

文章编号: 2095-4980(2013)01-0062-04

基于混合算法优化太赫兹波段的开口共振器

黄文媛, 林文斌, 王洛芬, 常 雷, 廖 成

(西南交通大学 电磁场与微波技术研究所, 四川 成都 610031)

摘 要: 开口共振器是电磁超材料的基本单元结构之一。本文应用基于微分进化策略和蚁群优化的混合算法, 对在太赫兹频段下开口共振器的结构参数进行设计, 以降低其回波损耗。数值模拟结果表明, 在 1.04 THz~1.16 THz 内, 优化后结构所得的回波损耗($|S_{11}|$)下降了 50%, 验证了本文优化设计方法的正确性和可行性, 对太赫兹超材料的结构设计具有一定的参考意义。

关键词: 太赫兹; 开口共振器; 混合算法

中图分类号: TN820.34; O441.4

文献标识码: A

Optimization of a terahertz Split-Ring Resonator by using hybrid optimization algorithm

HUANG Wen-yuan, LIN Wen-bin, WANG Luo-fen, CHANG Lei, LIAO Cheng
(Institute of Electromagnetic, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: The Split-Ring Resonator(SRR) is one basic structure of metamaterial. An hybrid optimization algorithm is employed to optimize the structure of a SRR for a lower return loss ($|S_{11}|$) in the terahertz regime. Simulation results show that the return loss of the optimized structure is lowered by about 50% than that of the original structure in 1.04 THz~1.16 THz. This work may be useful to the design of the terahertz metamaterial structures.

Key words: terahertz; Split-Ring Resonators; hybrid algorithm

电磁超材料是指一些具有天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合结构或复合材料。它是通过在材料的关键物理尺度上的结构有序设计来突破某些表观自然规律的限制, 从而获得超常的材料功能。早期对电磁超材料的研究主要针对左手材料(介电常数和磁导率同时为负值)。1999 年, 英国科学家 Pendry 等人发现, 在等离子体谐振频率下, 周期性排列的导电金属线的介电常数是负数, 同时开口共振器(Split Ring Resonators, SRRs)的等效磁导率在一定范围内也是负数^[1]。D.R. Smith 等人在其理论上, 首次在微波频段内实验证实负折射现象^[2]。在此基础上, 研究者们开展了一系列关于电磁超材料特性及其应用的研究工作^[3-5]。

近年来, 0.1 THz~10 THz 的太赫兹波吸引了众多学者的关注。在该波段下, 电磁超材料具有优异的可调谐性质, 可做成调谐器、交换器、滤波器、传感器、吸收器和介质谐振器等太赫兹器件^[6-10]。通常电磁超材料是由分布在以绝缘体为基体平面上的亚波长谐振器阵列所组成, 其性质很大程度上取决于基板和谐振器的结构。运用优化算法优化电磁超材料的基本单元结构——SRR, 提高其参数指标, 有助于拓宽电磁超材料在太赫兹波段内的应用范围。本文应用一种混合优化算法, 优化太赫兹波段内 SRR 的结构参数。

1 结构分析

本文采用三维立方体 SRR 单元结构^[9], 其结构如图 1(a)所示。在此结构中, 基底材料的相对介电常数为 4.4, 损耗角正切值为 0.02, 长度和宽度 d 都为 2.5 μm , 厚度为 0.25 μm , 基底前向镀上 2 个开口共振环, 背向镀上 1 条矩形金属片, 材质均为厚度 0.17 μm 的铜(电导率设为 $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$)。采用平板印刷电路板技术可实现该结构。

收稿日期: 2012-12-03; 修回日期: 2013-01-04

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-10-0702); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110184110016); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(SWJTU12ZT08)

相应的结构变量参数如图 1(b)所示，2 个内外开口共振环的宽度分别为 L, L_m ，内外环开口缝隙的宽度为 W, P ，背面金属线的长度宽度为 L_s, W_s ，一共有 6 个尺寸变量。SRR 单元结构尺寸是决定其电磁场特性的主要参数，基板前向的 2 个开口谐振环引起电场响应，基板背向的矩形金属条引起磁场响应。因此，可以调整这些尺寸变量来获得最优的响应特性。

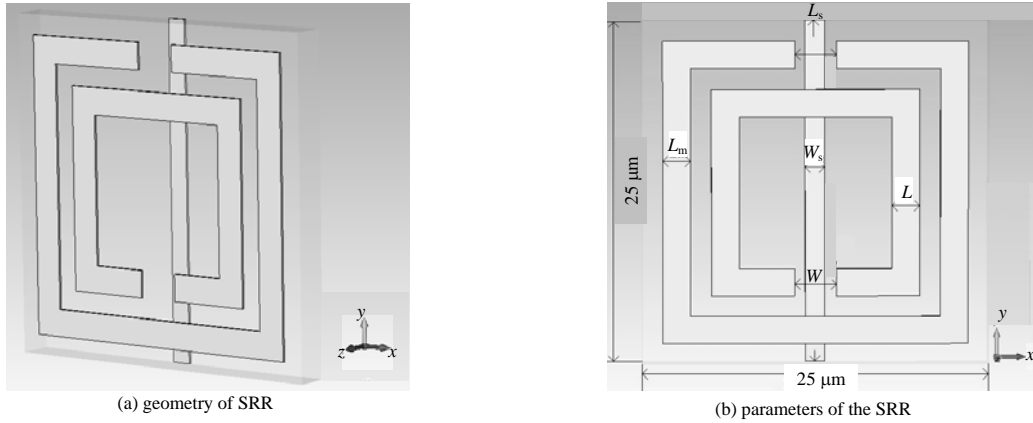


Fig.1 Geometry and parameters of the SRR
图 1 方形 SRR 单元结构和变化参量示意图

根据 D.R. Smith 在 2005 年提出的参数提取法^[11]，折射率 n 、波阻抗 z 与 S 参数的关系式可以写为：

$$n = \frac{1}{kd} \arccos \left[\frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \right] \quad (1)$$

$$z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (2)$$

式中： k 为传播常数； d 为该结构尺寸； n 为折射率； z 为波阻抗。

2 结构优化与仿真

本文研究 1.04 THz~1.16 THz 频段下该 SRR 的响应特性，并通过应用微分进化策略和连续蚁群优化并行的一种新型混合算法^[12]，对它的 6 个结构变量参数进行优化，以获得较低的回波损耗。具体如下。

首先应用三维电磁仿真软件得出文献[11]中 GHz 波段下的 S_{11} 参数，如图 2(a)所示。根据天线的相似原理，在 THz 波段下，通过改变 SRR 单元结构对应的比例尺寸后，仿真得出该结构的 S_{11} 参数，如图 2(b)中实线所示。而采用 6 个变量最优解仿真得出的 S_{11} 参数曲线如图 2(b)中虚线所示。表 1 列出了优化前后 6 个变量的对应数值。

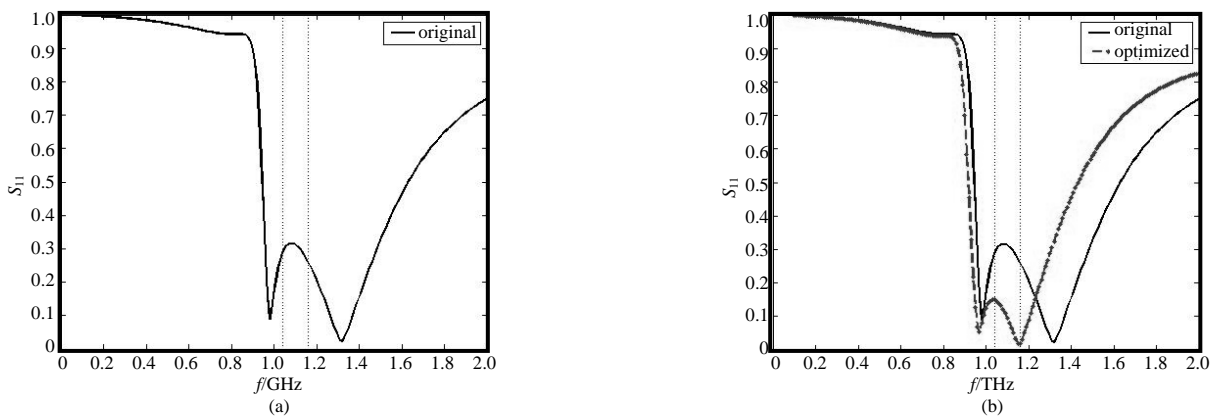


Fig.2 Return loss (S_{11}) of the original SRR in GHz (a); Comparison between the return loss of the original SRR and that of the optimized SRR in THz (b)
图 2 GHz 波段下，回波损耗(S_{11})曲线(a)；THz 波段下，优化前后回波损耗(S_{11})曲线对比(b)

表 1 优化前后的结构参数对比(单位: μm)

Table1 Comparison between the structure parameters of the original SRR and those of the optimized SRR (unit: μm)						
	W_s	L_s	L_m	P	L	W
the original parameters ^[11]	0.70	12.50	2.00	3.00	2.00	3.00
the optimal parameters	0.73	12.54	2.44	3.62	1.49	2.60

由图 2 可见, 在 1.04 THz~1.16 THz 范围内, 优化后结构参数大大降低了回波损耗($|S_{11}|$)。图 3 是优化前后传输系数(S_{21})的对比, 可以看出在该范围内, 传输系数有略微的提高。图 4 和图 5 分别显示了优化前后折射率(n)和波阻抗(z)的比较情况。图 4 显示, 优化结构所得的折射率在给定范围内仍保持负值, 而从图 5 可以看出, 其波阻抗更接近 1, 即与自由空间更近似阻抗匹配。

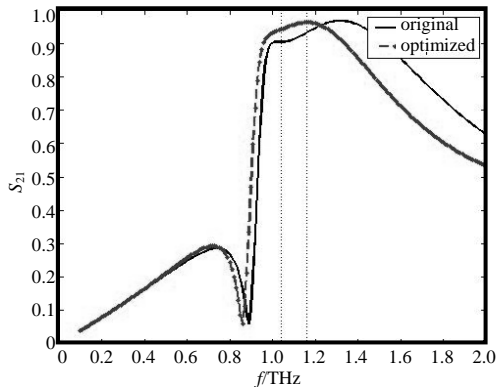


Fig.3 Comparison of the transmission coefficients (S_{21}) of SRR before and after optimization in THz frequency
图 3 传输系数(S_{21})曲线对比

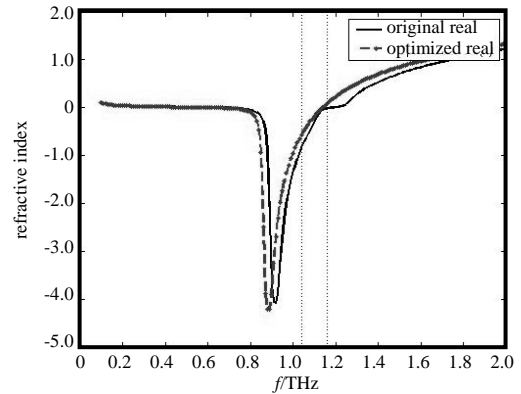


Fig.4 Comparison of the refractive indexes of SRR before and after optimization in THz frequency
图 4 折射率曲线对比

3 结论

电磁超材料基本特性取决于结构, 综合调整结构中的各个变量参数, 有助于改善其性能指标。本文应用基于微分进化策略和蚁群优化的混合算法, 对电磁超材料单元 SRR 的结构参数进行了优化。仿真结果证实, 在 1.04 THz~1.16 THz 内, 优化后结构所得的回波损耗($|S_{11}|$)下降约 50%, 而其负折射率等特性基本不变。

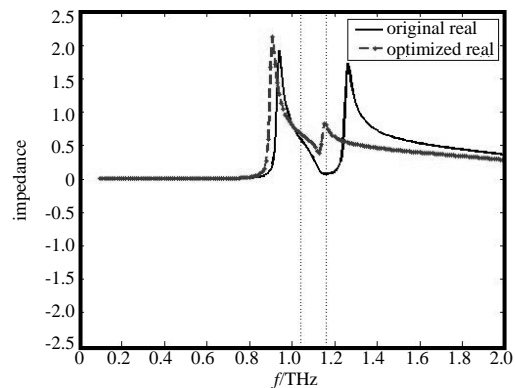


Fig.5 Comparison of the impedances of SRR before and after optimization in THz frequency
图 5 阻抗曲线对比

参考文献:

- [1] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [2] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(18): 4184-4187.
- [3] Chen H T, Padilla W J, Cich M J, et al. A metamaterial solid state terahertz phase modulator[J]. Nature Photonics, 2009, 3(3): 148-151.
- [4] Padilla W J, Taylor A J, Highstrete C, et al. Dynamical electric and magnetic metamaterial response at terahertz frequencies[J]. Physical Review Letters, 2006, 96(10): 107401-107404.
- [5] Tao H, Strikwerda A C, Fan K, et al. Terahertz metamaterials on free standing highly flexible polyimide substrates[J]. Applied Physics, 2008, 41(23): 232004-1-5.
- [6] Padilla W J, Aronsson M T, Highstrete C, et al. Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: design, fabrication, and characterization[J]. Physical Review B, 2007, 78(24): 241103-1-4.
- [7] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. Science, 2006, 314(5801): 977-980.

- [8] Peralta Xomalin G,Smirnova Evgenya I,Azad Abul K,et al. Metamaterials for THz polarimetric devices[J]. Optics Express, 2009,17(2):773-783.
- [9] 陈顺兵,张文涛,何晓阳,等. THz 波段 Metamaterial 吸波材料研究现状[J]. 信息与电子工程, 2011,9(3):270-273. (CHEN Shunbing,ZHANG Wentao,HE Xiaoyang,et al. Current status of THz band metamaterial absorbers[J]. Information and Electronic Engineering, 2011,9(3):270-273.)
- [10] 李悬雷,刘长军. 一种基于介质谐振器的新型电磁超材料[J]. 信息与电子工程, 2010,8(4):407-410. (LI Xuanlei,LIU Changjun. A novel kind of metamaterial based on dielectric resonator[J]. Information and Electronic Engineering, 2010, 8(4):407-410.)
- [11] Smith D R,Vier D C,Koschny T,et al. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials[J]. Physical Review E, 2005,71: 036617-1-11.
- [12] Chang L,Liao C,Lin W,et al. A Hybrid Method Based on Differential Evolution and Continuous Ant Colony Optimization and Its Application on Wideband Antenna Design[J]. Progress In Electromagnetics Research, 2012,122:105-118.

作者简介：



黄文媛(1987-), 女, 江西省高安市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波技术.email:hwy20021@163.com.

林文斌(1970-), 男, 福建省福清市人, 博士, 教授, 主要研究方向为电磁场与微波技术.

王洛芬(1986-), 女, 山东省临沂市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波技术.

常 雷(1986-), 男, 山东省滕州市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波技术.

廖 成(1964-), 男, 重庆市人, 博士, 教授, 主要研究方向为电磁场与微波技术.