

Comment ça marche ?

Les circuits réactifs (26)

La ligne à retard

Par le radio-club F6KRR

Après avoir disserté sur le circuit en pi utilisé en adaptation, nous allons nous intéresser à ses propriétés en filtre passe-bas, en particulier à son temps de propagation de groupe. Nous allons voir ensuite sous quelles conditions la mise en série de cellules en pi permet d'obtenir une ligne à retard de très petites dimensions mécaniques.

Retour sur la cellule en pi

Revenons sur la cellule en pi symétrique ayant un Q de 1 avec source complètement désadaptée et un Q de 0,5 avec source adaptée et intéressons nous à certaines de ses propriétés. Considérons la figure 1.

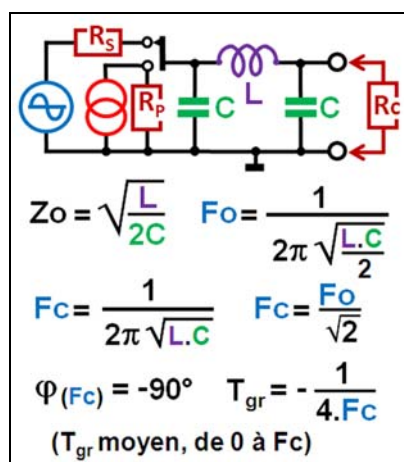


Figure 1 : Le circuit en pi

Nous voyons apparaître une fréquence F_c dite "fréquence de coupure", pour laquelle le déphasage sortie/entrée est égal à -90° . Le retard à F_c , qui est aussi le retard moyen entre 0 et F_c , est alors égal à $-1/4F_c$. Pour cette bande de fréquence, notre circuit en pi se comporte (plus ou moins bien) comme une ligne de longueur électrique $\lambda/4$ à F_c ⁽¹⁾.

Prenons un exemple : Soit $L=10\mu\text{H}$ et $C=500\text{ pF}$. Alors $Z_o = 100\ \Omega$, $F_o = 3,1831\text{ MHz}$, $F_c = 2,251\text{ MHz}$, $T_{gr} = -111\text{ ns}$ (retard moyen).

L'ondulation de phase dans la bande, donc la variation du temps de propagation, sera d'autant plus faible que R_c se rapprochera de Z_o et que par ailleurs R_p ou R_s se rapprocheront également de Z_o . Si $R_p=\infty$ ou $R_s=0$, $Q_{(F_o)} = 1$ et si R_p ou $R_s = Z_o$, $Q_{(F_o)} = 0,5$. Voir sur la figure 2 les courbes d'amplitude et de phase du circuit en exemple pour une et deux cellules en série.

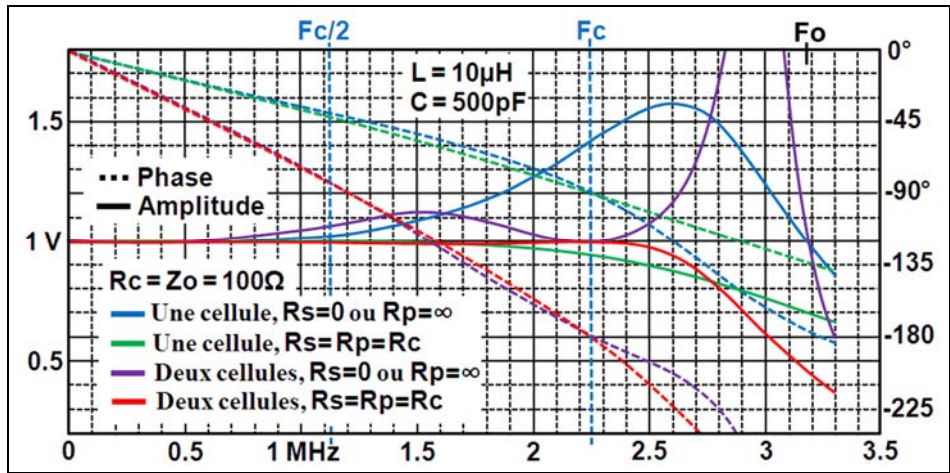


Figure 2 : Courbes amplitude / phase selon R_{source} (1 et 2 cellules en pi)

Ces courbes suscitent plusieurs remarques :

- En calculant continûment le temps de groupe on constate qu'il augmente avec la fréquence ⁽²⁾.
- Les ondulations du temps de groupe sont d'autant plus faibles (dans la bande 0- F_c) que le nombre de cellules est élevé.
- Les ondulations en amplitude sont d'autant plus faibles (dans la bande 0- F_c) que le nombre de cellules est élevé.
- Les différences entre source désadaptée et source adaptée sont d'autant plus faibles (dans la bande 0- F_c) que le nombre de cellules est élevé.
- Pour une même bande passante, le retard est proportionnel au nombre de cellules.
- Pour un même retard, la fréquence de coupure est proportionnelle au nombre de cellules ⁽³⁾.

En conclusion, plus le nombre de cellules est élevé et plus le comportement de la ligne à retard se rapproche de celui d'une véritable ligne physique ⁽⁴⁾. Cette constatation a influencé la fabrication des lignes à retard électriques selon les principes suivants :

- Disposer les inductances en série en les réduisant à une spire chacune (le minimum possible).
- Bobiner les spires (isolées) sur un barreau de matériau magnétique (ferrite) pour augmenter l'inductance de la spire, donc le retard.
- Entourer les spires avec un cylindre conducteur (fendu) qui amène une capacité répartie en dérivation pour chaque spire.

Voir un exemple de réalisation sur la figure 3.

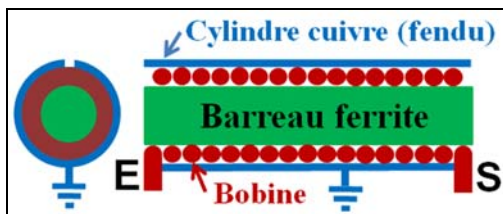


Figure 3 : Exemple de ligne à retard L-C

Variante : une métallisation du barreau de ferrite peut remplacer le cylindre extérieur. Noter qu'il y a d'autres façons de fabriquer une ligne à retard : électromécanique, piézo-électrique (à onde de volume ou à onde de surface) et naturellement avec un câble coaxial.

Nous finirons (provisoirement) sur le sujet, avec une remarque importante : Dans cette étude, nous avons abordé le comportement de la ligne à retard avec un signal sinusoïdal stationnaire (présent dans la ligne sans changement, ni en amplitude, ni en phase, depuis un temps infiniment grand par rapport à sa période). Alors l'impédance de la source n'a aucune autre influence qu'une modification de la bande passante de la ligne. Ce ne serait plus le cas si le signal était transitoire (impulsions). Mais ceci est une autre histoire.

Avec les lignes à retard nous terminerons notre série sur les circuits réactifs qui, malgré beaucoup de simplifications, a quand même nécessité 26 épisodes. Certains lecteurs trouveront que nous avons occulté tout un aspect de ces circuits qui concerne leur réponse impulsionnelle. En effet, nous n'avons disserté que sur leur réponse fréquentielle avec de brèves incursions dans le domaine temporel : la réponse d'un élément réactif pur à un échelon unité (courant pour une capacitance et tension pour une inductance), puis avec le temps de propagation de groupe et le comportement intégrateur ou différentiateur d'une cellule du premier ordre et enfin avec les lignes à retard. Que ces lecteurs se rassurent, nous y reviendrons en détail avec les filtres numériques, objets d'une future série. En attendant, nous allons aborder une autre (longue) série sur des éléments réactifs particuliers (ils sont constitués de constantes réparties au lieu de constantes localisées) puisqu'il s'agit des lignes de transmission HF.

La Rubrique "Comment ça marche ?" est une activité collective du radio-club F6KRK (<http://www.f6krk.org>). Pour une correspondance technique concernant cette rubrique : "f5nb@orange.fr".

Notes.

- 1) *Rappel : $\lambda = v.T = v/F$ ($v=3.10^8$ m/s dans l'air).*
- 2) *Pour deux cellules, de 0 à $F_c/2$ la phase tourne de 83° alors qu'elle tourne de 97° de $F_c/2$ à F_c .*
- 3) *Si au lieu de deux cellules avec $L=10\mu H$ et $C=500pF$, nous prenions vingt cellules avec $L=1\mu H$ et $C=50pF$, nous aurions le même retard (même longueur électrique de la ligne) mais avec une bande passante dix fois plus élevée.*
- 4) *En particulier son comportement électrique en régime stationnaire (par exemple le ROS) est indépendant de l'impédance de la source.*