



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Μικροκυματικές διατάξεις

Ενότητα 2: Μικροκυματικά φίλτρα

Σταύρος Κουλουρίδης

Πολυτεχνική

Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας

Υπολογιστών

Σκοποί ενότητας

- Περιγραφή κλασσικών φίλτρων
- Εισαγωγή τεχνικών σχεδίασης μικροκυματικών φίλτρων



Περιεχόμενα ενότητας

- Περιγραφή κλασσικού φίλτρου
- Μικροκυματικά φίλτρα



Εισαγωγή

- Τα φίλτρα είναι δίθυρες διατάξεις που επιτρέπουν σε ένα σύστημα να έχει επιλεκτική ως προς τη συχνότητα συμπεριφορά.
- Κατηγορίες φίλτρων:
 - ❑ Χαμηλοπερατά (lowpass): επιτρέπουν τη διάβαση σημάτων συχνότητας κάτω από μια ορισμένη τιμή.
 - ❑ Υψιπερατά (highpass): επιτρέπουν τη διάβαση σημάτων συχνότητας πάνω από μια ορισμένη τιμή.
 - ❑ Ζωνοπερατά (bandpass): επιτρέπουν τη διάβαση σημάτων που βρίσκονται σε μια ορισμένη περιοχή συχνοτήτων.
 - ❑ Ζωνοφρακτικά (bandstop): αποκόπτουν σήματα που βρίσκονται σε μια ορισμένη περιοχή συχνοτήτων.
- Τα μικροκυματικά φίλτρα διαφέρουν στο ότι κατασκευάζονται με κατανεμημένα στοιχεία

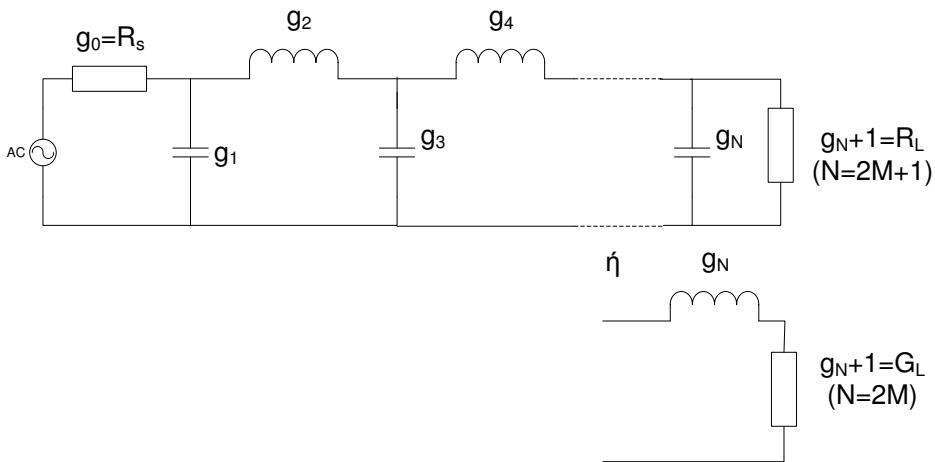


Περιγραφή κλασσικού φίλτρου

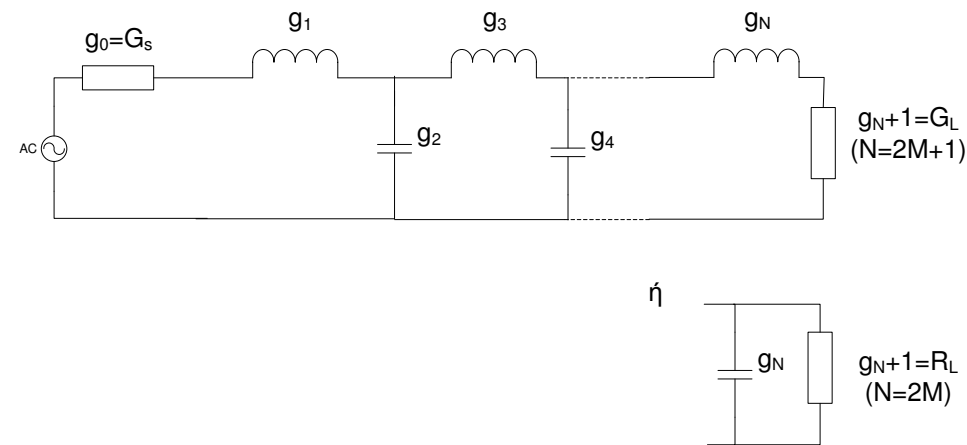
- Αν το φίλτρο κατασκευάζεται από παθητικά στοιχεία (πηνία, πυκνωτές) τότε για την περιγραφή του αρκεί η συνάρτηση μεταφοράς $S_{21}(j\omega)$
- Συνήθως μας ενδιαφέρει μόνο η συνάρτηση μεταφοράς ισχύος
$$|S_{21}(j\omega)|^2 = \frac{1}{L(\omega)} = \frac{1}{1+k^2 F_N^2(\omega)}$$
- $L(\omega)$: απώλειες εισαγωγής ισχύος (μονάδα στη ζώνη διάβασης, άπειρες στη ζώνη αποκοπής)
- $F_N(\omega)$: Χαρακτηριστική συνάρτηση του φίλτρου (μηδέν στη ζώνη διάβασης, άπειρη στη ζώνη αποκοπής)
- Η σχεδίαση ανάγεται στον υπολογισμό των k και $F_N(\omega)$ ώστε να τηρούνται συγκεκριμένες προδιαγραφές.



Πρότυπο χαμηλοπερατό φίλτρο



Σχήμα 2.2α



Σχήμα 2.2β

Οι δύο διαφορετικές κυκλωματικές αναπαραστάσεις του πρότυπου χαμηλοπερατού φίλτρου



Φίλτρα Butterworth

• $|S_{21}(j\omega)|^2 = \frac{1}{L(\omega)} = \frac{1}{1+k^2\Omega^{2N}}$, N η τάξη του φίλτρου (πλήθος κυκλωματικών στοιχείων) και Ω η κανονικοποιημένη συχνότητα.

• Προδιαγραφές:

- ❑ Απώλειες εισαγωγής 3 dB στη συχνότητα αποκοπής ($k = 1$)
- ❑ Δεδομένες απώλειες εισαγωγής ισχύος L_s σε μια συχνότητα Ω_s μεγαλύτερη της συχνότητας αποκοπής ($N \geq \frac{\log(L_s-1)}{2 \log \Omega_s}$)
- Έχουν την ομαλότερη δυνατή απόκριση
- $g_0 = 1$,
- $g_N = 2 \sin\left(\frac{2n-1}{2N}\pi\right)$, $n = 1, \dots, N$
- $g_{N+1} = 1$



Φίλτρα Chebyshev

- Επιτρέπουν μια κυμάτωση στη ζώνη διάβασης ώστε να επιτευχθεί πιο απότομη μεταβολή από τη ζώνη διάβασης στη ζώνη αποκοπής

- $|S_{21}(j\omega)|^2 = \frac{1}{L(\Omega)} = \frac{1}{1+k^2T_N^2(\Omega)}$, T_N το πολυώνυμο Chebyshev τάξης N .

- Η μέγιστη κυμάτωση L_r προσδιορίζει το k ($k = \sqrt{L_r - 1}$)

- Η τάξη προσδιορίζεται από την προδιαγραφή της απώλειας εισαγωγής ισχύος

L_s σε μια συχνότητα Ω_s ($N \geq \frac{\cosh^{-1} \sqrt{L_s - 1}}{\cosh^{-1} \Omega_s}$)

- $g_0 = 1, g_1 = \frac{2}{\gamma} \sin \frac{\pi}{2N}$,

- $g_n = \frac{1}{g_{n-1}} \frac{4 \sin\left(\frac{2n-1}{2N}\pi\right) \sin\left(\frac{2n-3}{2N}\pi\right)}{\gamma^2 + \sin^2\left(\frac{n-1}{N}\pi\right)}, n = 2, \dots, N$

- $g_{N+1} = \begin{cases} 1, & N = 2M + 1 \\ \coth^2 \frac{\beta}{4}, & N = 2M \end{cases}$ όπου $\beta \ln[\coth(L_r(dB)/17.37)]$ και $\gamma = \sinh \frac{\beta}{2N}$



Ελλειπτικά φίλτρα

- Επιτρέπουν κυμάτωση και στη ζώνη αποκοπής
- Δυνατότητα καλύτερου ελέγχου της κλίσης της χαρακτηριστικής στη συχνότητα αποκοπής
- Δε μπορούν να υλοποιηθούν με τα απλά κλιμακωτά κυκλώματα που αναφέρθηκαν, αλλά με την αντικατάσταση των πηνίων σειράς από παράλληλο συνδυασμό πηνίου-πυκνωτή και των παράλληλων πυκνωτών από σε σειρά συνδυασμό πυκνωτή και πηνίου



Γκαουσιανά φίλτρα

- Έχουν ως στόχο την ελάχιστη δυνατή παραμόρφωση συχνότητας του σήματος.
- Επιδιώκεται όσο το δυνατό πιο σταθερή καθυστέρηση ομάδας (group delay) $\tau_d(\Omega)$, δηλαδή όσο το δυνατό πιο γραμμική φάση.

$$\bullet \tau_d(\Omega) = - \frac{d\text{Arg}\{S_{21}(j\Omega)\}}{d\Omega}$$

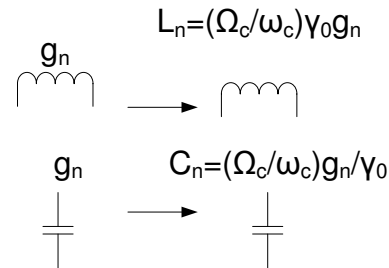


Μετασχηματισμοί φίλτρων

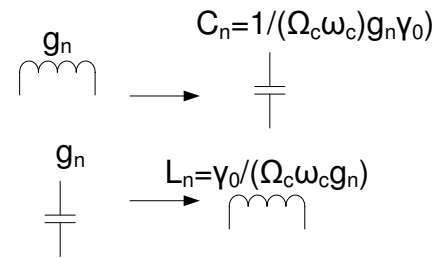
- Έχοντας ως βάση το πρότυπο χαμηλοπερατό κανονικοποιημένο φίλτρο, με κατάλληλους μετασχηματισμούς συχνότητας και αντίστασης μπορεί να σχεδιαστεί οποιοδήποτε φίλτρο.
- Αν το φίλτρο του σχήματος 2.2α συνδεθεί σε πηγή εσωτερικής αντίστασης Z_0 , η **προσαρμογή** απαιτεί έναν παράγοντα κλιμάκωσης $\gamma_0 = Z_0/g_0$
- Αντίστοιχα για το φίλτρο του σχήματος 2.2β, αν συνδεθεί σε πηγή εσωτερικής αγωγιμότητας Y_0 , $\gamma_0 = g_0/Y_0$
- Έτσι για να έχω προσαρμογή στην αντίσταση Z_0 κάθε κυκλωματικό στοιχείο αντικαθίσταται ως εξής $L \rightarrow \gamma_0 L$, $C \rightarrow C/\gamma_0$, $R \rightarrow \gamma_0 R$, $G \rightarrow G/\gamma_0$



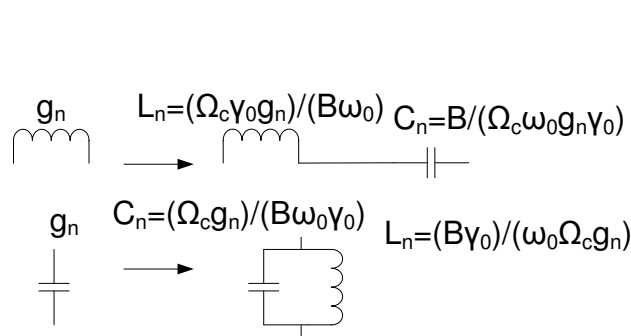
Μετασχηματισμοί κυκλωματικών στοιχείων του πρότυπου φίλτρου



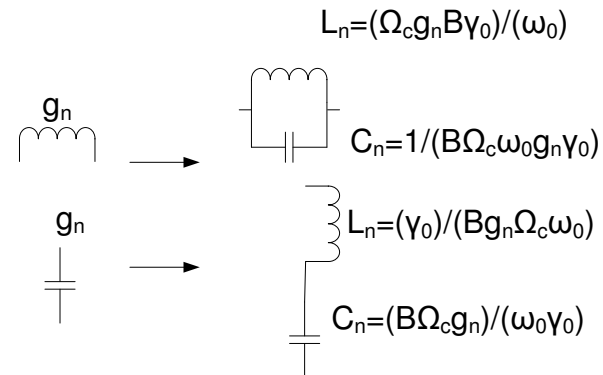
α) μετασχηματισμοί σε στοιχεία χαμηλοπερατού φίλτρου



β) μετασχηματισμοί σε στοιχεία υψιπερατού φίλτρου



γ) μετασχηματισμοί σε στοιχεία ζωνοπερατού φίλτρου



δ) μετασχηματισμοί σε στοιχεία ζωνοφρακτικού φίλτρου

$$B = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} \text{ και } \omega_0 = \sqrt{\omega_1 \omega_2}$$



Υλοποίηση μικροκυματικών φίλτρων- Μετασχηματισμός Richard

- Ο μετασχηματισμός Richard βασίζεται στην αντικατάσταση των συγκεκριμένων κυκλωματικών στοιχείων με βραχυκυκλωμένες και ανοιχτοκυκλωμένες γραμμές.
- Πχ. βραχυκυκλωμένη γραμμή μήκους ℓ : $Z_{in} = jZ_0 \tan \beta\ell = jZ_0 \tan \frac{\omega\ell}{v_p} \cong jZ_0 \frac{\omega\ell}{v_p} = j \frac{Z_0\ell}{v_p} \omega$. Αν λοιπόν η γραμμή έχει μικρό μήκος (πρακτικά ως $\lambda/8$) τότε αυτή έχει συμπεριφορά παρόμοια με ένα πηνίο, και συνεπώς μπορεί να το αντικαταστήσει
- Αντίστοιχα για ανοιχτοκυκλωμένη γραμμή μικρού μήκους :
$$Y_{in} = jY_0 \tan \beta\ell = jY_0 \tan \frac{\omega\ell}{v_p} = j\Omega C$$

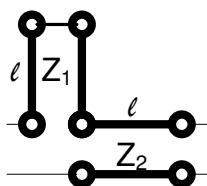


Ταυτότητες Kuroda-Γενικά

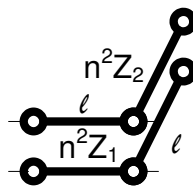
- Σε επίπεδο φυσικής υλοποίησης είναι πιθανό να επιθυμούμε κλαδωτές συγκεκριμένου τρόπου σύνδεσης (σε σειρά ή παράλληλα) ή τύπου (βραχυκυκλωμένοι ή ανοιχτοκυκλωμένοι) και επίσης να συνδέουμε τους διάφορες κλαδωτές με τμήματα γραμμών μεταφοράς
- Τη δυνατότητα αυτή μας δίνουν οι ταυτότητες Kuroda οι οποίες είναι ισοδυναμίες κυκλωμάτων που αποτελούνται από έναν κλαδωτή και ένα τμήμα γραμμής μεταφοράς



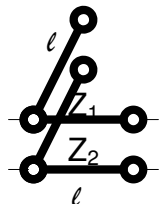
Οι 4 ταυτότητες Kuroda



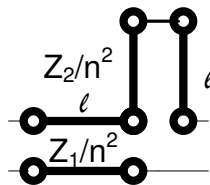
≡



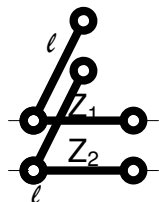
α) Μετασχηματισμός
βραχυκυκλωμένου κλαδωτή και
τμήματος γραμμής σε τμήμα γραμμής
και παράλληλο ανοιχτοκυκλωμένο
κλαδωτή



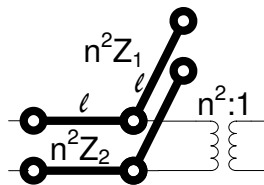
≡



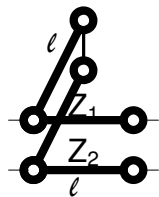
β) Αντίστροφος μετασχηματισμός



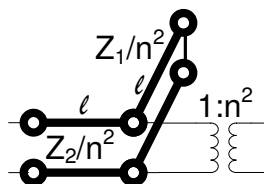
≡



γ) μετάθεση ανοιχτοκυκλωμένου
κλαδωτή σειράς



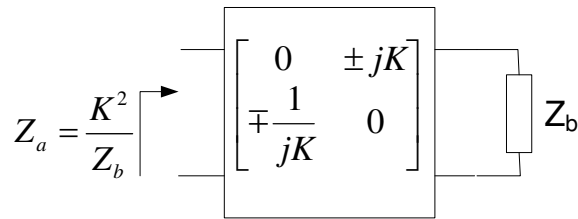
≡



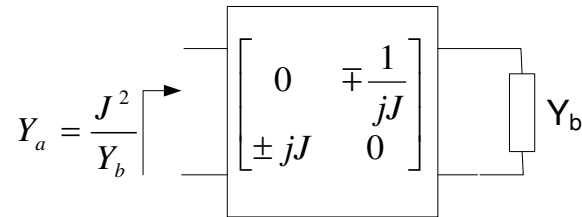
δ) μετάθεση παράλληλου
βραχυκυκλωμένου κλαδωτή



Αντιστροφείς σύνθετων αντιστάσεων-αγωγιμοτήτων



α)



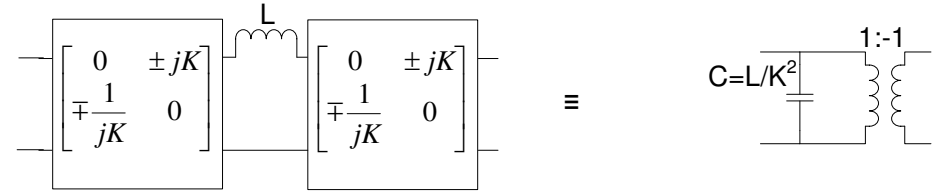
β)

Οι αντιστροφείς σύνθετων αντιστάσεων α) και σύνθετων αγωγιμοτήτων β) είναι δίθυρα στοιχεία που αντιστρέφουν στην είσοδο τους, τη σύνθετη αντίσταση που συνδέεται στην έξοδο τους. Το πιο απλό παράδειγμα αντιστροφέα είναι ο μετασχηματιστής γραμμής $\lambda/4$.

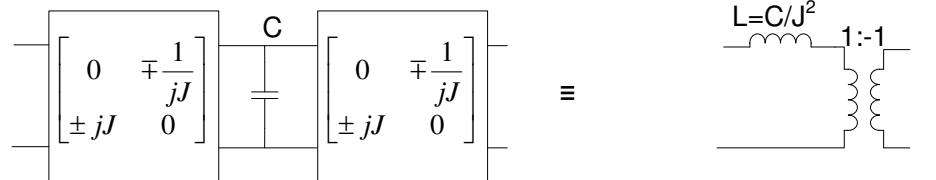


Χρήση των αντιστροφών σε μικροκυματικά φίλτρα

Οι αντιστροφείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετατρέψουν ένα πηνίο σειράς σε παράλληλη χωρητικότητα (σχήμα α) ή ένα παράλληλο πυκνωτή σε πηνίο σειράς (σχήμα β)



(α)

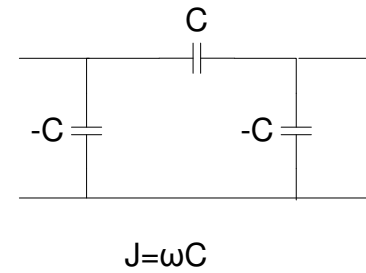
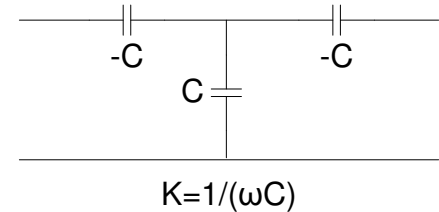
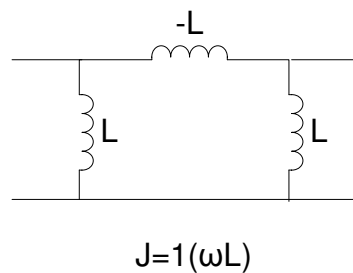
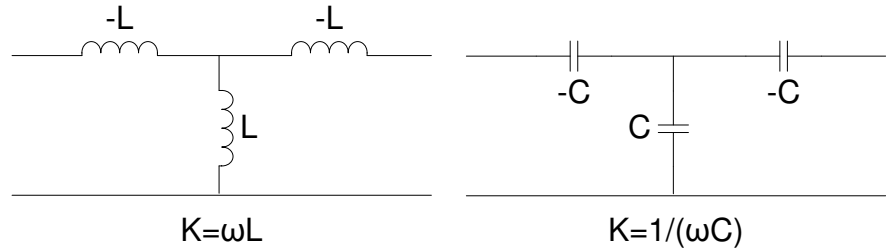


(β)

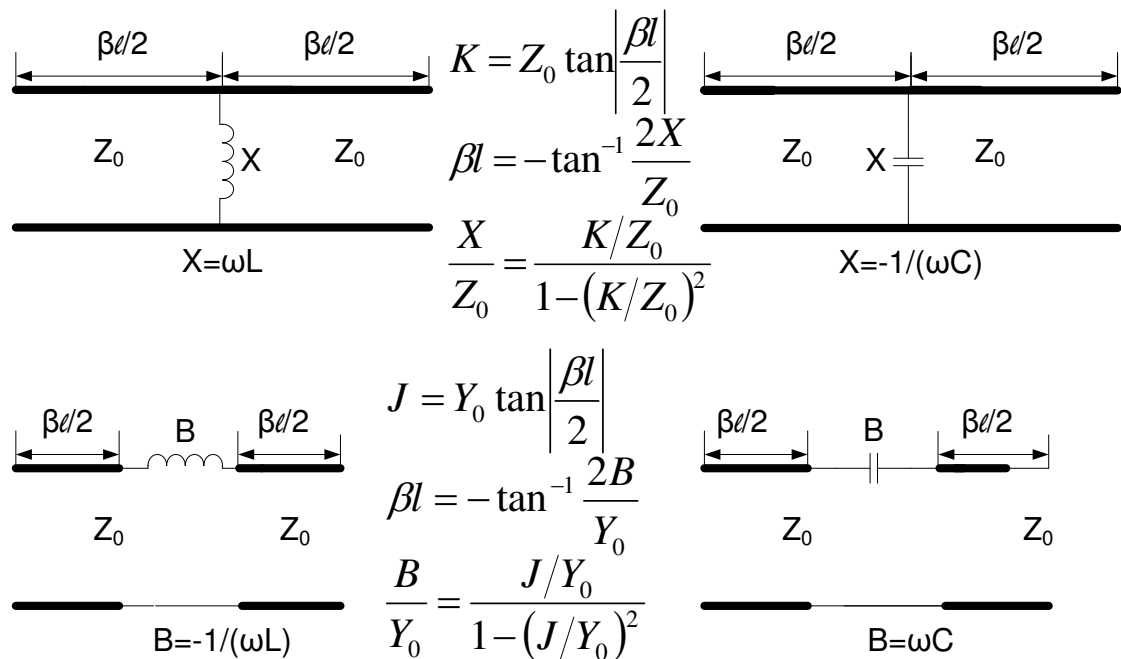


Φυσική υλοποίηση αντιστροφών με κυκλωματικά στοιχεία

Τα στοιχεία αρνητικής αυτεπαγωγής και αρνητικής χωρητικότητας δεν υλοποιούνται άμεσα, αλλά μπορούν να συμψηφιστούν με παράπλευρα στοιχεία στο υπόλοιπο κύκλωμα καταλήγοντας σε φυσικά υλοποιήσιμες εκδοχές



Αντιστροφείς με κυκλωματικά στοιχεία και γραμμές μεταφοράς

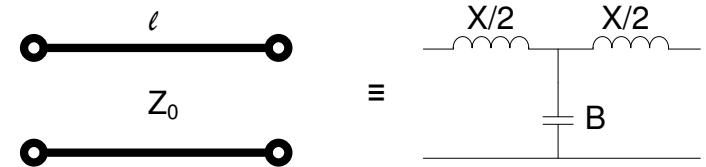


Τα αρνητικά μήκη γραμμών στην πράξη συμψηφίζονται με γειτονικά τους θετικά, οδηγώντας σε φυσικά υλοποιήσιμα κυκλώματα

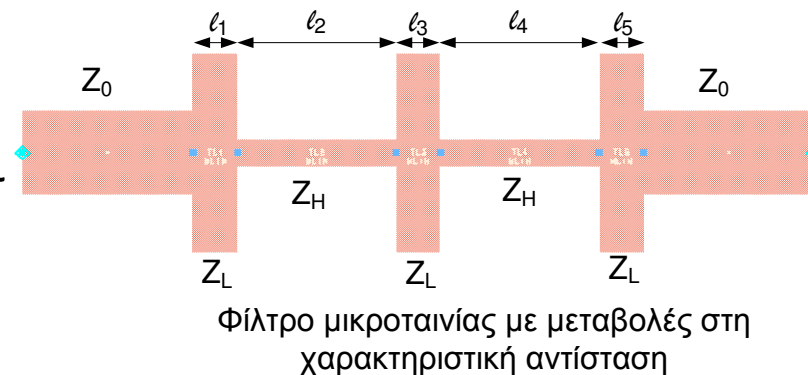


Χαμηλοπερατά φίλτρα με μεταβολές στη χαρακτηριστική αντίσταση των γραμμών

- $\frac{X}{2} = Z_0 \tan \frac{\beta l}{2}, B = \frac{1}{Z_0} \sin \beta l$
- Για μικρά μήκη ($\beta l < \pi/4$) $X \cong Z_0 \beta l,$
 $B \cong \frac{\beta l}{Z_0}$
- $L \cong \frac{X}{\omega} = \frac{Z_0 \beta l}{\omega}, C \cong \frac{B}{\omega} = \frac{\beta l}{\omega Z_0}$
- Συνεπώς τα πηνία σειράς μπορούν να αντικατασταθούν από γραμμές προεπιλεγμένης υψηλής χαρακτηριστικής αντίστασης Z_H και μήκους $\beta l_H = \frac{\omega L}{Z_H}$, ενώ οι παράλληλοι πυκνωτές από γραμμές χαμηλής χαρακτηριστικής αντίστασης Z_L και μήκους $\beta l_L = \omega C Z_L$



Τμήμα γραμμής μεταφοράς και T-ισοδύναμο του

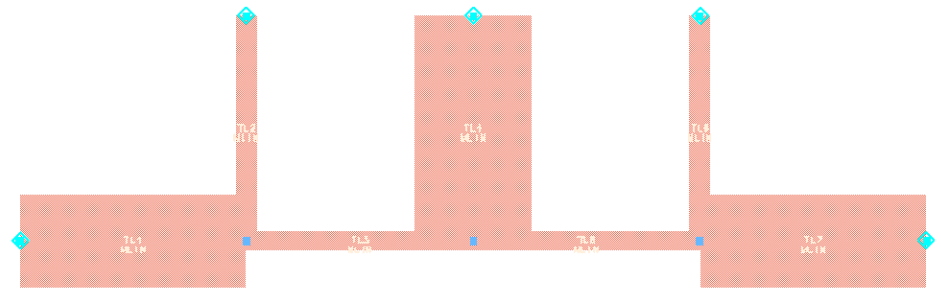


Φίλτρο μικροταινίας με μεταβολές στη χαρακτηριστική αντίσταση



Χαμηλοπερατά φίλτρα με κλαδωτές

- Στη συγκεκριμένη υλοποίηση φίλτρων χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός Richard ώστε να αντικατασταθούν τα συγκεντρωμένα στοιχεία με κλαδωτές ανοιχτοκυκλωμένους ή βραχυκυκλωμένους.
- Για να αποφευχθούν τα προβλήματα υλοποίησης όταν χρειάζονται βραχυκυκλωμένοι κλαδωτές σειράς ή εξαιτίας της γειτνίασης των κλαδωτών χρησιμοποιούνται οι ταυτότητες Kuroda.



Φίλτρο μικροταινίας με παράλληλους ανοιχτοκυκλωμένους κλαδωτές



Συζευγμένες γραμμές μεταφοράς

- Δύο συζευγμένες γραμμές μεταφοράς μπορούν να θεωρηθούν ως ένα τετράθυρο κύκλωμα μικροταινίας (Σχήμα)
- Σε δύο συζευγμένες γραμμές έχουμε διάδοση δύο ρυθμών, του άρτιου (ίσες τάσεις και ρεύματα στους δύο αγωγούς) και του περιττού (αντίθετες τάσεις και ρεύματα).

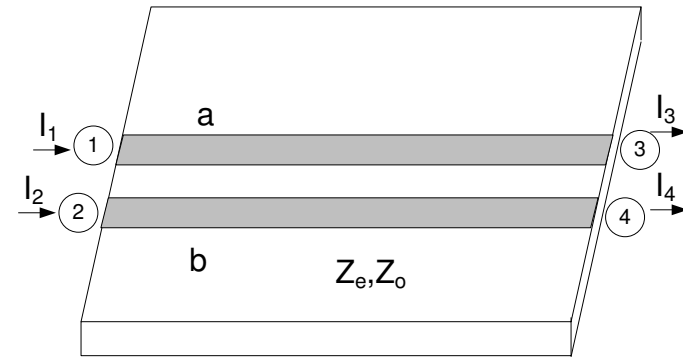
• Z-παράμετροι:

Z

$$= \begin{bmatrix} -jZ_+ \cot \beta l & -jZ_- \cot \beta l & jZ_+ / \sin \beta l & -jZ_- / \sin \beta l \\ -jZ_- \cot \beta l & -jZ_+ \cot \beta l & jZ_- / \sin \beta l & jZ_+ / \sin \beta l \\ -jZ_+ / \sin \beta l & -jZ_- / \sin \beta l & jZ_+ \cot \beta l & jZ_- \cot \beta l \\ -jZ_- / \sin \beta l & -jZ_+ / \sin \beta l & jZ_- \cot \beta l & jZ_+ \cot \beta l \end{bmatrix}$$

$$Z_+ = \frac{Z_e + Z_0}{2}, Z_- = \frac{Z_e - Z_0}{2}$$

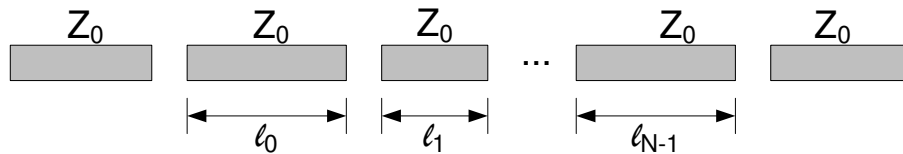
Z_e, Z_0
Οι χαρακτηριστικές αντιστάσεις
του άρτιου και του περιττού
ρυθμού



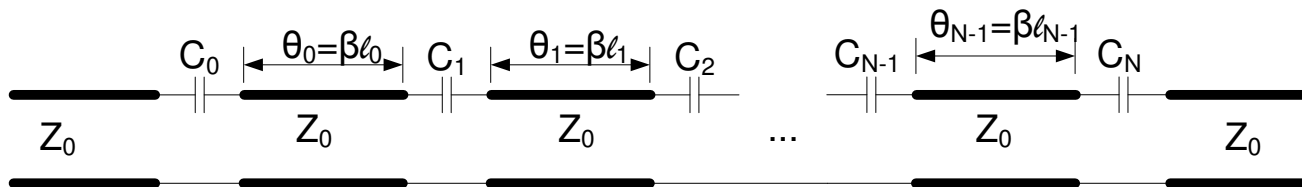
Συζευγμένες γραμμές μικροταινίας
ως τετράθυρο κύκλωμα



Ζωνοπερατά φίλτρα συζευγμένων συντονιστών



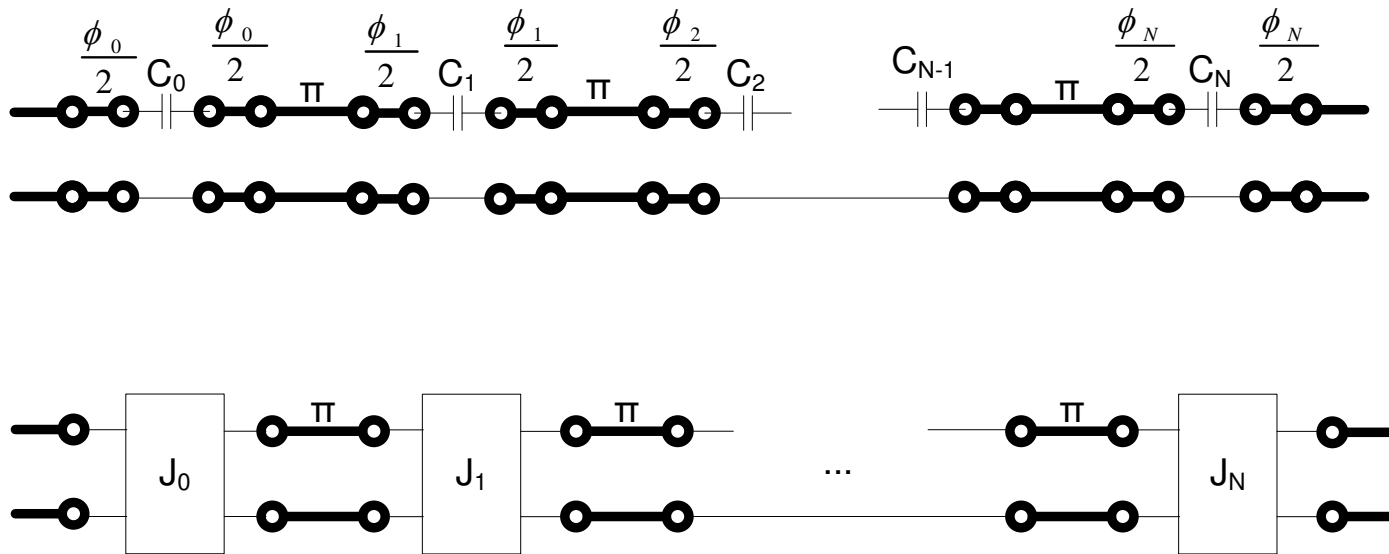
Φίλτρο συζευγμένων συντονιστών σε υλοποίηση μικροταινίας



Κυκλωματικό ισοδύναμο όπου τα διάκενα έχουν αντικατασταθεί από τις αντίστοιχες χωρητικότητες τους



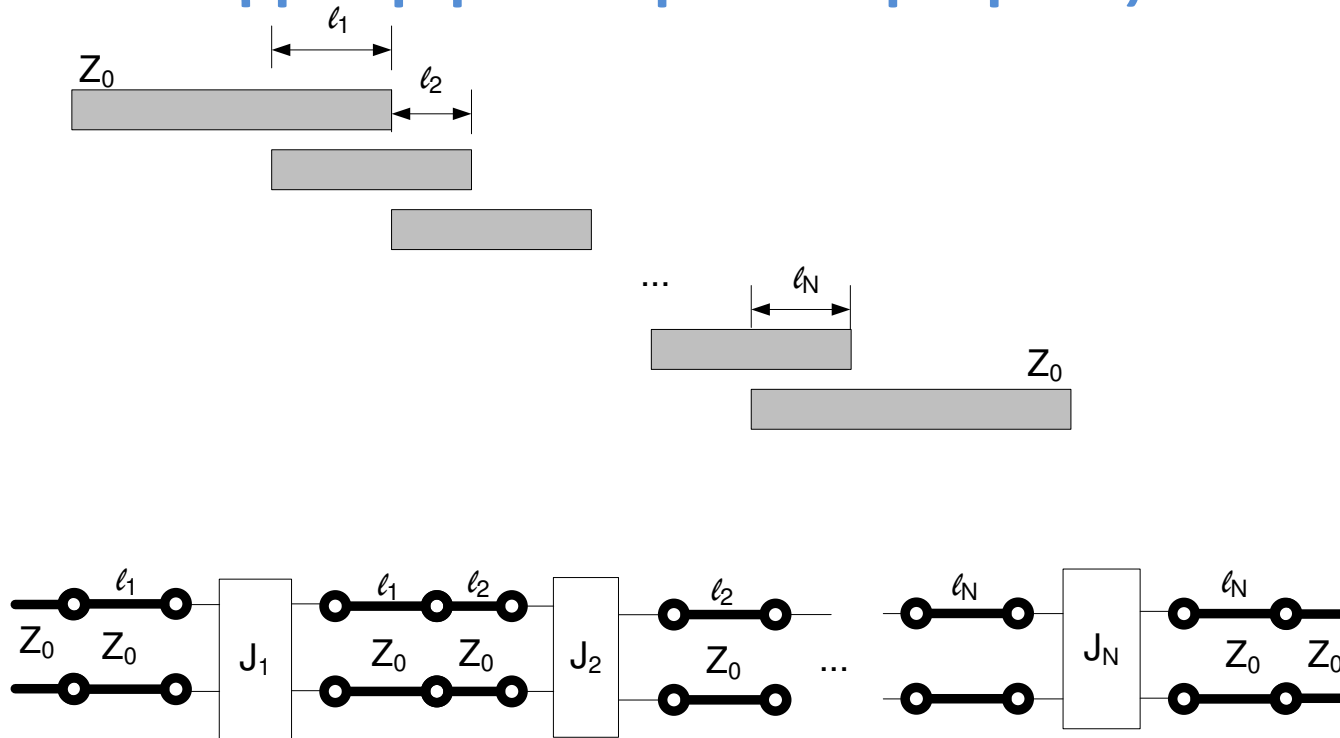
Ζωνοπερατά φίλτρα συζευγμένων συντονιστών (2)



Οι χωρητικότητες των διακένων έχουν αντικατασταθεί από τον ισοδύναμο αντιστροφέα σύνθετης αγωγιμότητας (κατάλληλα τμήματα γραμμών εκατέρωθεν των χωρητικοτήτων)



Ζωνοπερατά φίλτρα συζευγμένων γραμμών μεταφοράς



Ανοιχτοκυκλωμένοι συντονιστές μήκους περίπου $\lambda/2$, όπου λ το μήκος κύματος στην κεντρική συχνότητα της ζώνης διάβασης, που συζεύγγονται με έναν γειτονικό στο μισό μήκος τους.



Τέλος Ενότητας

Χρηματοδότηση

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



Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση **1.00**.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Σταύρος Κουλουρίδης. «Μικροκυματικές διατάξεις. Μικροκυματικά φίλτρα». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <https://eclass.upatras.gr/courses/EE775>.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

