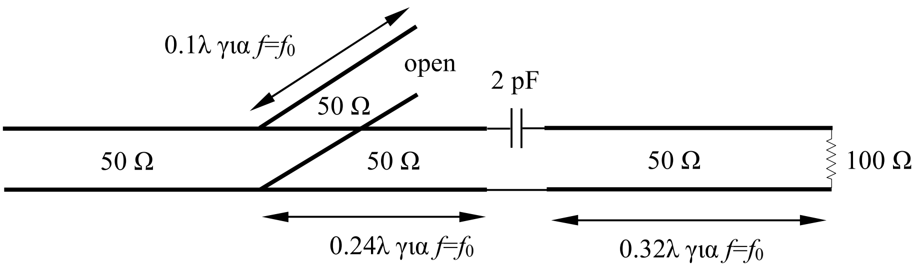
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΥΨΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ

ΣΕΙΡΑ ΑΣΚΗΣΕΩΝ 1/2 – ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ
Ημερομηνία παράδοσης: 2/5/2024

1.1. Ανάλυση κυκλώματος γραμμής μεταφοράς - Διάγραμμα Smith

Δίνεται το παρακάτω κύκλωμα TEM γραμμής μεταφοράς χαρακτηριστικής αντίστασης 50 Ω που λειτουργεί σε συχνότητα f_0 = 1 GHz (έστω λ το μήκος κύματος στη γραμμή μεταφοράς για τη συχνότητα αυτή).
(α) Υπολογίστε το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης και τον SWR στην είσοδο, για τη συχνότητα f_0, με το διάγραμμα του Smith.
(β) Κάντε το ίδιο για συχνότητα $4f_0/3$. (Προσοχή: αλλάζει το μήκος κύματος, όχι το φυσικό μήκος των γραμμών).
(γ) Αν η γραμμή δεν ήταν TEM (ή quasi-TEM) τί πληροφορία θα χρειαζόσασταν για να κάνετε τον υπολογισμό στο (β);



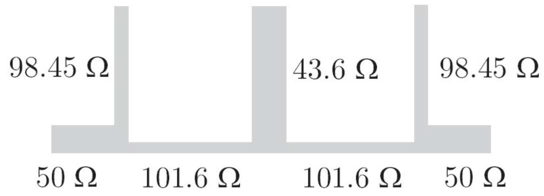
1.2. Ανάλυση κυκλωμάτων γραμμών μεταφοράς στο πεδίο της συχνότητας

(α) Χρησιμοποιώντας όποια προγραμματιστική πλατφόρμα προτιμάτε (Matlab, Python κλπ), υπολογίστε αναλυτικά και κάντε ένα γράφημα του μέτρου του συντελεστή ανάκλασης, σε καθαρό αριθμό και σε dB, σε όλη τη ζώνη συχνοτήτων από 0 έως $4f_0$ (σε N=201 τιμές συχνότητας) για το κύκλωμα της άσκησης 1.1. Επαληθεύστε από το γράφημα τους υπολογισμούς που κάνατε στο 1.1.
Υπόδειξη Α: Θα πρέπει πρώτα να εκφράσετε τη σταθερά διάδοσης σαν συνάρτηση της συχνότητας. Θυμηθείτε ότι $\beta(f)l = (\omega / \upsilon_p)l = 2\pi fl / \upsilon_p$ όπου π.χ. για τη γραμμή μεταφοράς με μήκος $l = 0.32\lambda$ για $f = f_0$ είναι $l = 0.32\upsilon_p / f_0$, συνεπώς το όρισμα της εφαπτομένης θα είναι $\beta(f)l = 2\pi f(0.32\upsilon_p / f_0) / \upsilon_p = 0.32 \times 2\pi f / f_0$.
Υπόδειξη Β: Αν χρησιμοποιήσετε το MATLAB μπορείτε π.χ. να ορίσετε ένα διάνυσμα τιμών της συχνότητας, π.χ.

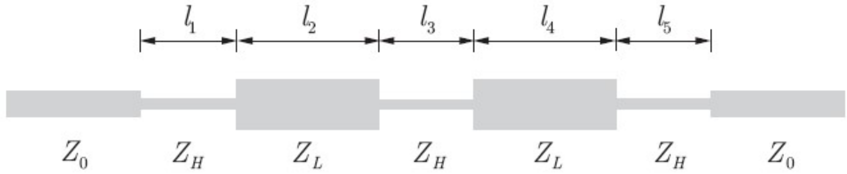
```
f = 0:(4*f0/N):(4*f0);
```

και να υπολογίστε το μέτρο του Γ, αφού πρώτα υπολογίσετε την αντίσταση εισόδου (αμέσως αριστερά του πυκνωτή εισόδου) από τις αναλυτικές σχέσεις, χρησιμοποιώντας διανυσματικές πράξεις (υπενθυμίζεται ότι στο MATLAB μπορούμε να κάνουμε πράξεις μεταξύ διανυσμάτων βάζοντας την τελεία πριν από το σύμβολο της πράξης, π.χ. το A.*B δίνει έναν πίνακα με στοιχεία τα γινόμενα των στοιχείων των πινάκων A και B που έχουν ίδιες διαστάσεις). Σε περίπτωση που δεν σας είναι εύκολος αυτός ο τρόπος, χρησιμοποιήστε ένα απλό βρόχο for. Για να είναι ευανάγνωστο το διάγραμμα σε dB κρατήστε μόνο τις τιμές πάνω από κάποιο κατώφλι που μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν μηδέν (π.χ. -40 ή -60 dB) και όλες τις τιμές χαμηλότερές του θέστε τις ίσες με αυτό.

(β) Με αντίστοιχο τρόπο, βρείτε την απόκριση συχνότητας του φίλτρου του σχήματος. Ένα φίλτρο είναι, ως γνωστόν, ένα δίθυρο κύκλωμα το οποίο εξασφαλίζει διέλευση του σήματος σε κάποιες περιοχές συχνοτήτων και αποκοπή σε άλλες. Σε μικροκυματικές συχνότητες, υλοποιούνται συνήθως με τμήματα γραμμών μεταφοράς. Στο σχήμα φαίνεται μια πραγματική υλοποίηση του φίλτρου σε κύκλωμα μικροταινίας (κάτοψη) όπου με γκρίζο χρώμα φαίνονται τα μεταλλικά στοιχεία στην πάνω όψη της διηλεκτρικής πλάκας. Στο παράδειγμα αυτό όλα τα τμήματα γραμμών μεταφοράς, εκτός από τις γραμμές μεταφοράς στην είσοδο και στην έξοδο, των οποίων το μήκος δεν προσδιορίζεται, έχουν μήκος λ/8 σε μια συχνότητα 1 GHz (θεωρούμε ότι η μικροταινία είναι πρακτικά γραμμή TEM, δηλ. η φασική ταχύτητα στη γραμμή μεταφοράς είναι ανεξάρτητη της συχνότητας και θεωρείται γνωστή). Η χαρακτηριστική αντίσταση κάθε τμήματος γ. μ. σημειώνεται στο σχήμα. Το παραπάνω κύκλωμα τερματίζεται σε προσαρμοσμένο φορτίο (50 Ω). Τα διακλαδισμένα τμήματα γραμμών μεταφοράς (κλαδωτές) είναι ανοιχτοκυκλωμένα.
Ζωγραφίστε το κυκλωματικό ισοδύναμο γραμμής μεταφοράς του κυκλώματος. Γράψτε ένα μικρό κώδικα (π.χ. Matlab, Python, κλπ) για την ανάλυσή του, με σκοπό την εύρεση του μέτρου του συντελεστή ανάκλασης στην είσοδο. Ειδικότερα, απεικονίστε το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης (σε dB) καθώς και τον SWR στην είσοδο, στη ζώνη συχνοτήτων 0-3 GHz. Τιμές του συντελεστή ανάκλασης κάτω από -60 dB θέστε τις ίσες με -60 dB, όπως και τιμές του SWR πάνω από 10 θέστε τις ίσες με 10. Συμπεράνετε τί είδους φίλτρο είναι το κύκλωμα.



(γ) Κάντε το ίδιο και για το κύκλωμα του παρακάτω σχήματος, στη ζώνη συχνοτήτων 0-2 GHz.



Το κύκλωμα αυτό, επίσης σε υλοποίηση μικροταινίας (κάτοψη), αποτελείται από εναλλασσόμενα τμήματα, υψηλής και χαμηλής χαρακτηριστικής αντίστασης που παρεμβάλλονται μεταξύ γραμμών Z_0 = 50 Ω. Η κεντρική συχνότητα σχεδίασης του φίλτρου είναι το 1 GHz. Είναι Z_H = 150 Ω και Z_L = 20 Ω, ενώ τα «ηλεκτρικά μήκη» των επιμέρους τμημάτων στη συχνότητα του 1 GHz είναι βl_1 = 21.903°, βl_2 = 31.426°, βl_3 = 37.720°, βl_4 = 31.426°, βl_5 = 21.903°. Το κύκλωμα τερματίζεται σε προσαρμοσμένο φορτίο (50 Ω).

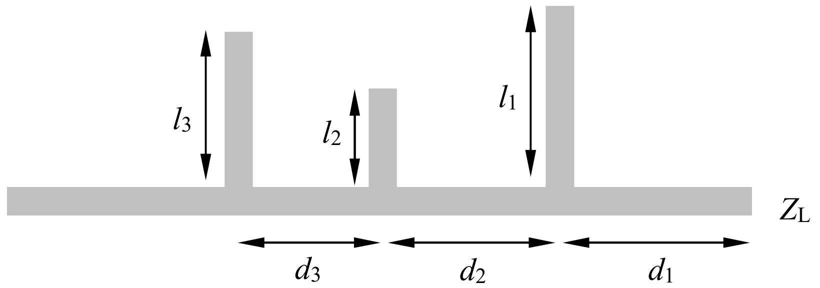
1.3. Συζυγής προσαρμογή – Διάγραμμα Smith

Φορτίο Z_L τροφοδοτείται από μικροκυματική γεννήτρια τάσης rms V_s και εσωτερικής αντίστασης Z_g μέσω γ.μ. χαρακτηριστικής αντίστασης Z_0, χωρίς τη χρήση απομονωτή. Επιδιώκουμε τη μέγιστη δυνατή μεταφορά ισχύος στο φορτίο, στη συχνότητα του 1 GHz, γι' αυτό θεωρούμε ότι στην είσοδο ή την έξοδο της γραμμής θα παρεμβληθεί κατάλληλο κυκλωματικό στοιχείο (πυκνωτής).
(α) Έστω Z_0 = 50 Ω, Z_L = 10+j15 Ω, Z_g = 50-j40 Ω, V_s = 1V. Για να πετύχουμε τη συνθήκη προσαρμόζουμε κατάλληλα το μήκος l της γραμμής μεταφοράς και παρεμβάλλουμε πυκνωτή κατάλληλης χωρητικότητας συνδεδεμένο είτε σε σειρά είτε παράλληλα, στο φορτίο ή στην είσοδο της γραμμής. Εξετάστε και τις τέσσερις αυτές λύσεις και υπολογίστε για καθεμιά το κατάλληλο μήκος γραμμής και τη χωρητικότητα του πυκνωτή. Χρησιμοποιήστε το διάγραμμα του Smith.
(β) Υπολογίστε την ισχύ στο φορτίο.
(γ) Για καθένα από τα δύο αυτά κυκλώματα προσαρμογής που βρήκατε στο (α), κάντε ένα γράφημα της ισχύος στο φορτίο συναρτήσει της συχνότητας για 201 συχνότητες από 0 έως 2 GHz. Συμπεράνετε ποιο από τα δύο παρέχει καλύτερο εύρος ζώνης.

1.4. Πολλαπλός κλαδωτής

Η χρήση κλαδωτών μπορεί, εκτός από τη σχεδίαση φίλτρων, να εξυπηρετήσει την επίτευξη προσαρμογής και σε σημαντικά καλύτερο εύρος ζώνης, σε σχέση π.χ. με έναν απλό κλαδωτή. Έστω για παράδειγμα οι τρεις κλαδωτές μικροταινίας του σχήματος (σε παράλληλη σύνδεση με την κύρια γραμμή), οι οποίοι είναι ανοιχτοκυκλωμένοι και με χαρακτηριστική αντίσταση ίση με αυτήν της κύριας γραμμής (50Ω). Η απόσταση του πρώτου κλαδωτή από το φορτίο $\boldsymbol{Z_L = 120 + j60\ \Omega}$ είναι d_1. Θέλουμε να προσδιορίσουμε τις παραμέτρους d_1, d_2, d_3, l_1, l_2, l_3, ώστε να έχουμε καλή προσαρμογή ($|\Gamma|\leq 0.3$) σε όσο το δυνατό μεγαλύτερο εύρος ζώνης, γύρω από μια κεντρική συχνότητα f_0. Οι παράμετροι θα υπολογιστούν ως πολλαπλάσια του μήκους κύματος λ στη γραμμή μεταφοράς στην κεντρική συχνότητα f_0 (χωρίς βλάβη της γενικότητας θα μπορούσατε να θέσετε λ=1).

Αν και είναι δυνατή η χρήση μαθηματικών μεθοδολογιών, θα προσπαθήσουμε εδώ να εφαρμόσουμε τις πιο σύγχρονες υπολογιστικές τεχνικές βελτιστοποίησης, μέσω αλγορίθμων βελτιστοποίησης.



(α) Φτιάξτε μια συνάρτηση Matlab με είσοδο ένα διάνυσμα p (θα είναι το διάνυσμα των παραμέτρων της βελτιστοποίησης [d_1 d_2 d_3 l_1 l_2 l_3]), η οποία θα υπολογίζει το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης (σε καθαρό αριθμό) στην είσοδο του κυκλώματος, σε μια ζώνη συχνοτήτων. Ορίστε ένα διάνυσμα κανονικοποιημένης συχνότητας (f/f_0) και δώστε τιμές από 0.5 έως 1.5 (που αντιστοιχεί σε ζώνη συχνοτήτων 0.5 f_0 έως 1.5 f_0):

normf = (0.5:0.01:1.5)´;

Υπολογίστε έτσι το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης στην είσοδο για όλες τις παραπάνω κανονικοποιημένες συχνότητες (αφού γράψετε σωστά πώς μεταβάλλεται η σταθερά διάδοσης με την κανονικοποιημένη συχνότητα). Στη συνέχεια ορίστε η συνάρτηση να επιστρέφει το μέσο όρο του $|\Gamma|$ στη ζώνη συχνοτήτων που ορίσατε. Αυτό θα χρησιμοποιηθεί ως ένα «μέτρο» του πόσο καλή είναι η προσαρμογή στη ζώνη αυτή και θα προσπαθήσουμε να το ελαχιστοποιήσουμε.

(β) Χρησιμοποιώντας το έτοιμο εργαλείο βελτιστοποίησης γενετικού αλγορίθμου του Matlab (είναι μέρος του γενικότερου εργαλείο βελτιστοποίησης optimtool), προσπαθήστε να ελαχιστοποιήσετε το παραπάνω «μέτρο προσαρμογής». Δώστε στο fitness function το όνομα της συνάρτησης (που θα την έχετε αποθηκεύσει φυσικά σε αρχείο με το ίδιο όνομα), βάζοντας μπροστά το @. Δώστε στο Number of variables τον αριθμό 6. Καθορίστε στα bounds (lower) το διάνυσμα των ελάχιστων τιμών των έξι μεταβλητών (να είναι όλες θετικές και για λόγους δυνατότητας κατασκευής, τα d_2 και d_3 να μην είναι μικρότερα από 0.05λ). Για upper bounds δώστε άνω όρια σε όλες τις μεταβλητές ίσα με λ (μονάδες). Επιλέξτε στα plots να σας εμφανίζει το Best fitness και ξεκινήστε τη βελτιστοποίηση (Start). Μετά το τέλος, θα σας εμφανίσει το διάνυσμα των βέλτιστων παραμέτρων, το οποίο μπορείτε να κάνετε Export to Workspace. Για καλύτερα αποτελέσματα μπορείτε να αυξήσετε το Population Size (π.χ. από 20 σε 200) και στα Stopping criteria να αυξήσετε το πλήθος των γενεών (π.χ. Generations από 100 σε 1000, Stall generations από 50 σε 500 και Stall time limit από 20 σε 200).

(γ) Κάνοντας Export to Workspace το βέλτιστο σετ παραμέτρων, απεικονίστε το διάγραμμα του μέτρου του συντελεστή ανάκλασης (σε καθαρό αριθμό) σε μια ζώνη από 0.01 f_0 έως 2 f_0 :

normf = (0.01:0.01:2)´;

Για το σκοπό αυτό μπορείτε να χρησιμοποιήσετε ένα αντίγραφο της συνάρτησης που φτιάξατε στο (α) η οποία θα δέχεται σαν είσοδο το διάνυσμα βέλτιστων παραμέτρων και θα ζωγραφίζει το αποτέλεσμα.

(δ) Προσπαθήστε να κάνετε βελτιστοποίηση προσπαθώντας να μειώσετε το μέσο συντελεστή ανάκλασης σε όλη την περιοχή από 0.01 f_0 έως 2 f_0.

(ε) Επαναλάβετε το (δ) για φορτίο $\boldsymbol{Z_L = 20 + j30\ \Omega}$ και μετά για φορτίο $\boldsymbol{Z_L = 180 - j200\ \Omega}$.

Σημείωση: Η παραπάνω διαδικασία, αν και εφαρμόστηκε σε ένα απλό κύκλωμα που η απόκρισή του υπολογίζεται μέσω μιας απλής αναλυτικής έκφρασης, θεωρείται state-of-the-art στη σύγχρονη τεχνολογία σχεδίασης (design) σε πλήθος τεχνολογικών εφαρμογών.

Υπόδειξη: Μπορείτε αντί του γενετικού αλγορίθμου να χρησιμοποιήσετε οποιοδήποτε άλλη μέθοδο εξελικτικής ή μεταευρετικής (metaheuristic) βελτιστοποίσης, όπως π.χ. οι αλγόριθμοι grey wolf ή jaya. Αυτοί οι αλγόριθμοι είναι νεώτεροι και απλούστεροι και σε πολλές περιπτώσεις πιο γρήγοροι και αποτελεσματικοί. Έτοιμους και πολύ εύχρηστους κώδικες Matlab μπορείτε να βρείτε στο Mathworks, π.χ.
https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/47258-grey-wolf-optimizer-toolbox
https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/74004-jaya-a-simple-and-new-optimization-algorithm
Αντίστοιχα, μπορείτε να βρείτε σχετικούς κώδικες και σε Python.