας αταίριαστης γραμμής: Όταν ένα φορτίο μιγαδικής αντίστασης συνδέεται σε μια γραμμή μεταφοράς, στάσιμα κύματα εμφανίζονται ακόμα και όταν το μέγεθος της αντίστασης του φορτίου είναι ίσο με τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής. Αν θεωρήσουμε την κανονικοποιημένη αντίσταση του φορτίου ως z_L, τότε καθώς αναζητούμε την αντίσταση κατά μήκος της γραμμής, η z_L θα μετρηθεί λ/2 μακριά από το φορτίο και σε διαδοχικά διαστήματα μήκους λ/2 αν η γραμμή δεν παρουσιάζει απώλειες.

Όπως έχουμε ήδη δει, μια κανονικοποιημένη αντίσταση ίση με y_L θα μετρηθεί σε απόσταση λ/4 μακριά από το φορτίο (και σε διαδοχικά διαστήματα μήκους λ/2 από εκεί και μετά). Αν θεωρήσουμε z_L=r+jx, η κανονικοποιημένη αντίσταση μετρημένη σε απόσταση λ/4 ακόμα θα δίνεται από:

$$z_s = y_L = \frac{1}{r + jx} = \frac{r - jx}{r^2 + x^2} \qquad \textbf{(7-14)}$$

Η κανονικοποιημένη αντίσταση φορτίου ήταν επαγωγική, και ακόμα από την παραπάνω εξίσωση βλέπουμε πως σε απόσταση λ/4 από το φορτίο γίνεται χωρητική: είναι φανερό πως υπάρχει ένα ενδιάμεσο σημείο στο οποίο η μετρούμενη αντίσταση είναι καθαρά ωμική. Το σημείο αυτό δεν είναι απαραίτητα σε απόσταση λ/8 από το φορτίο, ωστόσο το σημαντικό είναι πως υπάρχει ένα τέτοιο σημείο. Η θέση του σημείου αυτού είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί χωρίς τη βοήθεια κάποιου διαγράμματος όπως το διάγραμμα Smith. Πολλοί υπολογισμοί που αφορούν γραμμές μεταφοράς γίνονται με χρήση διαγραμμάτων και πολύ περισσότερο αν εμπλέκονται γραμμές μεταφοράς με μιγαδικά φορτία.

7.2 ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ SMITH ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ

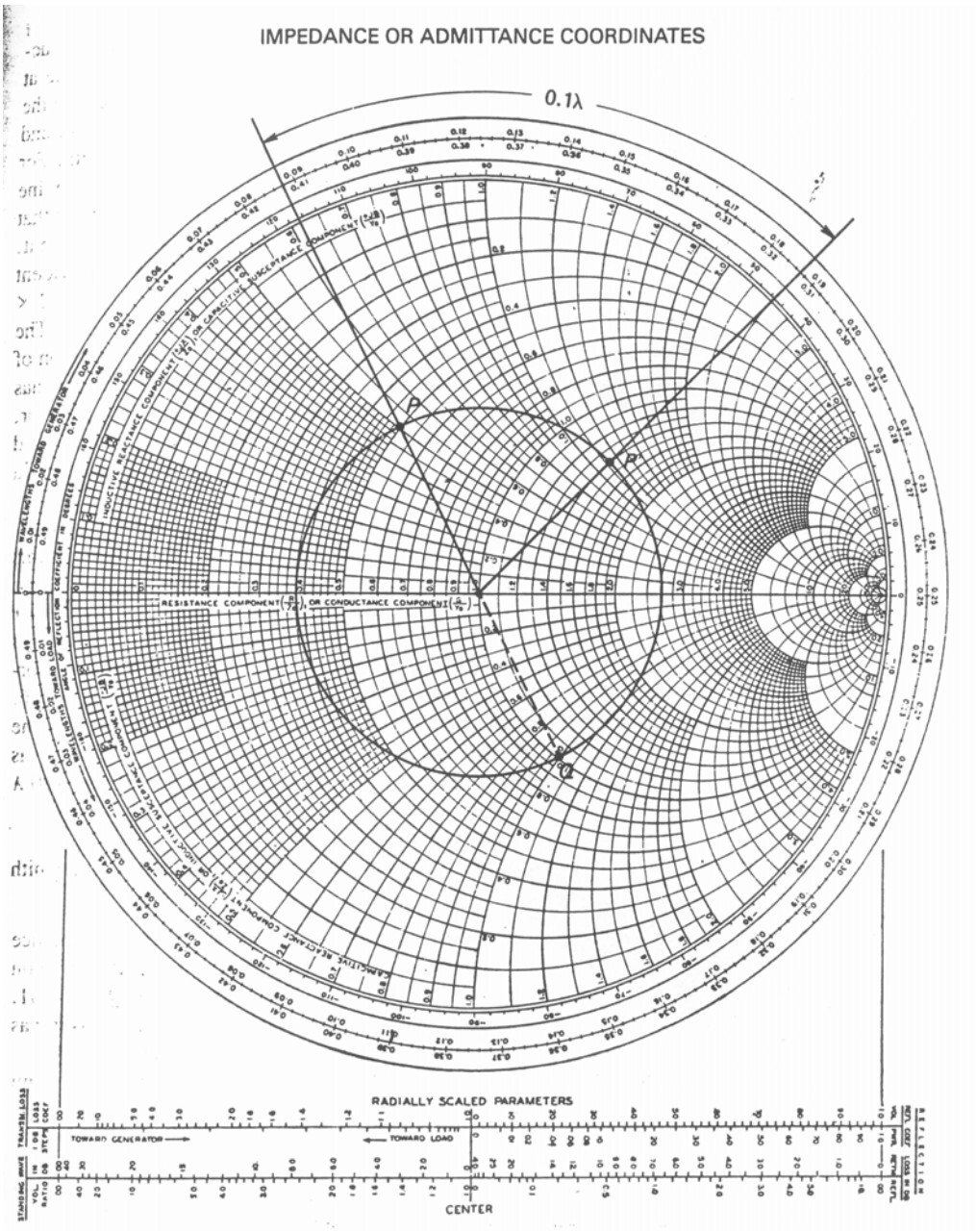
Οι διάφορες ιδιότητες των γραμμών μεταφοράς μπορούν να αναπαρασταθούν γραφικά σε οποιοδήποτε από ένα μεγάλο πλήθος διαγραμμάτων. Οι πλέον χρήσιμες αναπαραστάσεις είναι εκείνες οι οποίες δίνουν σχέσεις αντίστασης κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς για διαφορετικά φορτία. Το πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενο διάγραμμα για τέτοιου είδους υπολογισμούς είναι το διάγραμμα smith.

7.2.1 Αρχές του διαγράμματος Smith

Περιγραφή: Το πολικών συντεταγμένων διάγραμμα αντίστασης ή διάγραμμα Smith όπως είναι ευρύτερα γνωστό, παρουσιάζεται στο σχήμα 7.11. Αποτελείται από δυο σύνολα κύκλων, ή καλύτερα τόξων κύκλων, τα οποία είναι έτσι διατεταγμένα ώστε διάφορες σημαντικές ποσότητες σχετιζόμενες με μη-ταιριασμένες γραμμές μεταφοράς μπορούν να σχεδιαστούν και να υπολογιστούν σχετικά εύκολα. Οι ολόκληροι κύκλοι, τα κέντρα των οποίων ανήκουν στην μοναδική ευθεία γραμμή του διαγράμματος, αντιστοιχούν σε διάφορες τιμές της κανονικοποιημένης αντίστασης ($r=R/Z_0$) κατά μήκος της γραμμής. Τα τόξα των κύκλων, παραπλεύρως της ευθείας γραμμής του διαγράμματος, αντιστοιχούν σε διάφορες τιμές για την κανονικοποιημένη αντίσταση $jx=jX/Z_0$. Με μια προσεκτική ματιά στο διάγραμμα Smith 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 (σταθερό SWR) αντιστοιχούν σε έναν κύκλο τον οποίο σχεδιάζουμε πάνω στο διάγραμμα Smith με το κέντρο του στο κέντρο του διαγράμματος. Πιο σωστά, η παραπάνω πρόταση ισχύει μόνο για μη απωλεστικές γραμμές μεταφοράς. Στην αρκετά σπάνια περίπτωση μιας απωλεστικής RF γραμμής μεταφοράς, αντί για κύκλο θα πρέπει να σχεδιάσουμε ένα σπιράλ το οποίο θα πλησιάζει στο κέντρο του διαγράμματος με τη βοήθεια του κανόνα ο οποίος υπάρχει στο κάτω μέρος του διαγράμματος. Η διαδικασία αυτή είναι αρκετά περίπλοκη και δεν θα μας απασχολήσει στη συνέχεια.

Αν το φορτίο είναι καθαρά ωμικό, το R/Z_0 αποτελεί τόσο την κανονικοποιημένη αντίστασή του όσο και το standing wave ratio όπως δείχνει η εξίσωση (7.8). Έτσι, όταν ένας κύκλος έχει σχεδιαστεί στο διάγραμμα 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 διαγράμματος Smith. Η τιμή αυτή για το SWR θα είναι ίση με $r \pm j\,0$ στο σημείο αυτό. Το σημείο τομής στα αριστερά του διαγράμματος θα αντιστοιχεί στο σημείο $1/r$ και θα ήταν χρήσιμο μόνο αν είχε αποφασιστεί πάντα να χρησιμοποιούμε τιμές για το SWR μικρότερες από 1.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του διαγράμματος 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. Από μια λεπτομερή εξήγηση των αξόνων του διαγράμματος Smith θα φανεί πως έχει σχεδιαστεί για χρήση με κανονικοποιημένες σύνθετες αντιστάσεις και σύνθετες αγωγιμότητες. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το γεγονός αυτό μας επιτρέπει να μην χρειαζόμαστε διαφορετικά διαγράμματα Smith για οποιαδήποτε δυνατή τιμή χαρακτηριστικής αντίστασης της κάθε γραμμής μεταφοράς. Επίσης, παρατηρούμε πως το διάγραμμα 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. Έτσι για παράδειγμα, για να υπολογίσουμε τη σύνθετη αντίσταση μιας γραμμής μεταφοράς σε απόσταση $17{,}716\ \lambda = 35\lambda/2 + 0.216\ \lambda$, μπορούμε να υπολογίσουμε την σύνθετη αντίσταση σε απόσταση $0.216\ \lambda$ από το φορτίο, η οποία μπορεί να διαβαστεί από το διάγραμμα Smith.



Σχήμα 7-11 Διάγραμμα Smith.

Με βάση όσα προαναφέραμε, βλέπουμε πως η σύνθετη αντίσταση η οποία συναντάται σε διαδοχικά σημεία κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από το διάγραμμα Smith. Τα σημεία αυτά διαβάζονται από τα σημεία ενός σωστά σχεδιασμένου κύκλου (σταθερού SWR) τον οποίο ο χρήστης σχεδιάζει πάνω στο διάγραμμα Smith. Η απόσταση κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς αντιστοιχεί σε (γωνιακή) απόσταση γύρω από το διάγραμμα και μπορεί να προκύψει από την περιφέρεια του διαγράμματος ως κλάσμα του μήκους κύματος. Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε ένα σημείο σε συγκεκριμένη απόσταση από κάποιο φορτίο. Έστω τώρα ότι ζητείται ο υπολογισμός της σύνθετης αντίστασης της γραμμής μεταφοράς σε απόσταση 0.079 λ μακριά από το σημείο που προαναφέραμε.

Διαπιστώνουμε πως υπάρχουν δύο σημεία στη συγκεκριμένη απόσταση από το αρχικό σημείο, ένα πλησιέστερα στο φορτίο και ένα μακρύτερα από αυτό, δηλαδή τα δύο σημεία σε ίση απόσταση από το αρχικό. Επιπροσθέτως, *η σύνθετη αντίσταση της γραμμής δεν θα είναι ίδια στα δύο αυτά σημεία*. Το παραπάνω προκύπτει αμέσως αν υποθέσουμε πως το ένα από τα δύο σημεία είναι ένας κόμβος δυναμικού. Τότε, το άλλο σημείο, το οποίο θα απέχει από το πρώτο απόσταση ίση με 2 * 0.079 λ = 0.158 λ, είναι γενικά αδύνατο να αποτελεί και αυτό κόμβο δυναμικού. Με τα παραπάνω γίνεται φανερό πως η διεύθυνση κίνησης πάνω στο διάγραμμα Smith κατά μήκος ενός κύκλου σταθερού SWR είναι σημαντική. Το διάγραμμα Smith έχει κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε η κίνηση κατά την φορά των δεικτών του ρολογιού να αντιστοιχεί σε απομάκρυνση από το φορτίο, δηλαδή προς την γεννήτρια. Παρόμοια, κίνηση με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού αντιστοιχεί σε κίνηση προς το φορτίο. Στα διαγράμματα Smith που κυκλοφορούν στο εμπόριο η σύμβαση που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται πάνω στο διάγραμμα, όπως βλέπουμε και στο Σχήμα 7-11.

Για οποιοδήποτε δοσμένο φορτίο, ένας σωστός κύκλος σταθερού SWR μπορεί να σχεδιαστεί πάνω στο διάγραμμα Smith από το χρήστη. Αρχικά υπολογίζουμε την κανονικοποιημένη σύνθετη αντίσταση του φορτίου, στην συνέχεια την σχεδιάζουμε (ένα σημείο) πάνω στο διάγραμμα και τέλος διαγράφουμε τον κύκλο (με κέντρο το κέντρο του διαγράμματος) που περνάει από το σημείο που σχεδιάσαμε. Για παράδειγμα το σημείο *P* στο διάγραμμα του Σχήματος 7-11 αναπαριστά μια κανονικοποιημένη σύνθετη αντίσταση z = 0.5 + 0.5j. Μάλιστα επειδή ο κύκλος που σχεδιάζουμε στη συνέχεια τέμνει τον άξονα *r* στο 2.6, προκύπτει ότι ο λόγος SWR είναι ίσος με 2.6. Αν η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς ήταν 300 Ω και η σύνθετη αντίσταση του φορτίου ήταν (150 + 150j) Ω, τότε το σημείο *P* θα αναπαριστούσε σωστά το φορτίο στο διάγραμμα Smith και ο λόγος στάσιμων κυμάτων θα ήταν πράγματι 2.6. Η σύνθετη αντίσταση σε οποιοδήποτε άλλο σημείο της γραμμής μεταφοράς μπορεί να προκύψει από το διάγραμμα Smith , σύμφωνα με όσα ήδη αναφέραμε. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-11 η κανονικοποιημένη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς στο σημείο *P'*, το οποίο απέχει απόσταση 0.1λ από το φορτίο, είναι ίση με 1.4 + 1.1j.

Εφαρμογές Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούμε σε μερικές από τις πλέον σημαντικές εφαρμογές των διαγραμμάτων Smith:

1. Υπολογισμοί σύνθετης αγωγιμότητας. Η εφαρμογή αυτή στηρίζεται στην ακόλουθη ιδιότητα: Η σύνθετη αντίσταση στο σημείο *Q* ισούται με την σύνθετη αγωγιμότητα στο σημείο *P* αν τα σημεία *P* και *Q* απέχουν απόσταση λ/4 και ανήκουν στον ίδιο SWR κύκλο. Η ιδιότητα αυτή είναι φανερή και στο Σχήμα 7-11. Πράγματι, η σύνθετη αντίσταση στο σημείο *Q* διαβάζεται αμέσως και είναι 1-1j. Με έναν απλό υπολογισμό βλέπουμε ότι αν η σύνθετη αντίσταση στο *P* είναι 0.5 + 0.5j, τότε η αντίστοιχη σύνθετη αγωγιμότητα θα είναι 1-1j. Αφού ολόκληρος ο κύκλος στο διάγραμμα Smith αντιστοιχεί σε μήκος λ/2, κάθε ημικύκλιο θα αντιστοιχεί σε απόσταση ίση με λ/4. Έτσι, όταν απαιτείται υπολογισμός αντίστασης και αναζητούμε το σημείο το οποίο απέχει απόσταση λ/4 από ένα δοσμένο σημείο, δεν έχουμε παρά να βρούμε το αντιδιαμετρικό σημείο σχεδιάζοντας την ευθεία που συνδέει το αρχικό σημείο και το κέντρο του κύκλου. Το σημείο που αναζητούμε είναι το σημείο στο οποίο η ευθεία τέμνει τον κύκλο.
2. Υπολογισμός σύνθετη αντίστασης ή σύνθετης αγωγιμότητας σε οποιοδήποτε σημείο της γραμμής μεταφοράς, για οποιοδήποτε φορτίο και ταυτόχρονος

υπολογισμός του λόγου στάσιμων κυμάτων της γραμμής μεταφοράς. Η εργασία αυτή μπορεί να γίνει τόσο για γραμμές χωρίς απώλειες όσο και για γραμμές με απώλειες, ωστόσο η πρώτη περίπτωση είναι σημαντικά απλούστερη.

3. Υπολογισμός του μήκους που απαιτείται να έχει μια βραχυκυκλωμένη γραμμή μεταφοράς έτσι ώστε να εμφανίζει συγκεκριμένη χωρητική ή επαγωγική αντίσταση. Η εργασία αυτή μπορεί να γίνει με τη βοήθεια του διαγράμματος Smith ξεκινώντας από το σημείο 0 + 0j στην αριστερή πλευρά του διαγράμματος και προχωρώντας προς την γεννήτρια μέχρι να συναντήσουμε τη σωστή τιμή αντίστασης. Εναλλακτικά, αν θέλουμε να πετύχουμε μια δομένη τιμή μαγνητικής επιδεκτικότητας μπορούμε να ξεκινήσουμε από το σημείο $\infty + \infty j$ στα δεξιά του διαγράμματος και να κινηθούμε πάλι με την ίδια φορά. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται πάντα σε σχέση με βραχυκυκλωμένους κλαδωτές (stubs).

Παράδειγμα 7-6 Υπολογίστε το μήκος μιας βραχυκυκλωμένης γραμμής μεταφοράς έτσι ώστε να ακυρώσετε (tune out) την μαγνητική επιδεκτικότητα ενός φορτίου για το οποίο Y = 0.004 – 0.002j S . Το φορτίο συνδέεται με μια γραμμή μεταφοράς με διηλεκτρικό τον αέρα, χαρακτηριστική αγωγιμότητα Y_0 = 0.0033 S και συχνότητα 150 MHz.

Λύση Σε συμφωνία με τον τύπο $z = Z/Z_0$, έχουμε και τον τύπο $y = Y/Y_0$ και έτσι

$$y = \frac{0.004 - 0.002j}{0.0033} = 1.21 - 0.61j$$

Επομένως η κανονικοποιημένη μαγνητική επιδεκτικότητα που απαιτείται για να ακυρώσει την κανονικοποιημένη μαγνητική επιδεκτικότητα του φορτίου θα είναι 0.61j. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι το μήκος της γραμμής το οποίο απαιτείται ώστε αυτή να εμφανίζει κανονικοποιημένη σύνθετη αγωγιμότητα ίση με 0.61 (όταν η γραμμή είναι βραχυκυκλωμένη) είναι:

$$Length = 0.250 + 0.087 = 0.337\lambda$$

Αφού η γραμμή μεταφοράς έχει για διηλεκτρικό αέρα, ο συντελεστής ταχύτητας θα είναι 1 και επομένως:

$$v_c = f \times \lambda$$

και:

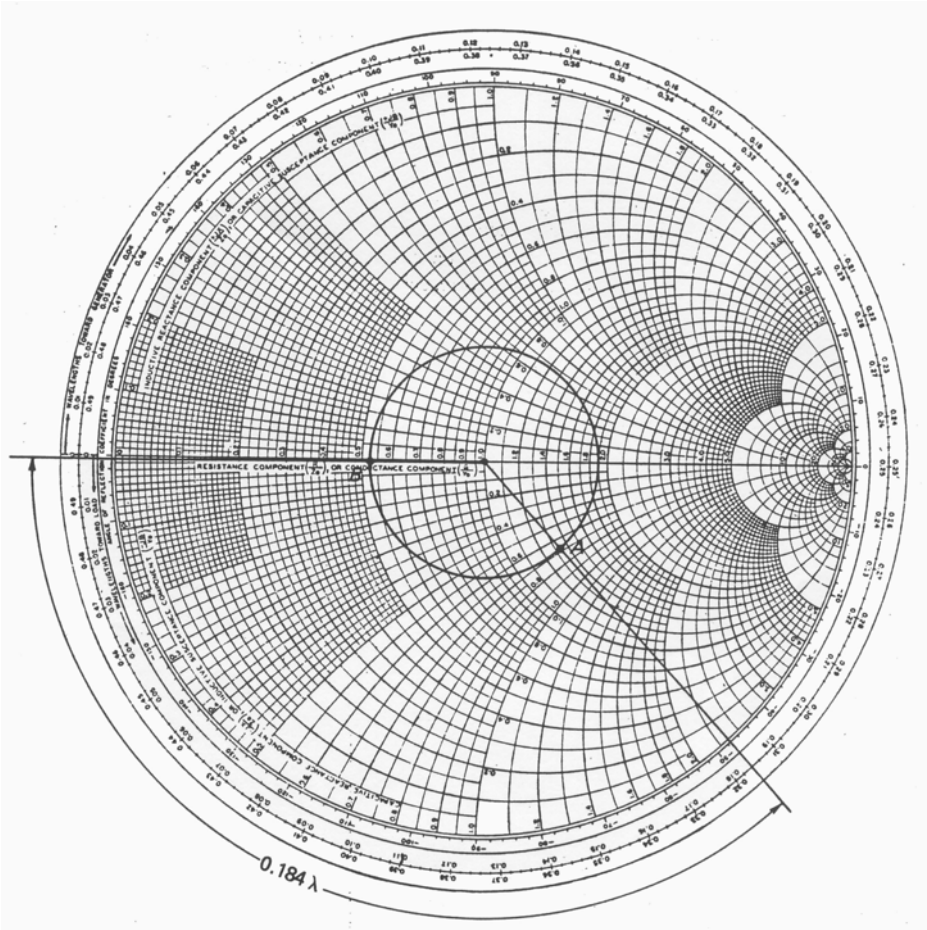
$$\lambda = \frac{v_c}{f} = \frac{300 \times 10^6}{150 \times 10^6} = 2m$$

$$Length = 0.337\lambda = 0.337 \times 200 = 67.4cm$$

7.2.2 Επίλυση Προβλημάτων

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η καλύτερη μέθοδος επεξήγησης της διαδικασίας επίλυσης ενός προβλήματος με χρήση του διαγράμματος Smith βασίζεται στην παρουσίαση της διαδικασίας επίλυσης ενός συγκεκριμένου προβλήματος. Σε μερικές άλλες περιπτώσεις μια μεθοδολογία μπορεί να καθιερωθεί χωρίς αναφορά σε

συγκεκριμένο πρόβλημα. Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούμε και στις δυο μεθόδους.



Σχήμα 7-12 Διάγραμμα Smith για την επίλυση του Παραδείγματος 7-7.

Παράδειγμα 7-7 (Σχήμα 7-12) Ένα φορτίο $Z_L = 100 - 50j\ \Omega$ συνδέεται σε μια γραμμή μεταφοράς με $Z_0 = 75\Omega$. Υπολογίστε:

1. Το σημείο, κοντύτερα στο φορτίο, στο οποίο πρέπει να συνδεθεί ένας μετασχηματιστής ενός τετάρτου του μήκους κύματος για πετύχουμε προσαρμογή.
2. Την χαρακτηριστική αντίσταση Z_0' της γραμμής μεταφοράς η οποία θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τον μετασχηματιστή.

Λύση

1. Αρχικά, κανονικοποιούμε την αντίσταση του φορτίου σε σχέση με την γραμμή μεταφοράς και έτσι θα έχουμε:

$$\frac{100-50j}{75} = 1.33 - 0.67j$$

Το σημείο αυτό το σχεδιάζουμε στο διάγραμμα Smith (*A*) και σχεδιάζουμε τον κύκλο (με κέντρο το κέντρο του διαγράμματος) ο οποίος περνάει από το σημείο Α. Ο κύκλος αυτός παρατηρούμε ότι τέμνει τον άξονα *r* στο σημείο

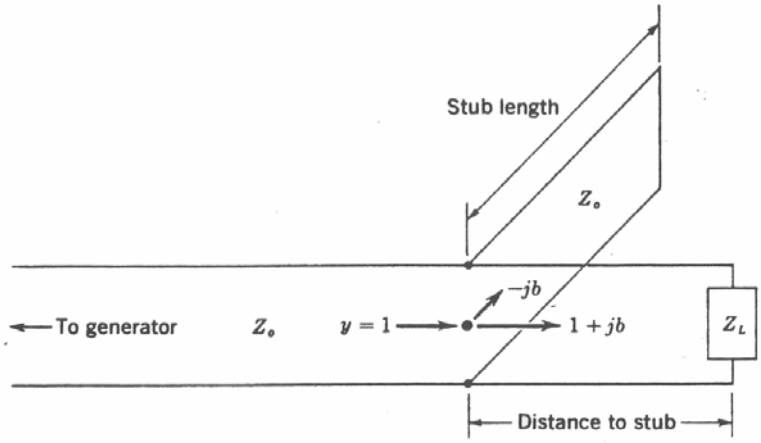
1.9, γεγονός που σημαίνει ότι ο λόγος SWR είναι 1.9. Μετακινούμενοι τώρα προς τη φορά των δεικτών του ρολογιού, προς την γεννήτρια, βρίσκουμε το κοντινότερο σημείο για το οποίο η σύνθετη αντίσταση είναι καθαρά ωμική. Το σημείο αυτό (*B*) είναι το σημείο στο οποίο ο κύκλος που σχεδιάσαμε τέμνει τη μοναδική ευθεία γραμμή του διαγράμματος. Από την περιφέρεια του διαγράμματος βρίσκουμε πως η απόσταση του σημείου *B* από το φορτίο είναι ίση με 0.5 - 0.316 = 0.184λ. Στο σημείο αυτό βρίσκουμε ότι η κανονικοποιημένη αντίσταση είναι $r = 0.53$ και επομένως η πραγματική (μη-κανονικοποιημένη) αντίσταση θα είναι $R = 0.53 * 75 = 39.8\ \Omega$.

2. 39.8 Ω είναι η αντίσταση την οποία ο λ/4 μετασχηματιστής θα πρέπει να προσαρμόσει στη γραμμή μεταφοράς των 75Ω. Έτσι, παρόμοια με το Παράδειγμα 7-4 θα έχουμε:

$$Z_0' = \sqrt{Z_0 Z_R} = \sqrt{75 \times 39.8} = 54.5\Omega$$

Προσαρμογή φορτίου σε γραμμή με βραχυκυκλωμένο κλαδωτή Ένας κλαδωτής είναι ένα τμήμα μιας γραμμής μεταφοράς το οποίο είναι βραχυκυκλωμένο στο απομακρυσμένο άκρο του. Σπανιότερα μπορεί να είναι ανοικτοκυκλωμένος , αλλά σε κάθε περίπτωση η αντίστασή του είναι καθαρά ωμική. Για να είμαστε πιο ακριβείς, ένας τέτοιου είδους κλαδωτής εμφανίζει αγωγιμότητα εισόδου η οποία είναι καθαρά μαγνητική επιδεκτικότητα, και η οποία χρησιμοποιείται για να ακυρώσει την συνιστώσα μαγνητικής επιδεκτικότητας της αγωγιμότητας της γραμμής μεταφοράς σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο. Σημειώνουμε ότι οι βραχυκυκλωμένοι κλαδωτές προτιμούνται επειδή οι ανοικτοκυκλωμένοι τείνουν να εκπέμπουν από το ανοιχτό άκρο τους.

Όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 7-13, ένας κλαδωτής κατασκευάζεται από την ίδια γραμμή μεταφοράς όπως αυτή στην οποία συνδέεται. Πλεονεκτεί επομένως σε σχέση με τον μετασχηματιστή λ/4, ο οποίος θα πρέπει να σχεδιαστεί κατά περίπτωση. Επιπροσθέτως, ο κλαδωτής μπορεί να είναι άκαμπτος και προσαρμοζόμενος. Έτσι, ο κλαδωτής χρησιμοποιείται συχνά σε υψηλές συχνότητες, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ποικιλία φορτίων και για μεγάλο εύρος συχνοτήτων.



Σχήμα 7-13 Κλαδωτής συνδεδεμένος σε γραμμή μεταφοράς με φορτίο.

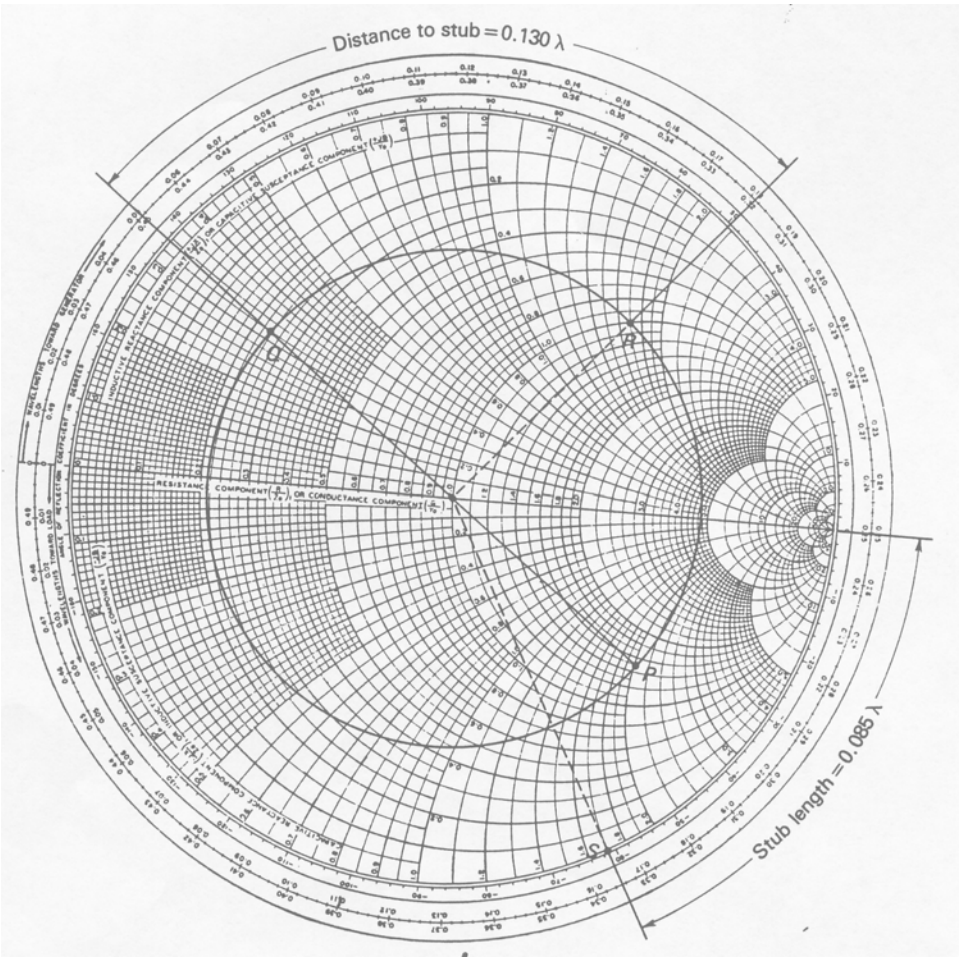
Διαδικασία Προσαρμογής

1. Κανονικοποίηση της αντίστασης του φορτίου σε σχέση με την αντίσταση της γραμμής μεταφοράς, και σχεδιασμός του σημείου στο διάγραμμα Smith.
2. Σχεδιασμός του κύκλου ο οποίος περνάει από αυτό το σημείο και εύρεση της αγωγιμότητας του φορτίου με βάση τη μέθοδο εύρεσης του αντιδιαμετρικού σημείου. Αφού ο κλαδωτής τοποθετείται παράλληλα σε σχέση με τη γραμμή μεταφοράς, *είναι απαραίτητο να δουλεύουμε με αγωγιμότητες όταν πραγματοποιούμε υπολογισμούς με κλαδωτές.*
3. *Ξεκινώντας τώρα από το νέο αυτό σημείο και χρησιμοποιώντας το διάγραμμα Smith ως διάγραμμα αγωγιμοτήτων*, βρίσκουμε το πλησιέστερο στο φορτίο σημείο το οποίο έχει αγωγιμότητα ίση με 1 ± bj. *Το σημείο αυτό είναι το σημείο στο οποίο ο κύκλος, τον οποίο έχουμε σχεδιάσει τέμνει τον κύκλο με r =* 1, ο οποίος είναι ο μόνος κύκλος του διαγράμματος που περνάει από το κέντρο του διαγράμματος. Αυτό είναι το σημείο στο οποίο θα πρέπει να τοποθετηθεί ο κλαδωτής προκειμένου να ακυρώσει τη συνιστώσα ± bj. Από την περιφέρεια του διαγράμματος μετράμε την ζητούμενη απόσταση.
4. Για να βρούμε το μήκος του βραχυκυκλωμένου κλαδωτή, ξεκινάμε από το σημείο $\infty + \infty j$ στα δεξιά του διαγράμματος, μια και αυτή είναι η αγωγιμότητα του βραχυκυκλώματος.
5. Κινούμενοι με τη φορά των δεικτών του ρολογιού πάνω στην περιφέρεια του διαγράμματος, βρίσκουμε το σημείο στο οποίο η μαγνητική επιδεκτικότητα ακυρώνει τη ± bj μαγνητική επιδεκτικότητα της γραμμής στο σημείο στο οποίο συνδέεται ο κλαδωτής. Για παράδειγμα, αν η αγωγιμότητα της γραμμής είναι 1 + 0.43j, η απαιτούμενη μαγνητική επιδεκτικότητα είναι –0.43j. Στη συνέχεια επιβεβαιώνουμε πως έχουμε βρει τη σωστή πολικότητα της μαγνητικής επιδεκτικότητας, η οποία σημειώνεται πάντα στο αριστερό μέρος της περιφέρειας του διαγράμματος.
6. Διαβάζουμε την απόσταση σε μήκη κύματος από το σημείο $\infty + \infty j$ στο καινούριο σημείο (π.χ. b = -0.43). Η απόσταση αυτή είναι το απαιτούμενο μήκος του κλαδωτή.

Παράδειγμα 7-8 (Σχήμα 7-14) Μια συνδεσμολογία *RC* στοιχείων η οποία παρουσιάζει σύνθετη αντίσταση Z_L = (450 - 600j) Ω στη συχνότητα των 10 MHz, και η οποία συνδέεται σε μια γραμμή μεταφοράς με αντίσταση 300Ω. Υπολογίστε τη θέση και το μήκος ενός βραχυκυκλωμένου κλαδωτή ο οποίος προσαρμόζει το φορτίο στη γραμμή μεταφοράς.

Λύση Ακολουθούμε τα βήματα σύμφωνα με τη μεθοδολογία την οποία περιγράψαμε:

1. Υπολογίζουμε την κανονικοποιημένη αντίσταση z_L = (450 - 600j) / 300 = 1,5 – 2j και σχεδιάζουμε τον κύκλο σταθερού SWR = 4.6 στο διάγραμμα Smith. Στο Σχήμα 7-14 σχεδιάζεται και το σημείο *P*.
2. Με τη μέθοδο του αντιδιαμετρικού σημείου υπολογίζουμε την αγωγιμότητα του φορτίου y_L = 0.24 + 0.32j. Το αντιδιαμετρικό σημείο σημειώνεται ως *Q* στο Σχήμα 7-14 και όπως έχουμε ήδη αναφέρει απέχει λ/4 από το αρχικό σημείο *P*.



Σχήμα 7-14 Διάγραμμα Smith για την επίλυση του Παραδείγματος 7-8.

3. Στη συνέχεια βρίσκουμε το σημείο *R* στο οποίο τέμνεται ο κύκλος που σχεδιάσαμε και ο κύκλος *r* = 1. Το σημείο αυτό είναι το πλησιέστερο στο σημείο *Q*, κινούμενοι με τη φορά των δεικτών του ρολογιού, το οποίο έχει αγωγιμότητα της μορφής y = 1 + 1.7j. Στη συνέχεια, υπολογίζουμε την απόσταση του σημείου *R* από το σημείο *Q* με βάση την αρίθμηση που υπάρχει στην περιφέρεια του διαγράμματος. Βρίσκουμε λοιπόν:

$$dist_to_stub = 0.181 - 0.051 = 0.13\lambda$$

και έτσι ο κλαδωτής θα τοποθετηθεί σε απόσταση 0.13λ από το φορτίο και θα πρέπει να αντισταθμίσει το b = 1.7. Έτσι, θα πρέπει να έχει μαγνητική επιδεκτικότητα –1.7

4, 5,6. Ξεκινώντας από το σημείο $\infty + \infty j$ (αγωγιμότητα βραχυκυκλώματος) και κινούμενοι με φορά ίδια με αυτήν των δεικτών του ρολογιού φτάνουμε στο σημείο 0 – 1.7j, το οποίο έχει σημειωθεί στο διάγραμμα του Σχήματος 7-14 ως *S*. Μετρώντας την απόσταση του σημείου *S* από το σημείο $\infty + \infty j$ βρίσκουμε ότι το μήκος του κλαδωτή θα είναι:

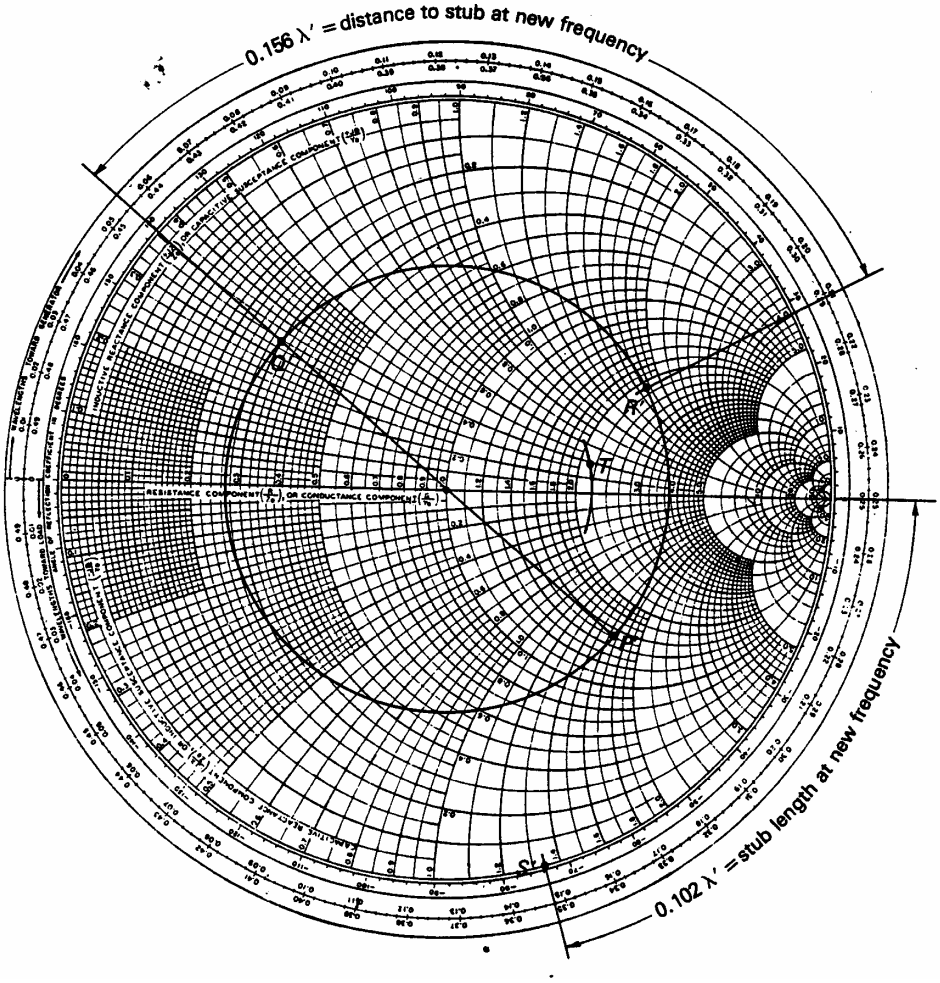
$$length = 0.335 - 0.250 = 0.085\lambda$$

Επιπτώσεις λόγω διακύμανσης της συχνότητας Ένας κλαδωτής θα προσαρμόσει ένα φορτίο σε μια γραμμή μεταφοράς μόνο στην συχνότητα για την οποία σχεδιάστηκε να το κάνει. Το παραπάνω ισχύει και για τους λ/4 μετασχηματιστές. Η σύνθετη αντίσταση του φορτίου, όμως, μπορεί να μεταβάλλεται με τη συχνότητα, με

αποτέλεσμα η προσαρμογή να παύει να ισχύει. Ωστόσο, ο κλαδωτής δεν είναι δυνατό να παρέχει τέλεια προσαρμογή σε άλλη συχνότητα, από αυτήν για την οποία σχεδιάστηκε, ακόμα και αν η σύνθετη αντίσταση του φορτίου παραμένει αμετάβλητη.

Για παράδειγμα, στο Παράδειγμα 7-8 είδαμε πως για να έχουμε προσαρμογή στη συχνότητα των 10 MHz έπρεπε να τοποθετήσουμε τον κλαδωτή σε απόσταση 0.13λ από το φορτίο. Στη συχνότητα αυτή έχουμε λ = 30 m, και επομένως η απόσταση του κλαδωτή από το φορτίο θα είναι 3.9 m. Αν όμως η συχνότητα μεταβληθεί και γίνει, για παράδειγμα, 12 MHz, το νέο μήκος κύματος θα είναι 25 m και επομένως θα πρέπει να μεταβληθεί τόσο η θέση του κλαδωτή όσο και το μήκος του για να διατηρηθεί η προσαρμογή. Σημειώνουμε πάντως, ότι αν η μεταβολή της συχνότητας δεν είναι σημαντική, η προσαρμογή θα εξακολουθεί να είναι καλή.

Συχνά απαιτείται η προσαρμογή ενός φορτίου σε μια γραμμή μεταφοράς για μια συγκεκριμένη συχνότητα, ενώ παράλληλα είναι απαραίτητη η αποδοτική (χωρίς απώλειες) συμπεριφορά του συστήματος σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Επομένως, απαιτείται η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για τον υπολογισμό του SWR μιας γραμμής μεταφοράς σε μια συχνότητα *f''*, ενώ η προσαρμογή του φορτίου στη γραμμή είχε γίνει για μια άλλη συχνότητα *f'*. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε μια μεθοδολογία για την αντιμετώπιση της προσαρμογής φορτίου-γραμμής με την χρήση βραχυκυκλωμένων κλαδωτών. Η περίπτωση στην οποία η προσαρμογή γίνεται με τη βοήθεια των μετασχηματιστών λ/4 είναι ανάλογη.



Σχήμα 7-15 Διάγραμμα Smith-επίλυση Παραδείγματος 7-9, επίδραση αλλαγής συχνότητας σε stub

Παράδειγμα 7.9 (Σχήμα 7.15) Υπολογίστε το λόγο SWR στη συχνότητα των 12 Mhz για το παράδειγμα 7.8

Λύση Αν γνωρίζουμε τον τύπο του φορτίου ή γενικά αν έχουμε τον τρόπο να υπολογίσουμε την εμπέδηση του φορτίου στη νέα συχνότητα την υπολογίζουμε. Για το παράδειγμά μας γνωρίζουμε πως το φορτίο μας είναι ένας συνδυασμός αντίστασης και πυκνωτή συνδεμένα σε σειρά. Έτσι, η εμπέδηση του φορτίου στη νέα συχνότητα θα δίνεται από τον τύπο:

$$Z_L = 450 - 600j \times 10/12 = 450 - 500j \text{, στα 12 MHz.}$$

Στη συνέχεια, κανονικοποιούμε την εμπέδηση του φορτίου με την αντίσταση της γραμμής μεταφοράς και βρίσκουμε:

$$z_L = (450 - 500l)/300 = 1.5 - 1.67j$$

Επισημαίνουμε πως αν η αντίσταση του φορτίου δεν μεταβάλλεται με τη συχνότητα (π.χ. ωμικό φορτίο) δεν είναι ανάγκη να κάνουμε το βήμα αυτό.

1. Σχεδιάζουμε το σημείο αυτό P' στο διάγραμμα, σχεδιάζουμε τον κύκλο ο οποίος διέρχεται από το σημείο αυτό και με τη μέθοδο του αντιδιαμετρικού σημείου διαβάζουμε την κανονικοποιημένη αγωγιμότητα του φορτίου. Για το παράδειγμά μας είναι το σημείο Q' για το οποίο έχουμε 0,3 + 0,33 j.
2. Υπολογίζουμε την παλιά απόσταση που θα είχε το stub από το φορτίο για ταίριασμα, ως προς το νέο μήκος κύματος. Η απόσταση αυτή θα είναι 0.13 * 10/12 = 0.156 λ' εκφρασμένη απλά στο νέο μήκος κύματος.
3. Ξεκινώντας από το σημείο κανονικοποιημένης χωρητικότητας Q', μετακινούμαστε με φορά ίδια με αυτή των δεικτών του ρολογιού πάνω στο κύκλο σταθερού SWR απόσταση 0.156 λ, δηλαδή όση υπολογίσαμε στο προηγούμενο βήμα. Στο σημείο που καταλήγουμε R' διαβάζουμε την κανονικοποιημένη αγωγιμότητα η οποία για το παράδειγμά μας είναι y_{line} = 2.1 + 1.7 j. Αυτή είναι η αγωγιμότητα στη νέα συχνότητα όπως φαίνεται στο σημείο R' κοιτάζοντας προς το φορτίο. Το σημείο R' είναι το σημείο στο οποίο ήταν τοποθετημένο το stub στην αρχική συχνότητα.
4. Υπολογίζουμε το παλιό μήκος του stub ως προς το νέο μήκος κύματος. Για το παράδειγμά μας θα είναι 0.085 * 10/12 = 0.102 λ'.
5. Ξεκινώντας από το σημείο $\infty + \infty j$ όπως συνήθως, βρίσκουμε τη μαγνητική επιδεκτικότητα του stub του οποίου το μήκος υπολογίσαμε στο προηγούμενο βήμα. Για το παράδειγμά μας έχουμε μήκος 0.102λ' και έτσι από το σχήμα 7.15 στο σημείο S' βρίσκουμε y_{stub} = -1.34j.
6. Η κατάσταση στη νέα συχνότητα έχει ως εξής: Έχουμε δυο αγωγιμότητες συνδεμένες παράλληλα κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς. Στην αρχική συχνότητα οι τιμές τους προσθέτονταν έτσι που το φορτίο ταίριαζε στη γραμμή. Ωστόσο στη νέα συχνότητα, δεν έχουμε ταίριασμα. Στο βήμα αυτό υπολογίζουμε το άθροισμα των 2 αγωγιμοτήτων. $y_{total} = y_{stub} + y_{line}$ = -1.34j + 2.1 + 1.7 j = 2.1 + 0.36 j.
7. Σχεδιάζουμε το σημείο ολικής αγωγιμότητας πάνω στο διάγραμμα Smith (σημείο T) και σχεδιάζουμε το νέο κύκλο σταθερού SWR. Από το διάγραμμα διαβάζουμε τη νέα τιμή SWR στο σημείο στο οποίο ο νέος κύκλος τέμνει τον άξονα r. Η τιμή αυτή είναι το SWR της γραμμής μεταφοράς στη νέα συχνότητα ενώ είχε σχεδιαστεί να ταιριάζει σε μια άλλη συχνότητα.

Στη συνέχεια δίνουμε ένα παράδειγμα στο οποίο ακολουθούμε την παραπάνω διαδικασία για μια περίπτωση στην οποία το φορτίο δεν μεταβάλλεται.

Παράδειγμα 7.10 (Σχήμα 7.16) (α) Υπολογίστε τη θέση και το μήκος ενός βραχυκυκλωμένου stub σχεδιασμένου να ταιριάζει ένα ωμικό φορτίο 200Ω σε μια γραμμή μεταφοράς με χαρακτηριστική αντίσταση 300Ω. (β) Υπολογίστε το SWR το οποίο θα υπάρχει στη γραμμή μεταφοράς αν η συχνότητα αυξηθεί κατά 10%, θεωρώντας πως τόσο η αντίσταση του φορτίου όσο και η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς δεν μεταβάλλονται.

Λύση (α) Υπολογίζουμε αρχικά κατά τα γνωστά την κανονικοποιημένη αντίσταση του φορτίου ως προς τη γραμμή μεταφοράς.

$$z_L = \frac{200}{300} = 0.67$$

Στη συνέχεια, βρίσκουμε το σημείο αυτό στο διάγραμμα Smith του σχήματος 7.16 και το ονομάζουμε P. Αφού η κανονικοποιημένη αντίσταση που μόλις υπολογίσαμε έχει μόνο πραγματικό μέρος, το σημείο P βρίσκεται πάνω στη μοναδική ευθεία γραμμή του διαγράμματος. Στη συνέχεια σχεδιάζουμε τον κύκλο σταθερού SWR με κέντρο το κέντρο του διαγράμματος που διέρχεται από το σημείο P. Ο κύκλος αυτός τέμνει τον άξονα r (δεξιά του κέντρου του διαγράμματος) στο σημείο SWR = 1.5, το σημείο αυτό στην περίπτωσή μας ταυτίζεται με το αντιδιαμετρικό του σημείου P και δίνει έτσι και την κανονικοποιημένη αγωγιμότητα του φορτίου. Το σημείο αυτό το ονομάζουμε Q.

Τώρα, βρίσκουμε το σημείο τομής του κύκλου που σχεδιάσαμε με τον κύκλο r=1, τον μοναδικό κύκλο του διαγράμματος (όπως έχουμε αναφέρει) ο οποίος διέρχεται από το κέντρο του διαγράμματος. Το σημείο τομής αυτό το ονομάζουμε R. Η απόσταση του σημείου Q από το σημείο R, όπως έχουμε δει, θα δίνει την απόσταση στην οποία θα πρέπει να τοποθετηθεί το stub σε σχέση με το φορτίο. Με βάση λοιπόν την αρίθμηση στην περιφέρεια του διαγράμματος Smith βρίσκουμε πως η απόσταση αυτή θα πρέπει να είναι ίση με Q – R = 0.11 λ. Για να βρούμε τώρα το σωστό μήκος το οποίο θα πρέπει να έχει το stub ώστε να ρυθμίζει την αντίσταση του φορτίου, βρίσκουμε την αγωγιμότητα στο σημείο R:

$$y_{line} = 1 - 0.41j$$

Έτσι, για να αντισταθμίζεται η αγωγιμότητα αυτή, αναζητούμε το πλησιέστερο σημείο ξεκινώντας από το σημείο $\infty + \infty j$ για το οποίο έχουμε b_{stub} = 0.41 j. Το σημείο αυτό το ονομάζουμε S. Η απόσταση του σημείου S από το σημείο $\infty + \infty j$ θα δίνει τότε το σωστό μήκος του stub και έτσι βρίσκουμε από το διάγραμμα:

$$Length = 0.311\lambda$$

(β) Η νέα συχνότητα θα είναι αυξημένη κατά 10% σε σχέση με την παλιά συχνότητα ή με άλλα λόγια

$$f'' = \frac{110}{100} f' \Leftrightarrow \lambda' = \frac{\lambda}{1.1}$$

και έτσι η απόσταση του φορτίου από το stub εκφρασμένη σε σχέση με το νέο μήκος κύματος θα είναι:

$$0.11 \times 1.1 = 0.121\lambda'$$

και το μήκος του stub εκφρασμένο με το νέο μήκος κύματος με παρόμοιο τρόπο θα είναι:

$$0.311 \times 1.1 = 0.342\lambda'$$

Ξεκινώντας τώρα από το σημείο Q και κινούμενοι με τη φορά των δεικτών του ρολογιού μέχρι να καλύψουμε απόσταση 0.121λ' στην περιφέρεια του διαγράμματος, βρίσκουμε το σημείο R'. Από το διάγραμμα διαβάζουμε την κανονικοποιημένη αγωγιμότητα του σημείου αυτή η οποία αντιστοιχεί στην αγωγιμότητα που παρουσιάζεται στο σημείο αυτό προς το φορτίο.

$$y_{line} = 0.94 - 0.39j$$

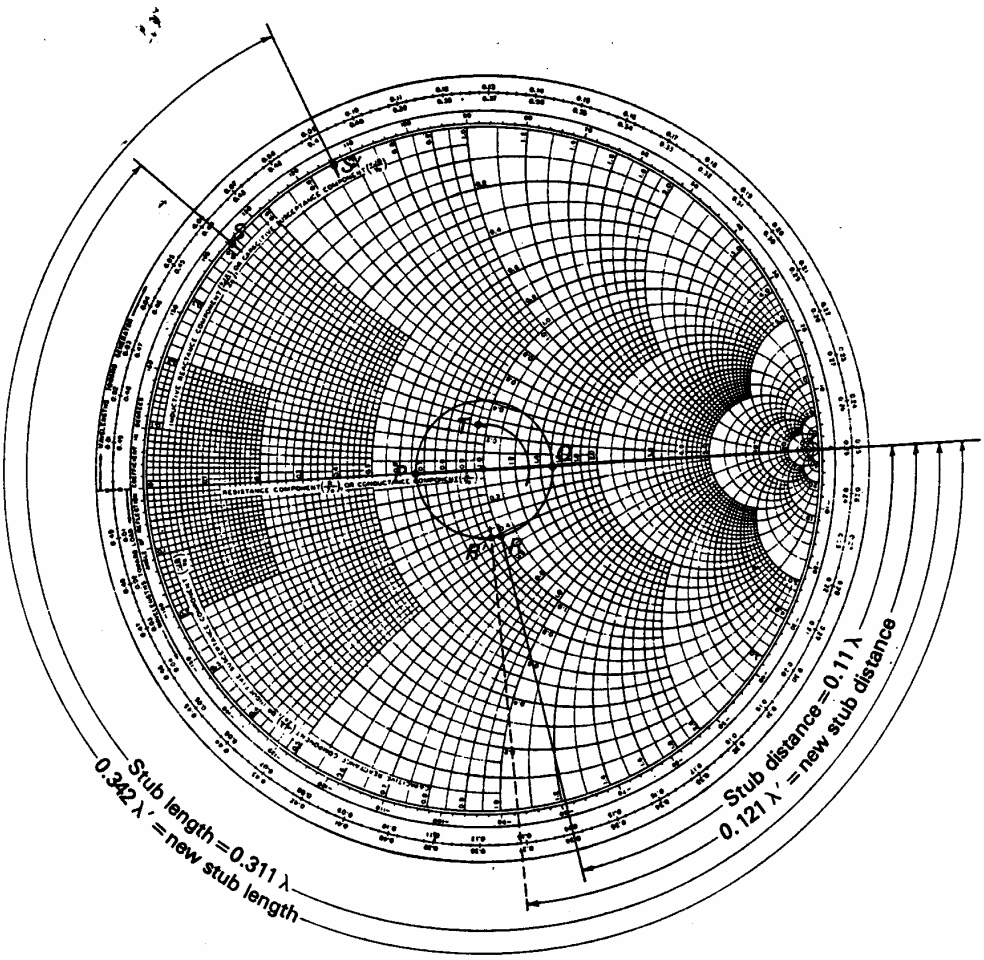
Παρόμοια τώρα, ξεκινάμε από το σημείο $\infty + \infty j$ και κινούμαστε με τη φορά των δεικτών του ρολογιού μέχρι να καλύψουμε απόσταση ίση με 0.342λ' στην περιφέρεια του κύκλου. Το σημείο αυτό το ονομάζουμε S'. Από το διάγραμμα τότε διαβάζουμε την αγωγιμότητα του stub στη νέα συχνότητα την οποία βρίσκουμε ίση με:

$$y_{stub} = 0.65j$$

Τώρα, μπορούμε να υπολογίσουμε τη συνολική αγωγιμότητα στο σημείο στο οποίο συνδέεται το stub:

$$y_{total} = y_{stub} + y_{line} = 0.65j + 0.94 - 0.39j = 0.94 + 0.26j$$

Τέλος, σχεδιάζουμε το σημείο αυτό στο διάγραμμα Smith, το ονομάζουμε T, και ο νέος κύκλος με κέντρο το κέντρο του διαγράμματος που διέρχεται από το T τέμνει τον άξονα r στο σημείο SWR = 1.3



Σχήμα 7-16 Διάγραμμα Smith-επίλυση Παραδείγματος 7-10, stub matching με αλλαγή συχνότητας

7-3 ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Σε πολλές περιπτώσεις, σχετικές με τις γραμμές μεταφοράς, χρειαζόμαστε εξαρτήματα τα οποία είναι ευκολότερο να τα αγοράσουμε και να τα χρησιμοποιήσουμε έτοιμα παρά να τα κατασκευάσουμε αυθόρμητα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ανάγκη χρησιμοποίησης ενός προσαρμοζόμενου stub το οποίο να μπορεί να εργάζεται καλά για αλλαγές της συχνότητας ή της εμπέδησης του φορτίου, και να συνεχίζει να δημιουργεί επαρκές ταίριασμα. Μια άλλη περίπτωση η οποία εμφανίζεται συχνά είναι να επιθυμούμε να δειγματοληπτήσουμε μόνο το εμπρός (ή μόνο το προς τα πίσω) κύμα σε μια γραμμή μεταφοράς, παρουσία στάσιμων κυμάτων (standing waves). Ακόμα, συχνά συμβαίνει μια balanced γραμμή μεταφοράς να συνδέεται σε μια unbalanced γραμμή μεταφοράς. Καταλήγοντας, θα ήταν χρήσιμο να είχαμε μια γραμμή μεταφοράς για σκοπούς μετρήσεων, πάνω στην οποία διάφορες ποσότητες όπως κόμβοι, αντί-κόμβοι ή SWR θα μπορούσαν να μετρηθούν σε κάθε σημείο της. Όλες αυτές οι περιπτώσεις καλύπτονται από ειδικά εξαρτήματα υλικού (hardware) τα οποία καλύπτουμε εδώ.

7-3.1 Το διπλό stub

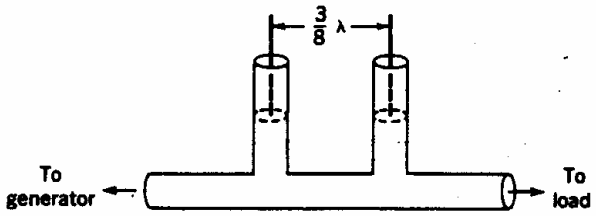
Στην περίπτωση όπου θέλουμε να κατασκευάσουμε μια συσκευή ταιριάσματος για γραμμές μεταφοράς η οποία να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο πλήθος εφαρμογών και για διαφορετικές κάθε φορά συνθήκες, γίνεται αντιληπτό πως η συσκευή αυτή θα πρέπει να έχει τόσες ρυθμιζόμενες παραμέτρους ή *βαθμούς ελευθερίας* όσες έχει και το pattern των στάσιμων κυμάτων. Για το pattern των στάσιμων κυμάτων γνωρίζουμε πως έχει 2 βαθμούς ελευθερίας αφού καθορίζεται ακριβώς από το λόγο SWR και τη θέση ενός μέγιστου. Άρα μια τέτοια συσκευή σαν αυτή που θεωρούμε θα πρέπει να έχει 2 ρυθμιζόμενες παραμέτρους. Για παράδειγμα, ένα stub με μεταβλητή θέση και μήκος (όπως είδαμε και στην προηγούμενη παράγραφο) μπορεί να πετύχει ταίριασμα σε πολλές και διαφορετικές περιπτώσεις, αρκεί η συχνότητα ενδιαφέροντος να είναι μικρότερη από τις συχνότητες των μικροκυμάτων. Ωστόσο, σε τόσο υψηλές συχνότητες υπάρχουν πολλά κατασκευαστικά προβλήματα ακριβώς επειδή χρησιμοποιούνται ομοαξονικές γραμμές μεταφοράς σε αντίθεση με τις γραμμές παράλληλων καλωδίων και έτσι δεν αναφερόμαστε σε stubs μεταβλητής θέσης για τις περιπτώσεις αυτές.

Για να παρέχουμε έτσι το δεύτερο βαθμό ελευθερίας (ο πρώτος είναι το μήκος του stub) ένα δεύτερο stub μεταβλητού μήκους προστίθεται στη γραμμή μεταφοράς. Το αποτέλεσμα είναι το διπλό stub που παρουσιάζεται στο σχήμα 7.17 και το οποίο αποτελεί πολύ καλή λύση για ομοαξονικές μικροκυματικές γραμμές. Κανονικά, τα δυο stubs τοποθετούνται σε μεταξύ τους απόσταση ίση με 0.375λ όπου λ το μήκος κύματος της κεντρικής συχνότητας ενδιαφέροντος, αφού έχει διαπιστωθεί πως αυτή είναι η βέλτιστη απόστασή τους. Με τον τρόπο αυτό έχουμε τους 2 βαθμούς ελευθερίας που επιθυμούσαμε και μπορούμε να πετύχουμε πολύ καλό ταίριασμα. Ωστόσο, δεν είναι δυνατό να πετύχουμε ταίριασμα για οποιοδήποτε δυνατό φορτίο αφού το να έχουμε 2 μεταβλητού μήκους stub δεν είναι το ίδιο με το να έχουμε ένα stub μεταβλητού μήκους και θέσης.

Μια τέτοιου είδους συσκευή κανονικά συνδέεται ανάμεσα στο φορτίο και τη γραμμή μεταφοράς για να έχουμε το ελάχιστο μήκος για την αταίριαστη γραμμή μεταφοράς. Συνήθως έχει την ίδια χαρακτηριστική αντίσταση με αυτήν της γραμμής μεταφοράς και κάθε μεταβλητό stub μπορεί να μεταβάλλει το μήκος του σε διάστημα κάπως μεγαλύτερο από μισό μήκος κύματος. Η μέθοδος ταιριάσματος με χρήση της συσκευής αυτής απαιτεί πειραματισμό με τις μεταβλητές παραμέτρους και μπορεί

είτε να έχει προηγηθεί κάποιου είδους υπολογισμός είτε όχι. Συνήθως η διαδικασία που ακολουθείται είναι το εξαντλητικό ψάξιμο, θέτοντας το stub κοντύτερα στο φορτίο σε κάποια θέση και για τη θέση αυτή εξετάζουμε κάθε πιθανή του δεύτερου stub κ.ο.κ. Εννοείται πως σε κάθε πιθανή θέση μετρούμε το SWR που πετυχαίνει η συγκεκριμένη ρύθμιση και έτσι καταλήγουμε στη βέλτιστη δυνατή ρύθμιση. Με τη συσκευή αυτή μπορούμε να πετύχουμε λόγο στάσιμων κυμάτων το ελάχιστο ίσο με 1.2.

Στην περίπτωση όπου επιθυμούμε σχεδόν τέλειο ταίριασμα με το φορτίο κάτω από όλες τις δυνατές συνθήκες, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα τριπλό μεταβλητό stub. Στην περίπτωση αυτή τα τρία stub τοποθετούνται σε απόσταση 0.124λ μεταξύ τους η οποία έχει διαπιστωθεί πως είναι η βέλτιστη μεταξύ τους απόσταση.



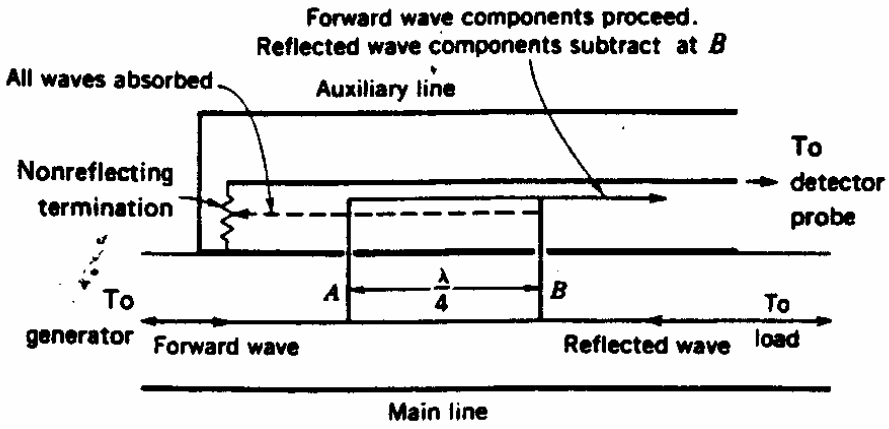
Σχήμα 7-17 Double stub matcher

7-3.2 Κατευθυντικός συζευκτήρας (Directional Coupler)

Σε πολλές περιπτώσεις είναι επιθυμητό να μετρήσουμε την ισχύ που φτάνει σε ένα φορτίο ή μια κεραία εκπομπής δια μέσου μιας γραμμής μεταφοράς. Η διαδικασία αυτή γίνεται συνήθως με ένα τέχνασμα κατά το οποίο μετράται ένα γνωστό κλάσμα της ισχύος που φτάνει στο φορτίο και έτσι η ολική ισχύς μπορεί να εκτιμηθεί. Στην περίπτωση αυτή είναι επιτακτικό να μετρηθεί μόνο το εμπρός κύμα το οποίο διαδίδεται κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς και όχι τυχόν ανακλάσεις του σήματος αυτού. Για την εργασία αυτή χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι ειδικών εξαρτημάτων τα οποία ονομάζονται κατευθυντικοί συζευκτήρες, στο σχήμα 7.18 παρουσιάζουμε έναν συζευκτήρα δυο οπών ο οποίος είναι από τους πλέον δημοφιλείς. Εξετάζουμε στη συνέχεια αυτόν τον συζευκτήρα επειδή είναι αρκετά επεξηγηματικός για τις γραμμές μεταφοράς και επειδή υπάρχει ένας ισοδύναμος κυματοδηγός με παρόμοια λειτουργία (ενότητα 10.5).

Όπως μπορούμε να δούμε από το σχήμα 7.18, ο κατευθυντικός συζευκτήρας δυο οπών αποτελείται από ένα τμήμα γραμμής μεταφοράς η οποία συνδέεται σε σειρά με την κεντρική γραμμή μεταφοράς, μια επιπλέον βοηθητική γραμμή η οποία συνδέεται με την κεντρική γραμμή με τη βοήθεια δυο probes τα οποία περνάνε από οπές οι οποίες έχουν δημιουργηθεί στις ομοαξονικές γραμμές. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, τα probes δεν ακουμπούν στον εσωτερικό αγωγό της βοηθητικής γραμμής. Αντιθέτως, επάγουν αρκετή ενέργεια στον αγωγό αυτό αφού είναι αρκετά κοντά του. Στην περίπτωση όπου ακουμπούσαν στον εσωτερικό αγωγό της βοηθητικής γραμμής, ένα μεγάλο μέρος της ισχύος (αντί για ένα γνωστό κλάσμα) θα έμπαινε στη βοηθητική γραμμή ενώ στην ουσία ένα μέρος της ισχύος είναι αρκετό. Τα probes επάγουν ενέργεια στη βοηθητική γραμμή η οποία έχει την ίδια διεύθυνση με την κεντρική γραμμή μεταφοράς και έχει δημιουργηθεί μια ειδική διάταξη έτσι ώστε να αποσβένονται τα κύματα τα οποία υπάρχουν στην κεντρική γραμμή μεταφοράς και διαδίδονται με την αντίθετη φορά. Η διάταξη αυτή δεν είναι τίποτα άλλο από την αντίσταση τερματισμού της βοηθητικής γραμμής η οποία ονομάζεται και τερματιστής

μη-αντανάκλασης (nonreflecting termination). Η απόσταση ανάμεσα στα probes είναι λ/4 αλλά θα μπορούσε να είναι οποιοδήποτε πολλαπλάσιο του λ/4. Ο κεντρικός αγωγός της βοηθητικής γραμμής οδηγείται στη διάταξη μέτρησης της ισχύος.



Σχήμα 7-18 Ομοαξονικός κατευθυντικός συζευκτήρας δύο οπών (Coaxial two-hole directional coupler)

Οποιοδήποτε κύμα επαχθεί στη βοηθητική γραμμή με φορά από δεξιά προς τα αριστερά θα οδηγηθεί στην αντίσταση τερματισμού και έτσι δεν θα μετρηθεί. Έτσι απομένει να δείξουμε πως μόνο τα εμπρός κύματα της κεντρικής γραμμής μπορούν να ταξιδέψουν από αριστερά προς δεξιά στη βοηθητική γραμμή. Ένα εμπρός κύμα το οποίο ταξιδεύει στην κεντρική γραμμή και εισέρχεται στη βοηθητική γραμμή από το σημείο Α, συνεχίζει να ταξιδεύει προς τη διάταξη μέτρησης και συναντά στο Β ένα άλλο στιγμιότυπο του ίδιου εμπρός κύματος. Και τα δυο κύματα έχουν διανύσει την ίδια απόσταση (είναι σε φάση) και έτσι προστίθενται και συνεχίζουν προς τη διάταξη μέτρησης. Τυχόν πίσω κύματα τα οποία διαδίδονται από τα δεξιά προς τα αριστερά στην κεντρική γραμμή, υπάρχει περίπτωση να περάσουν από τα probes και να διαδοθούν στην βοηθητική γραμμή από τα αριστερά προς τα δεξιά. Όσο μικρά και αν είναι τα κύματα αυτά είναι ανεπιθύμητα και πρέπει να ακυρωθούν. Πράγματι, ένα πίσω κύμα το οποίο μπαίνει από το σημείο Β θα συναντήσει και μια άλλη εκδοχή του πίσω κύματος η οποία θα μπαίνει από το σημείο Α. Οι δυο αυτές εκδοχές του πίσω κύματος έχουν διανύσει διαφορετική απόσταση και μάλιστα παρουσιάζουν διαφορά φάσης ίση με 180 μοίρες με αποτέλεσμα το άθροισμά τους να είναι 0.

Ακριβώς επειδή διάφορες μηχανικές ατέλειες είναι δυνατό να υπάρχουν και να αποτρέπουν την ιδανική λειτουργία του συζευκτήρα που περιγράψαμε, ένα μικρό μέρος του πίσω κύματος πάντα φτάνει στη διάταξη μέτρησης και επομένως συνεκτιμάτε στον υπολογισμό της ισχύος. Η κατευθυντικότητα ενός συζευκτήρα, αποτελεί μια καθιερωμένη μεθοδολογία με την οποία είναι δυνατό να μετρήσουμε την συνεισφορά των πίσω κυμάτων στη μέτρηση της ισχύος. Αν θεωρήσουμε πως εμπρός και πίσω κύματα εισέρχονται στη βοηθητική γραμμή μεταφοράς με ίση ισχύ και έστω πως η διάταξη μέτρησης της ισχύος δίνει μια εκτίμηση του λόγου της ισχύος των εμπρός κυμάτων προς τα πίσω κύματα ίση με 30 dB. Τότε λέμε πως ο συζευκτήρας μας έχει κατευθυντικότητα ίση με 30 dB. Τέτοιες τιμές κατευθυντικότητας είναι αρκετά συνηθισμένες στην πράξη.

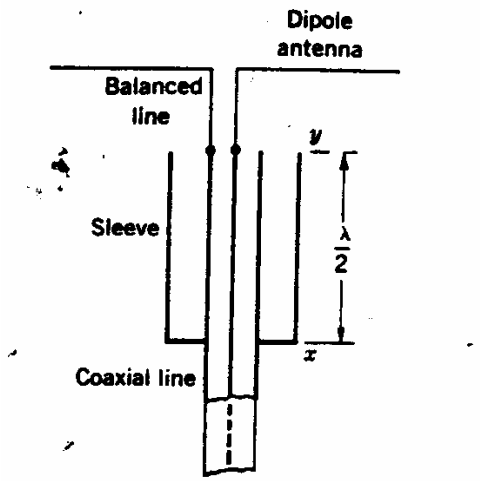
Μια άλλη σημαντική ποσότητα η οποία συνδέεται με τους κατευθυντικούς συζευκτήρες είναι η σύζευξη κατευθυντικότητας. Η παράμετρος αυτή ορίζεται ως ο

λόγος των εμπρός κυμάτων στην κεντρική γραμμή μεταφοράς προς τα εμπρός κύματα στην βοηθητική γραμμή. Τυπικές τιμές για την παράμετρο αυτή είναι 20 dB (1:100).

7-3.3 Baluns

Ένα balun, ή *bal*anced to *un*balanced μετασχηματιστής (transformer), είναι ένα κύκλωμα το οποίο χρησιμοποιείται για τη σύνδεση μιας balanced γραμμής σε μια unbalanced γραμμή ή κεραία. Ακόμα, συχνά χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση μιας unbalanced γραμμής (ομοαξονικής) σε μια balanced κεραία όπως είναι ένα δίπολο. Σε αρκετά χαμηλές συχνότητες ώστε να είναι εφικτό κάτι τέτοιο, ένας κοινός ρυθμιζόμενος μετασχηματιστής μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Ένας τέτοιος μετασχηματιστής θα πρέπει να έχει unbalanced πρωτεύουσα και center-tapped δευτερεύουσα περιέλιξη η οποία θα συνδέεται στην κεραία. Ο μετασχηματιστής θα πρέπει ακόμα να έχει ηλεκτροστατική θωράκιση συνδεμένη στη γείωση έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι επιδράσεις των παρασιτικών χωρητικοτήτων.

Για μεγαλύτερες συχνότητες υπάρχουν διάφορα είδη baluns για διαφορετικούς σκοπούς και για εφαρμογές ευρέως ή στενού φάσματος. Το πλέον συνηθισμένο balun, στενού φάσματος, θα περιγραφεί στην παράγραφο αυτή. Το συγκεκριμένο balun παρουσιάζεται σε τομή στο σχήμα 7.19. Το balun αυτό είναι γνωστό με τα ονόματα choke, sleeve ή bazooka balun.



Σχήμα 7-19 Choke (bazooka) balun

Από το σχήμα αυτό παρατηρούμε πως ένα κυλινδρικό περίβλημα περιβάλει την ομοαξονική γραμμή μεταφοράς και συνδέεται με τον εξωτερικό αγωγό της γραμμής στο σημείο x. Σε οποιοδήποτε σημείο y τότε του περιβλήματος, λ/4 μακριά από το σημείο x, η εμπέδηση που βλέπουμε κοιτώντας προς τη γραμμή μεταφοράς η οποία δημιουργείται από το περίβλημα και από τον εξωτερικό αγωγό της γραμμής μεταφοράς είναι άπειρη. Με άλλα λόγια, ο εξωτερικός αγωγός της γραμμής παύει να έχει μηδενική αγωγιμότητα προς τη γείωση στο σημείο y. Έτσι, ένα από τα καλώδια της balanced γραμμής μπορεί να συνδεθεί εκεί χωρίς φόβο βραχυκυκλώματος προς τη γείωση. Το δεύτερο καλώδιο της γραμμής μεταφοράς συνδέεται στον κεντρικό αγωγό της ομοαξονικής γραμμής. Έτσι, οποιοδήποτε balanced φορτίο, όπως μια απλή διπολική κεραία, μπορεί να συνδεθεί στη συνέχεια.

7-3.4 Γραμμή με σχισμή (Slotted Line)

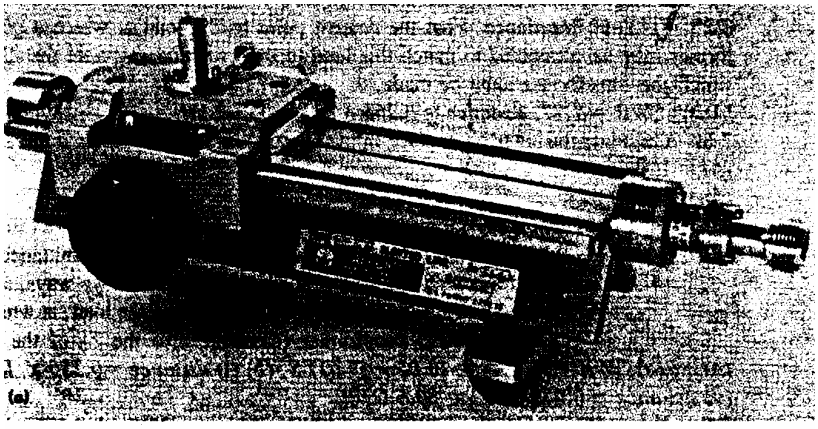
Εύκολα μπορούμε να καταλάβουμε πως ένα τμήμα μιας γραμμής μεταφοράς κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της τάσης ή του ρεύματος που το διαρρέει σε διάφορα σημεία κατά μήκος του, θα ήταν εξαιρετικά χρήσιμο σε περιπτώσεις που ενδιαφερόμαστε για μετρήσεις. Σε σχετικά χαμηλές συχνότητες, μέχρι 100 MHz, ένα ζεύγος παράλληλων καλωδίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί το οποίο να έχει ανάμεσα στα δυο καλώδια μια μετακινούμενη συσκευή μέτρησης. Μια τέτοια συσκευή μπορεί να μετακινείται εύκολα και μπορεί με συγκεκριμένες μηχανικές διατάξεις να μετρά την απόσταση του από τα άκρα των αγωγών. Ένα τέτοιο εξάρτημα ονομάζεται Lecher line, και το αντίστοιχο εξάρτημα για υψηλότερες συχνότητες ονομάζεται slotted line ή γραμμή με σχισμή.

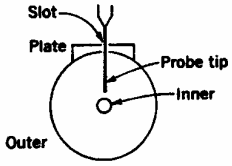
Η γραμμή με σχισμή αποτελείται από έναν ομοαξονικό αγωγό κατά μήκος του οποίου υπάρχει μια σχισμή η οποία κόβει τον εξωτερικό αγωγό της γραμμής και έχει βάθος τόσο ώστε να πλησιάζει τον κεντρικό αγωγό της γραμμής. Ένα επίπεδο πιάτο εφάπτεται στον εξωτερικό αγωγό. Στο πλάι της συσκευής υπάρχει ένας κανόνας ώστε να μετράται η απόσταση του αισθητήρα από τα άκρα της συσκευής. Μέσα στη σχισμή μετακινείται ένα μεταλλικό στέλεχος το οποίο πλησιάζει αλλά δεν ακουμπά τον κεντρικό αγωγό της γραμμής. Με τον τρόπο αυτό, το στέλεχος και ο εσωτερικός αγωγός βρίσκονται σε επαγωγική σύζευξη έτσι ώστε να μπορεί να γίνει μέτρηση χωρίς να επηρεάζεται η γραμμή μεταφοράς. Ένα τέτοιο εξάρτημα θα πρέπει να συνδέεται σε σειρά με γραμμές μεταφοράς ίδιας χαρακτηριστικής αντίστασης. Ακόμα θα πρέπει να έχει μήκος κατά λίγο μεγαλύτερο από το μήκος κύματος της ελάχιστης συχνότητας στην οποία θα θέλουμε να κάνουμε μετρήσεις.

Η βασική χρήση της γραμμής με σχισμή είναι η εύρεση της θέσης και της τάσης κόμβων δυναμικού χωρίς να επηρεάζει σημαντικά το σύστημα το οποίο μετράει. Επιπροσθέτως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις:

1. Εμπέδησης φορτίου
2. SWR
3. Της συχνότητας του πομποδέκτη

Σε κάθε περίπτωση υπάρχουν οδηγίες μέτρησης σχετικές με το μηχάνημα που χρησιμοποιείται και τη μετρούμενη ποσότητα.





Σχήμα 7-20 (α) Μικροκυματική Slotted Line (β) Slotted Line (cross section)