

IL RUOLO DEI MATERIALI COMPLESSI NEL PROGETTO DI COMPONENTI A MICROONDE DI NUOVA GENERAZIONE

Andrea Alù^(1,2), Filiberto Bilotti⁽¹⁾, Nader Engheta⁽²⁾, Lucio Vegni⁽¹⁾

andreaal@ee.upenn.edu, bilotti@uniroma3.it, engheta@ee.upenn.edu,
vegni@uniroma3.it.

⁽¹⁾Dipartimento di Ingegneria Elettronica, Università di Roma Tre
via della Vasca Navale, 84 - 00146 Roma

⁽²⁾Department of Electrical and Systems Engineering, University of Pennsylvania
200 South 33rd Street, Philadelphia, PA, 19104-6314 USA

Abstract

Owing to their salient wave propagation properties, electromagnetic complex materials have attracted the attention of many researchers in past several decades. A variety of research efforts to explore characteristics of complex materials, such as bianisotropic media and chiral materials, have been conducted and the theoretical analyses on the effects of these media on bandwidth, efficiency, and size of microwave antennas and devices have been reported in the literature. In this talk, we will give an overview of this topic, showing some specific theoretical results from the analysis and potential design of a new generation of microwave components loaded, partially or wholly, with complex materials. In particular, in the first part, we will deal with the effects of bianisotropic and chiral materials on dimensions and bandwidths of antennas and resonators. We will present the theoretical results and will provide some physical insights into the results. Then, in the second part, we will discuss the features of electromagnetic materials with negative permittivity and permeability – known as backward (BW) media or double-negative (DNG) media -- showing how their interesting features in wave-guiding may open doors to potential applications in future generation of compact microwave components and devices.

INTRODUZIONE

I componenti radianti di nuova generazione per i sistemi di telecomunicazione devono soddisfare a specifiche sempre più esigenti in termini di larghezza di banda, guadagno, efficienza di radiazione e comportamento multi-banda. In particolare, le nuove antenne per comunicazioni UMTS dovranno essere progettate per coprire un'ampia banda di funzionamento ed allo stesso tempo dovranno garantire delle dimensioni ridotte, soprattutto nel caso del terminale mobile.

Tali richieste inducono a considerare l'impiego di materiali artificiali nel progetto di nuovi componenti a microonde, poichè essi hanno mostrato buone proprietà nelle applicazioni già analizzate e presentate in letteratura [1]. In particolare, dielettrici con inclusioni metalliche e microrisonatori consentono un accoppiamento magneto-elettrico che può essere sfruttato per migliorare le caratteristiche dei componenti. I principali sforzi in campo tecnico sono stati effettuati nella sintesi di mezzi anisotropi, chirali o in

generale bianisotropi per limitarne le perdite ed allo stesso tempo incrementarne l'accoppiamento magneto-elettrico, che può essere utilizzato per spostare la frequenza di risonanza del componente [2] e migliorarne guadagno ed efficienza [3].

Interesse è stato inoltre sollevato da nuovi materiali complessi che presentano, in alcuni intervalli di frequenze, permittività e permeabilità contemporaneamente negative. Tali mezzi, riferiti come DNG (double negative) in letteratura [4] e nel prosieguo, hanno mostrato ottime potenzialità nella riduzione della dimensione di risonatori e guide d'onda [5].

Nel seguito verranno presentati alcuni risultati numerici ottenuti analizzando teoricamente e numericamente componenti a microonde caricati con mezzi complessi mostrandone i principali vantaggi. Nella prima parte, ci occuperemo dello studio teorico dell'effetto di mezzi chirali e bianisotropi nel progetto di componenti radianti, presentando alcuni risultati numerici ottenuti con una procedura E-MoL, recentemente presentata in letteratura [6]. Nella seconda parte invece, passeremo a mostrare come mezzi DNG, se utilizzati in coppia con dielettrici standard, possano abbassare significativamente le dimensioni di risonatori e guide d'onda e come il loro uso comporti l'assenza di un limite reale alla dimensione di cut-off per la propagazione o risonanza dei modi nelle strutture in esame.

MEZZI CHIRALI

Materiali chirali sono stati studiati in maniera estesa negli ultimi anni. La loro applicazione in campo antennistico garantisce diversi vantaggi, in termini di aumento della larghezza di banda, efficienza, guadagno e riduzione delle dimensioni della struttura, tramite una riduzione della frequenza di risonanza [6]. D'altro canto, la presenza delle inclusioni tipiche di questi materiali, responsabili dell'accoppiamento magneto-elettrico, produce un peggioramento dei livelli di cross-polarizzazione. Le relazioni costitutive per un mezzo chirale, nell'ipotesi di eccitazione monocromatica del tipo $e^{j\omega t}$, sono le seguenti [1]:

$$\begin{cases} \mathbf{D} = \epsilon_0 (\epsilon_r + Z_0^2 \chi^2) \mathbf{E} - jc_0 Z_0 \chi \mathbf{H} \\ \mathbf{B} = jc_0 Z_0 \chi \mathbf{E} + \mu_0 \mathbf{H} \end{cases}, \quad (1)$$

dove ϵ_0 , μ_0 e Z_0 sono, rispettivamente, la permittività, permeabilità e impedenza caratteristica del vuoto. Inoltre, ϵ_r e χ sono reali se il mezzo è supposto privo di perdite.

Le equazioni di Maxwell ai rotori possono essere riarrangiate per legare le componenti trasversali rispetto ad una determinata direzione, in modo da ottenere il sistema:

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{E}_t}{\partial z} = \underline{\mathbf{A}} \cdot \mathbf{E}_t + \underline{\mathbf{Z}} \cdot \mathbf{H}_t \\ \frac{\partial \mathbf{H}_t}{\partial z} = \underline{\mathbf{Y}} \cdot \mathbf{E}_t + \underline{\mathbf{B}} \cdot \mathbf{H}_t \end{cases}. \quad (2)$$

dove \mathbf{E}_t ed \mathbf{H}_t rappresentano le componenti trasverse del campo elettrico e magnetico rispetto all'asse z , le coordinate spaziali sono normalizzate rispetto a $jk_0 = j\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ e i quattro tensori hanno la forma:

$$\begin{aligned}\underline{\mathbf{Z}} &= \begin{pmatrix} -\frac{\partial}{\partial \bar{x}} \frac{1}{\epsilon_r} \frac{\partial}{\partial \bar{y}} & -1 + \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \frac{1}{\epsilon_r} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \\ 1 - \frac{\partial}{\partial \bar{y}} \frac{1}{\epsilon_r} \frac{\partial}{\partial \bar{y}} & \frac{\partial}{\partial \bar{y}} \frac{1}{\epsilon_r} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \end{pmatrix} \\ \underline{\mathbf{Y}} &= \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \frac{\epsilon_r + (Z_0\chi)^2}{\epsilon_r} \frac{\partial}{\partial \bar{y}} & \epsilon_r - \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \frac{\epsilon_r + (Z_0\chi)^2}{\epsilon_r} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \\ -\epsilon_r + \frac{\partial}{\partial \bar{y}} \frac{\epsilon_r + (Z_0\chi)^2}{\epsilon_r} \frac{\partial}{\partial \bar{y}} & -\frac{\partial}{\partial \bar{y}} \frac{\epsilon_r + (Z_0\chi)^2}{\epsilon_r} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \end{pmatrix} \\ \underline{\mathbf{A}} = \underline{\mathbf{B}} &= j \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \frac{Z_0\chi}{\epsilon_r} \frac{\partial}{\partial \bar{y}} & -Z_0\chi - \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \frac{Z_0\chi}{\epsilon_r} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \\ Z_0\chi + \frac{\partial}{\partial \bar{y}} \frac{Z_0\chi}{\epsilon_r} \frac{\partial}{\partial \bar{y}} & -\frac{\partial}{\partial \bar{y}} \frac{Z_0\chi}{\epsilon_r} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \end{pmatrix}\end{aligned}\quad (3)$$

Applicando una procedura E-MoL, seguendo [2], si può studiare a partire dalle (2) l'effetto della chiralità su un'antenna a patch quadrato la cui geometria e i cui risultati all'aumentare di χ sono presentati in **Figura 1**.

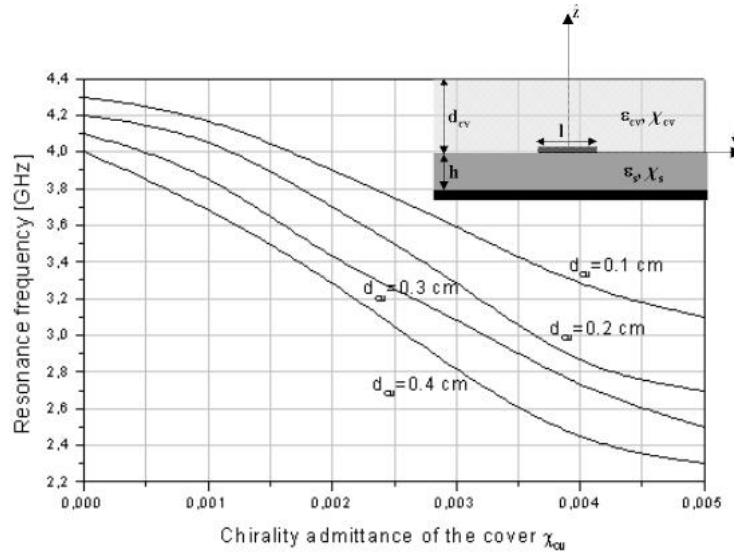


Figura 1 – Geometria dell'antenna e risultati numerici dell'effetto di un cover chirale sulla frequenza di risonanza. $l = 2$ [cm], $h = 0.78$ [mm], $\epsilon_s = 2.2$, $\epsilon_{cv} = 2.33$, $\chi_s = 0$.

MEZZI DNG

I mezzi DNG, che ad una certa frequenza di lavoro presentano permittività e permeabilità contemporaneamente negative, possono essere utilizzati come

compensatori di fase in risonatori e guide d'onda, come sottolineato da Engheta in [5]. L'idea alla base è che l'antiparallelismo tra il flusso di potenza e la direzione della velocità di fase, peculiare dei mezzi DNG [4], può essere sfruttato utilizzando in combinazione normali dielettrici (chiamati double positive, o DPS) e mezzi DNG. Tale tecnica consente di costruire risonatori e guide d'onda la cui relazione di dispersione non dipende dalla somma degli spessori dei due slab, ma dal loro rapporto, non costituendo un limite per la dimensione di cut-off di risonatori e guide d'onda. Nel caso monodimensionale, ad esempio, la relazione di dispersione per un risonatore caricato da due slab di spessore d_1 e d_2 , con mezzi caratterizzati rispettivamente da ϵ_1 , μ_1 e ϵ_2 ,

μ_2 (supposti reali e nell'ipotesi di perdite trascurabili) è
$$\frac{\tan(k_1 d_1)}{\tan(k_2 d_2)} = \frac{k_1 |\mu_2|}{k_2 |\mu_1|},$$

supponendo che si stia usando uno slab DNG, con $k_i = \omega \sqrt{\epsilon_i \mu_i}$.

Nel caso in questione, ad esempio, è mostrato in

Figura 2 come un risonatore formato da due slab coniugati possa risultare di dimensioni sostanzialmente ridotte rispetto ad un risonatore standard.

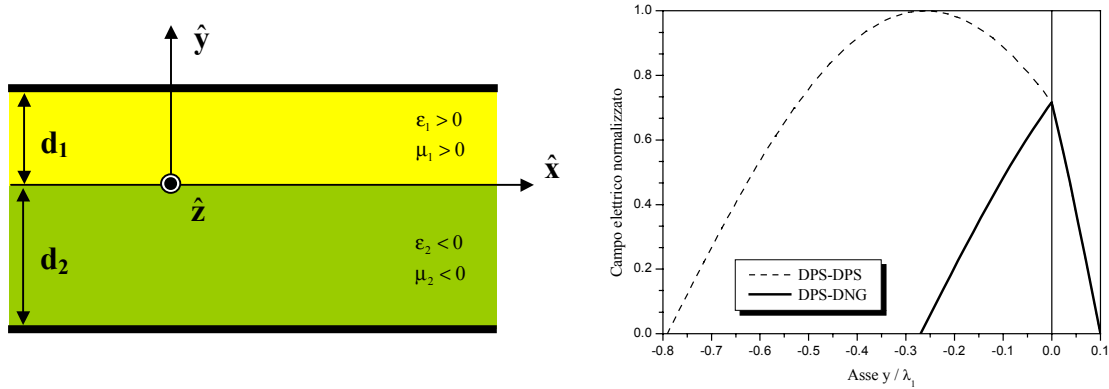


Figura 2 – Geometria in analisi ed ampiezza normalizzata del campo elettrico in un risonatore per $\epsilon_1 = 3$, $\mu_1 = 3$, $\epsilon_2 = \pm 2$, $\mu_2 = \pm 1$, $d_1 = \lambda_1 / 10$, d_2 .

REFERENZE BIBLIOGRAFICHE

- [1] D.M. Pozar, "Microstrip Antennas and Arrays on Chiral Substrates," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-40, pp.1260-1263, Oct. 1992.
- [2] F. Bilotti, A. Alù, L. Vegni, "Effect of Complex Material Cover on Microstrip Patch Antennas," Proc. 2002 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Antonio (TX), USA, June 16-21, 2002.
- [3] A. K. Bhattacharyya and T. Tralman, "Effects of Dielectric Superstrate on Patch Antennas," Electron. Lett., Vol. 24, pp.356-358, 1988.
- [4] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ," Soviet Physics Uspekhi, vol. 10, no. 4, pp. 509-514, 1968. [Usp. Fiz. Nauk, vol. 92, pp. 517-526, 1967.]
- [5] N. Engheta, "An idea for thin subwavelength cavity resonators using metamaterials with negative permittivity and permeability," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 1, No. 1, 2002, to appear on line.
- [6] A. Alù, F. Bilotti, L. Vegni, "Design of Chiral Planar Integrated Antennas with Cover via the Method of Lines," Microwave and Optical Technology Letters, Vol.32, No.2, pp. 143-145, Jan. 20, 2002.