

Ligne de transmission main gauche en régime non linéaire : Application à la multiplication de fréquences

M.-F. Foulon¹, J.-M. Duchamp², P. Ferrari², & D. Lippens¹

¹ Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologies,
Avenue Poincaré, BP 60069 59652 Villeneuve d'Ascq Cedex

² Institut de Microélectronique, Electromagnétisme et Photonique,
ENSERG, BP 257 - 38016 Grenoble Cedex

michel.foulon@iemn.univ-lille1.fr

Résumé. Des structures de propagation *main gauche* à indice effectif négatif peuvent être envisagées sous la forme de lignes de transmission chargées périodiquement par une capacité en série et une inductance en parallèle. L'introduction d'éléments discrets non linéaires sous forme de varactors permet de conserver le caractère main gauche du circuit en apportant des propriétés spécifiques comme la génération d'harmoniques ou l'amplification paramétrique en régime grand signal et une correction de phase positive en régime petit signal. Nous nous proposons ici d'illustrer ces propriétés spécifiques en régime grand signal à l'aide de simulations effectuées sur un modèle simplifié de ligne de transmission main gauche non linéaire en mettant en valeur la spécificité du dispositif gaucher.

Abstract. *Left handed* propagation medias can be envisaged as conventional transmission lines periodically loaded with series capacitances and parallel inductances. Introduction of non linear elements by means of varactors allows left handed behaviour with specific properties such as harmonic generation or parametric amplification under large signal conditions and positive phase delays under small signal conditions. We propose here to illustrate these specific properties by means of simulations under large signal conditions of a simplified model of left handed non linear transmission line by pointing out the interests of left handed properties.

1 Introduction

Le concept de *méta matériaux* a été introduit théoriquement par Veselago en 1968 [1] : Il s'agissait alors de considérer des matériaux artificiels qui présentent la particularité d'une permittivité et d'une perméabilité simultanément négatives. L'indice effectif négatif n qui en résulte correspond à un trièdre \mathbf{E} , \mathbf{H} , \mathbf{k} indirect, pour lequel vecteur d'onde et vecteur de Poynting sont anti-parallèles justifiant ainsi l'appellation "main gauche". Il en résulte des propriétés physiques comme la réfraction négative [2] ou l'inversion de l'effet Cerencov [3]. La synthèse de ce type de matériaux a été rendue expérimentalement possible pour des lignes de transmission grâce à deux types de dispositifs : Le premier fait appel à l'imbriication d'un réseau de fils et de boucles de courant [4], à l'origine respectivement du ϵ_r et du μ_r négatifs ; le second consiste à charger périodiquement une ligne de transmission par son réseau dual [5]. Ces deux types de structures ont fait l'objet de nombreuses études théoriques et démonstrations expérimentales en régime linéaire. Nous montrerons dans cette communication que propriétés main gauche et non linéarité peuvent être combinées en introduisant un élément non linéaire sous forme de varactor dans le second type de solution. Nous prouverons par des simulations de type circuit dans les domaines fréquentiel et temporel à l'aide du logiciel commercial HP-ADS que des propriétés de multiplication de fréquences par génération d'harmoniques ou de génération paramétrique sont rendues possibles. Dans chacun des cas, nous dégagerons l'intérêt possible du dispositif gaucher pour des fonctions non linéaires depuis longtemps développées sur des circuits droitiers. Il convient de préciser que le même type de structures est utilisée comme déphaseurs avec correction de phase positive. Dans ce cas, le varactor est utilisé comme élément accordable avec une tension de polarisation ; la non-linéarité n'étant pas excursionnée en régime petit signal, nous n'aborderons pas ce type d'application.

2 Multiplieur de fréquence Main Gauche

2.1 Modèle discret C-L

Une ligne de propagation est usuellement modélisée sous la forme d'une inductance en série et d'une capacité en parallèle. Elle possède alors une relation de dispersion linéaire rappelée dans le tableau de la figure 1. Si l'on considère le réseau dual de ce modèle, la relation de dispersion devient non linéaire et vitesse de phase et vitesse de groupe, notées respectivement v_ϕ et v_g , sont de signes opposés : Les vecteurs de Poynting et vecteurs d'onde sont donc anti-parallèles dans ce type de structure. L'introduction d'un varactor dans le schéma main gauche de la figure 1 correspond alors à considérer le modèle dual d'une ligne de transmission non linéaire utilisée pour de la génération d'harmoniques [6]. La cellule élémentaire ainsi considérée est alors chaînée périodiquement à une échelle petite devant la longueur d'onde guidée pour former une structure de propagation. Celle-ci peut alors être envisagée expérimentalement sous la forme d'éléments discrets ($C_{LH}(V)$, L_{LH}) chargeant périodiquement une structure de propagation, qui est par défaut main droite et modélisable par des éléments linéiques ($C_{RH} = c_{RH} \cdot L_{cell}$, $L_{RH} = l_{RH} \cdot L_{cell}$), où L_{cell} correspond au pas de la cellule élémentaire [7]. Notre modèle ne prend pas en compte la contribution des éléments de lignes droitières, correspondant aux éléments d'interconnexion qui relieraient les éléments discrets d'un prototype. Celle-ci est en effet ici négligée afin de conserver un caractère large bande en s'astreignant de contraintes sur la bande de fréquences main gauche, discutées par la suite.

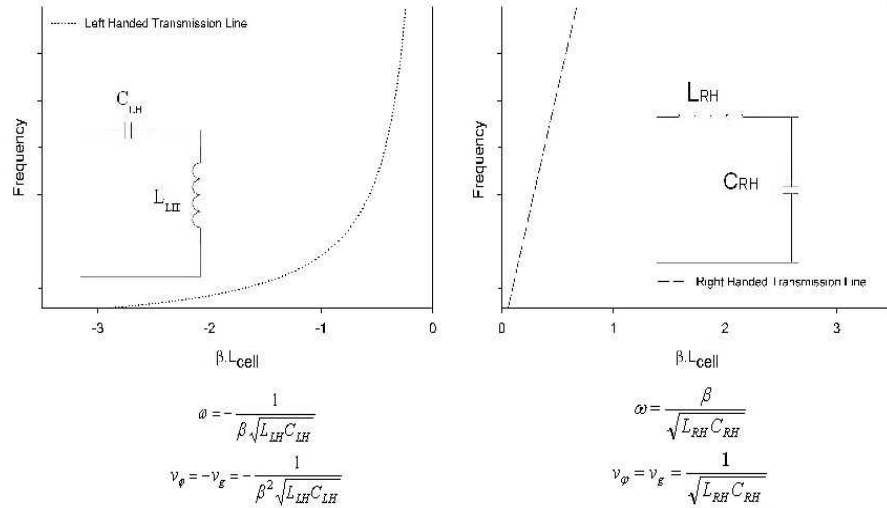


Fig.1. Lignes de transmission main droite et main gauche représentées par éléments discrets et leur relation de dispersion

Le modèle de varactor utilisé, présenté dans l'équation 1, permet de simuler des capacités variables à fort contraste $\frac{C_{max}}{C_{min}}$ avec une caractéristique C-V symétrique, tracée dans la figure 2, afin de ne pouvoir considérer que des harmoniques impaires sous excitation sinusoïdale. Cinq cellules élémentaires sont chaînées et l'on considère une source monochromatique avec des impédances de source et de charge de 50 Ohms. Les paramètres considérés pour le varactor sont de $m=1.039$, $C_{j0} = 1pF$ et $V_0 = 0.7V$ et la résistance série du composant est estimée à 4 Ohms.

$$C(V) = \frac{C_{j0}}{\left(1 + \left|\frac{V}{V_0}\right|\right)^m} \quad (1)$$

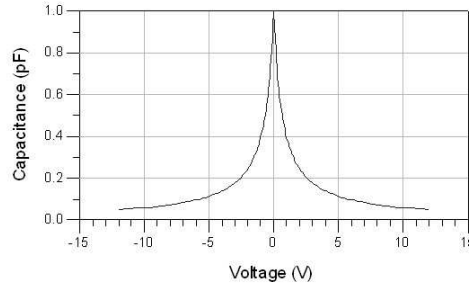


Fig.2. Caractéristique C-V du varactor utilisé comme élément non linéaire de la ligne de transmission main gauche

Les rendements obtenus par simulations en équilibrage harmonique pour les troisième et cinquième harmoniques de structures gauchères et droitières sont comparés dans la figure 3 : la nature passe-haut du filtre constitué par la cellule élémentaire main gauche permet une utilisation plus large bande que dans le cas droitier avec des niveaux de rendements comparables. La propagation d'un signal de pompe et des harmoniques générées ne peut en effet avoir lieu que dans la bande passante des filtres, soit en dessous de la fréquence de Bragg $f_B^{RH} = \frac{1}{\pi\sqrt{L_{RH}\cdot C_{RH}}}$ pour un circuit droitier et au dessus de $f_B^{LH} = \frac{1}{4\cdot\pi\sqrt{L_{LH}\cdot C_{LH}}}$ pour son équivalent gaucher. La nature résonante du rendement obtenu pour le dispositif gaucher, discutée dans [8], rend cependant difficilement envisageable l'optimisation d'un haut niveau de rendement sur une large bande. Les différences de phase pour l'harmonique 3, $\Delta\Phi = (\beta_3 - 3\cdot\beta_1)$, tracées en inset des courbes de rendement, montrent en effet que le celui-ci est théoriquement proportionnel à $\sin(\Delta\Phi)$, appelée fonction de cohérence, avec des maxima locaux de rendement correspondant à $\Delta\Phi = (2k + 1) \cdot \pi$ et les minima locaux à $\Delta\Phi = 2k \cdot \pi$. La forme du rendement dépend alors de cet accord de phase entre signal de pompe et signal triplé, qui dépendra lui même de la périodicité de la ligne et de ses éléments constitutifs.

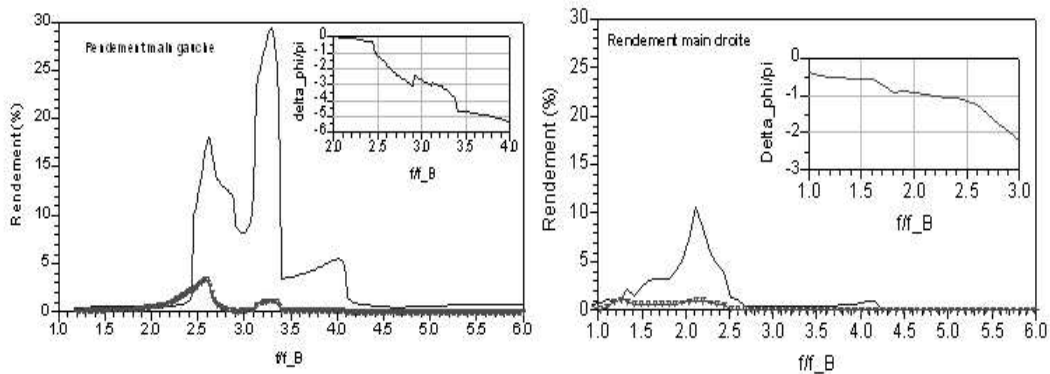


Fig.3. Rendements de conversion pour les troisième (ligne continue) et cinquième harmoniques (triangles) des lignes gauchères et droitières (Les fréquences sont normalisées par la fréquence de Bragg $f_B^{LH} = 1.271GHz$)

2.2 Modèle hybride RH-LH

Dans le cas où des éléments d'interconnexion droitiers sont considérés, le modèle de la ligne devient hybride, comme l'illustre l'inset du diagramme de dispersion de la figure 4, et il peut y avoir formation d'une bande interdite qui sépare la bande main gauche de la bande main droite vers lesquelles la ligne

tend asymptotiquement à respectivement basses et hautes fréquences. Comme l'indique le diagramme de dispersion tracé dans la figure 4, le caractère passe-haut de la ligne main gauche devient alors passe-bande et du type de celui obtenu pour le prototype de ligne de transmission linéaire réalisé et caractérisé dans [5] et illustré dans la figure 4-b. Le design d'une telle ligne de transmission non linéaire se doit donc prendre en compte les contributions des éléments main droite comme parasites afin de garantir le fonctionnement de celui-ci en régime main gauche sur la bande utile.

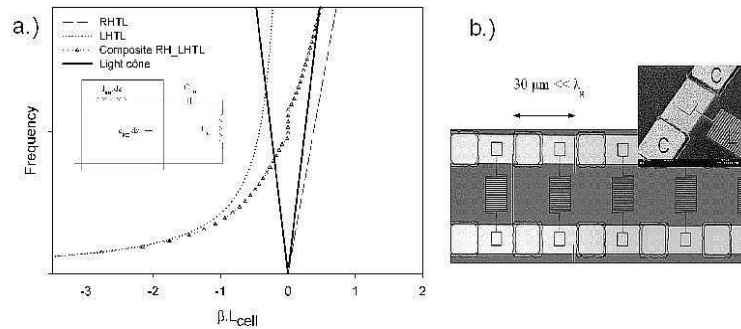


Fig.4. Diagramme de dispersion d'une ligne de transmission main gauche avec modèle hybride (a.) et photo par microscope électronique à balayage d'un prototype de ligne main gauche (b)

Si les contributions droitières limitent l'utilisation large bande du dispositif, le diagramme de dispersion de la structure non linéaire ainsi considérée permet cependant d'envisager une autre application en positionnant la bande main gauche de telle sorte que la fréquence de pompe se situe en dessous du cône de lumière et la fréquence triplée se situe au dessus : le signal triplé est alors rayonné "backward" par inversion de l'effet Cerencov, tandis que le signal de pompe reste guidé le long de la structure. Une polarisation des diodes utilisées comme varactors permet aussi de modifier le diagramme de rayonnement de l'antenne ainsi constituée [3].

3 Génération et Amplification paramétrique

3.1 Génération paramétrique

Un second mode de fonctionnement de la ligne non linéaire main gauche est possible sous la forme de génération paramétrique d'ondes le long de la ligne. La génération paramétrique consiste à générer deux signaux de fréquences f_1 et f_2 à partir d'un même signal de pompe f_p tels que :

$$\begin{cases} f_1 + f_2 = f_p \\ \beta_1 - \beta_2 = \beta_p \end{cases} \quad (2)$$

Les fréquences f_1 et f_2 sont situées symétriquement de part et d'autre de $\frac{f_p}{2}$ et le signal à la fréquence f_1 se déplace dans le même sens que le signal de pompe, tandis que le signal à la fréquence f_2 se déplace dans le sens opposé pour $f_1 < f_2$. Dans le cas de lignes de transmission non dispersives, Landauer a montré que cette génération paramétrique n'est pas possible du fait d'un phénomène de création d'ondes de chocs plus rapide que celui de génération paramétrique [9]. Pour des structures de propagation main gauche le comportement de la ligne est à contrariori fortement dispersif et la génération paramétrique devient possible.

Le modèle de ligne non linéaire main gauche utilisé précédemment est simulé dans le domaine temporel avec le même modèle de varactors polarisés avec une tension inverse de 4V et une fréquence de Bragg fixée à $f_B^{LH} = 1.59GHz$. La ligne constituée de 7 cellules est excitée à $7 \cdot f_B^{LH}$. Pour des valeurs d'amplitude

de signal de pompe supérieures à $3V$, de très faibles composantes apparaissent respectivement à $f_1 = 5.29GHz = 3.33 \cdot f_B^{LH}$ et $f_2 = 5.84GHz = 3.67 \cdot f_B^{LH}$ comme le montrent les spectres des tensions en entrée et en sortie de la ligne dans la figure 5-a. Le fait que les amplitudes des composantes à f_1 et f_2 soient plus importantes respectivement en sortie et en entrée est cohérent avec le sens de déplacement de celles-ci détaillé précédemment.

A plus basse fréquence d'excitation, le régime de multiplication de fréquences est d'avantage sollicité et l'on se ramène au régime de fonctionnement étudié précédemment : La simulation dans le domaine temporel permet cependant de montrer que le phénomène de génération paramétrique s'applique aussi aux harmoniques générées et des composantes parasites sont observées autour de chaque harmonique (des harmoniques paires étant rendues possibles du fait de la polarisation des varactors). Ces composantes parasites ont été ignorées lors de la simulation en équilibrage harmonique, mais l'énergie du signal de pompe se disperse sur les différentes fréquences paramétriques parasites comme l'illustre la figure 5-b.

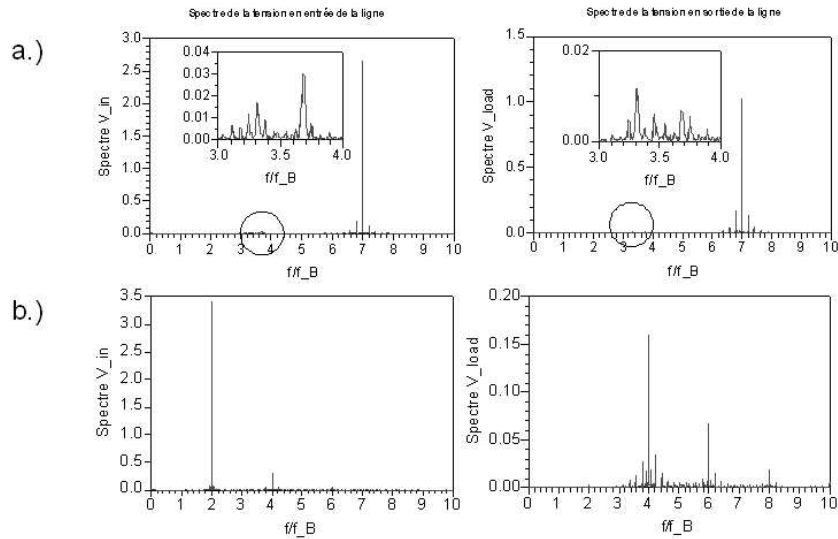


Fig.5. Spectres des formes d'onde en entrée et en sortie de la ligne de transmission main gauche non linéaire pour une fréquence de pompe $f_B^{LH} = 7 \cdot f_p$ (a) et $f_B^{LH} = 2 \cdot f_p$ (b)

3.2 Amplification paramétrique

La génération paramétrique possible sur des lignes non linéaires main gauche permet alors un second type d'application appelée amplification paramétrique : Un petit signal injecté à l'une des extrémités de la ligne (la fréquence de ce signal dépendant de son sens de propagation) peut être amplifié par superposition d'un signal de pompe. La figure 6 montre que le signal de fréquence f_1 injecté à l'entrée de la ligne avec une amplitude d'entrée entre $10mV$ et $100mV$ est presque 5 fois moins atténué en présence d'un signal de pompe injecté aussi à l'entrée du dispositif. Une compensation des pertes de la ligne est possible et un gain pourrait être envisagé si le dispositif venait à être optimisé. Le même type d'amplification est possible en sens inverse pour le signal de fréquence f_2 avec une source de signal placée à l'autre extrémité de la ligne.

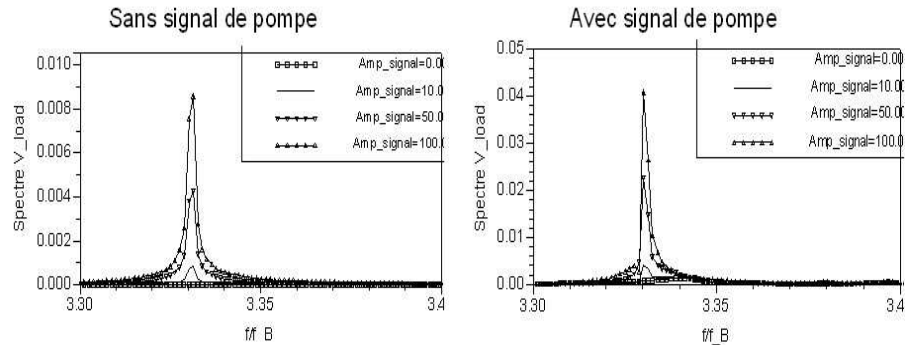


Fig.6. Spectres des formes d'onde en sortie de la ligne de transmission main gauche non linéaire injectés avec ou sans signal de pompe

4 Conclusion

Des structures de propagation main gauche constituées d'un réseau L-C(V) répété périodiquement pour former une ligne de transmission non linéaire ont été simulées dans les domaines temporel et fréquentiel. Des effets de multiplication de fréquences et d'amplification paramétrique ont été mis en évidence par la simulation. La non-linéarité et le caractère main gauche du dispositif permettent des propriétés physiques inenvisageables pour des lignes main droite. Cette spécificité du régime main gauche non linéaire présente certaines limites, mais pourrait aussi être envisagée pour des applications de focalisation, du fait de l'indice de réfraction négatif, et de structure rayonnante "backward", du fait de la structure de bande de la ligne ainsi constituée.

Références

1. V.G. VESELAGO, Electrodynamics of materials with simultaneously negative values of ϵ and μ , *Sov. Phys. Usp* (1968).
2. G.V. ELEFTHERIADES, A.K. IYER & P.C. KREMER, Planar negative refractive index media using periodically l-c loaded transmission lines, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **50** (12), 2702–2712 (2002).
3. D.F. SIEVENPIPER, Forward and backward leaky wave radiation with large effective aperture from an electronically tunable textured surface, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **53** (1), 236–247 (2005).
4. T. DECOOPMAN, A. MARTEAU, E. LHEURETTE, O. VANBÉSIEEN & D. LIPPENS, Left handed properties of split ring resonator and wire loaded transmission line in a finline technology, *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, To be published in April 2006.
5. T. CREPIN, J. F. LAMPIN, T. DECOOPMAN, X. MELIQUE, L. DESPLANQUE & D. LIPPENS, Experimental evidence of backward waves on terahertz left-handed transmission lines, *Applied Physics Letters*, **87** (10), 104105 (2005).
6. M. FERNANDEZ, E. DELOS, X. MELIQUE, S. ARSCOTT & D. LIPPENS, Monolithic coplanar transmission lines loaded by heterostructurebarrier varactors for a 60 ghz tripler. *IEEE on Microwave and Wireless Components Letters*, **11** (12), 498–500 (2001).
7. ALEXANDER B. KOZYREV, HONGJOON KIM, ABDOLREZA KARBASSI & DANIEL W. VAN DER WEIDE, Wave propagation in nonlinear left-handed transmission line media, *Applied Physics Letters*, **87** (12), 121109 (2005).
8. A.B. KOZYREV & D.W. VAN DER WEIDE, Nonlinear wave propagation phenomena in left-handed transmission-line media, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **53** (1), 238–245 (2005).
9. R. LANDAUER, Shock waves in nonlinear transmission lines and their effect on parametric amplification, *IBM Journal*, 391–401 (1960).