

基于双三角形金属条的二维可衍生超材料性能分析

田子建 李玮祥 樊京

Performance analysis of double incidence derivative metamaterial based on double-triangular structure

Tian Zi-Jian Li Wei-Xiang Fan Jing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 034102 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.034102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034102>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I3>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

磁电耦合超材料本构矩阵获取方法的研究

[A method of retrieving the constitutive parameter matrix of magnetoelectric coupling metamaterial](#)

物理学报.2015, 64(4): 044101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044101>

基于多导体传输线理论的差模激励新型线束串扰模型研究

[New differential-mode-source cable bundle crosstalk model based on multiconductor transmission lines theory](#)

物理学报.2015, 64(4): 044102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044102>

热防护层覆盖弹体目标雷达散射截面的修正的等效电流近似法和图形计算电磁学法分析

[Modified equivalent current approximation and graphical electromagnetic computing method of analyzing radar cross section of missile target scatterer covered with thermal protection layer](#)

物理学报.2014, 63(24): 244101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244101>

一种新型宽带定向性贴片天线设计

[Design of a novel wideband directivity patch antenna](#)

物理学报.2014, 63(24): 244102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244102>

同轴交错圆盘加载波导慢波结构高频特性的研究

[Dispersion characteristics of the coaxial interlaced disk-loaded waveguide slow-wave structure](#)

物理学报.2014, 63(22): 224101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224101>

# 基于双三角形金属条的二维可衍生超材料性能分析\*

田子建<sup>1)†</sup> 李玮祥<sup>1)</sup> 樊京<sup>2)</sup>

1)(中国矿业大学(北京), 机电学院, 北京 100083)

2)(南阳理工学院电子与电气工程学院, 南阳 473004)

(2014年7月7日收到; 2014年8月18日收到修改稿)

基于两宽金属条中间引入两交叉细长金属线的双三角形结构, 提出了一种新型二维超材料结构. 利用 HFSS 软件对该结构及其衍生结构进行仿真分析, 结果表明: 该类形结构在电磁波垂直和平行两种入射情况下都能实现双负特性, 通过比较分析归纳出该类形结构的一般规律: 电磁波以垂直和水平两种方式入射时, 中间引入的金属线个数每增加一根, 结构的谐振频率向高频方向分别移动 0.5 GHz 和 4 GHz 左右. 对多维左手材料的发展提供了参考.

**关键词:** 双三角形结构, 二维, 衍生结构, 左手材料

**PACS:** 41.20.Jb, 78.20.Ci

**DOI:** 10.7498/aps.64.034102

## 1 引言

左手材料(left-handed materials, LHM)是一种介电常数 $\epsilon$ 和磁导率 $\mu$ 同时为负的材料, 最早是由 Veselago<sup>[1]</sup>在1968年从理论上提出的. 20世纪90年代, Pendry<sup>[2]</sup>等研究发现周期性排列的导电金属线(ROD)的介电常数在其等离子体谐振频率以下为负, 并且发现金属开口谐振环(SRRs)的磁导率在一定频域内表现为负值. 2000年, Smith等<sup>[3]</sup>根据 Pendry 等的建议, 设计出了金属线和开口谐振环的组合结构, 首次人工实现了 $\epsilon$ 和 $\mu$ 同时为负的左手材料. 2006年 Eleftherios 等<sup>[4]</sup>在 Smith 成果的基础上提出双平行短金属线可以代替 SRRs 实现磁谐振. 至此之后, 左手材料的设计形式大体可分为两种类型, 一种是根据 Smith 的原理制备出的各种环棒结构, 另一种是根据 Eleftherios 的原理设计出的电磁谐振一体化结构. 然而这些结构都只能在电磁波以单一方式入射时实现左手特性, 如

对称环结构<sup>[5]</sup>、双S形结构<sup>[6]</sup>、H形结构<sup>[7]</sup>、远场亚波长开口环<sup>[8]</sup>、矩形波导吸收器<sup>[9]</sup>等只能在电磁波平行于介质基板入射时实现双负特性; 金属线对结构<sup>[10]</sup>、双工形结构<sup>[11]</sup>等只能在电磁波垂直于介质基板入射时实现双负, 这类结构也被称为一维左手材料. 一维左手材料在实际应用中存在很大局限性, 因此设计出多方向入射的结构是目前左手材料研究的热点. 近些年有学者提出了双Z形<sup>[12]</sup>与双 $\Sigma$ 形<sup>[13]</sup>的双入射型结构, 能够在电磁波平行与垂直这两种入射情况下同时实现左手特性.

本文将通过将两个反方向对称的三角形金属结构分别放置在介质板两侧, 设计出了一种新型双入射二维左手材料结构, 其中的三角形金属结构是在两宽金属条中间引入两交叉细长金属线的结构, 如图1所示. 在该新形结构中, 介质基板两侧的金属结构在电磁波垂直和平行两种入射情况下都能实现磁谐振, 从而产生负磁导率. 而金属条本身在两种入射条件下都具有等离子体效应, 可以产生负介电常数, 从而实现双负特性. 本文应用三维电磁软

\* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 51134024)、国家高技术研究发展计划(863计划)(批准号: 2012AA062203)和国家自然科学基金(批准号: U1261125)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tianzj0726@126.com

件 HFSS 对该结构进行了模拟仿真, 分析它们的  $S$  参数并提取有效电磁参数来验证两种入射情况下双负通带的存在. 此外, 本文还对该结构进一步衍生, 分别比较分析了中间引入三根和四根细长交叉金属线结构的特性, 从而得出该类型结构在双入射条件下的一般特性, 对二维以及多维左手材料的研究有明确的参考价值.

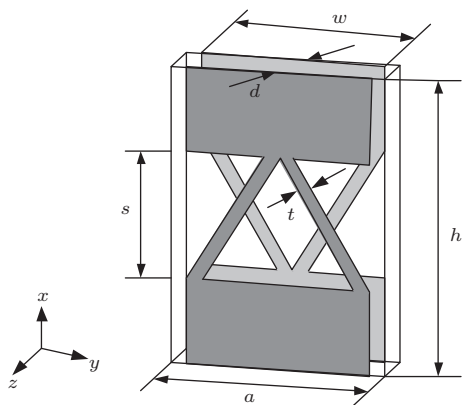


图1 本文提出的新型结构示意图

## 2 结构设计与仿真分析

1996年, Pendry 等<sup>[14]</sup>提出了平行金属结构等离子体频率的关系式

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}. \quad (1)$$

当电磁波频率  $\omega$  低于金属结构等离子体频率  $\omega_p$  时, 等效介电常数为负值. 在两金属条中间引入细长金属线的目的是使极化电荷得到积累, 从而使双平行金属条结构获得较强的磁谐振以实现负的磁导率. 如何在同一电磁波频段内将双负特性复合, 是左手材料研究的核心内容.

图1为本文提出的新型双向左手结构单元, 该结构由介质基板和两个反向对称放置在介质基板两侧的三角形金属结构构成. 单元结构的尺寸为金属条宽度  $w = 6$  mm, 高度  $h = 10$  mm, 中间缺口长度  $s = 4$  mm, 中间金属线宽度  $t = 1$  mm, 介质板宽度  $a = 7$  mm, 厚度  $d = 0.3$  mm, 基板介电常数为9.8, 金属条与金属线厚度  $t_m = 0.01$  mm, 金属材质为铜, 具体参数如图1标示. 介质板前后两个反向对称金属结构在电磁波磁场分量的作用下会耦合产生磁谐振, 从而实现负磁导率, 但是两种入射情况下磁谐振耦合原理是不同的. 负介电常数则是由单个金属结构的等离子体效应产生的. 本文采用三维电磁仿真软件 HFSS 进行建模仿真<sup>[15,16]</sup>,

仿真中采用波端口激励, 利用理想周期边界条件, 按照不同的入射条件分别选取电边界 (PEC) 与磁边界 (PMC) 的方向, 下面将根据电磁波两种不同的入射情况进行仿真分析.

### 2.1 电磁波垂直于介质板入射

按照图1所示的模型参数在 HFSS 中建模, 周期边界条件设置为  $x, y$  方向, 其中  $x$  方向为电边界 (PEC),  $y$  方向为磁边界 (PMC),  $z$  方向设置为激励入射端口. 通过仿真得到该结构单元的散射参量  $S$  参数, 图2(a)是该结构仿真得到的  $S$  参数的幅度 (dB) 曲线, 观察可以发现该结构在 8 GHz 附近出现明显谐振. 通过参数提取的方法<sup>[17-19]</sup>提取其等效电磁参数, 图2(b)给出了介电常数  $\epsilon$  和磁导率  $\mu$  实部曲线, 可见在图2(a)对应的 7.83—8.17 GHz 的频带内出现双负.

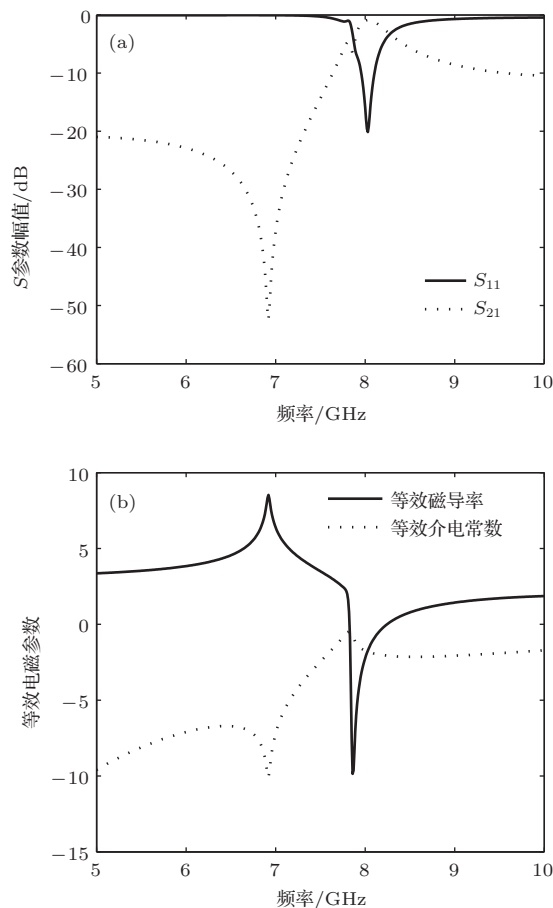


图2 电磁波垂直入射时, 得到 (a)  $S$  参数曲线; (b) 提取的等效电磁参数

图3为电磁波垂直入射时, 前后两个三角形金属结构在谐振点 8 GHz 处的电流分布图, 观察可以发现在三角形结构的宽金属条中既存在与细长金

属线方向相反的纵向电流,也存在与金属线方向相同的横向电流,并且两金属线中的电流方向相同,属于并联关系,根据文献[12]中的分析理论,得到本文结构的等效电路图如图4所示.其中 $C_1$ 为前后两个三角形金属结构之间的等效电容, $L_{11}$ 为中间金属线部分的等效电感, $L_{12}$ 为宽金属条中横向电流对应的等效电感, $L_{13}$ 为宽金属条中纵向电流对应的等效电感.宽金属条中的横向电流是由金属线中电流引起的感应电流,因此 $L_{12}$ 与 $L_{11}$ 一样都是由金属线引入的等效电感,二者串联.由于该三角形结构中间引入了两条相互并联的金属线,所以在图4中会有两个 $L_{11}$ 与 $L_{12}$ 的串联电路相互并联,最后再与 $L_{13}$ 形成并联电路.根据磁谐振频率的表达式

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{2}{C_1L_{11} + C_1L_{12}} + \frac{1}{C_1L_{13}}}}, \quad (2)$$

与文献[12]中的(1)式相比可以看出,中间金属线的增加,使得磁谐振频率 $f_m$ 向高频移动.同时可以发现本文提出的结构与文献[12]中提出结构具有相似的等效磁谐振回路,即在电磁波垂直入射二者具有相同的磁场作用机理.

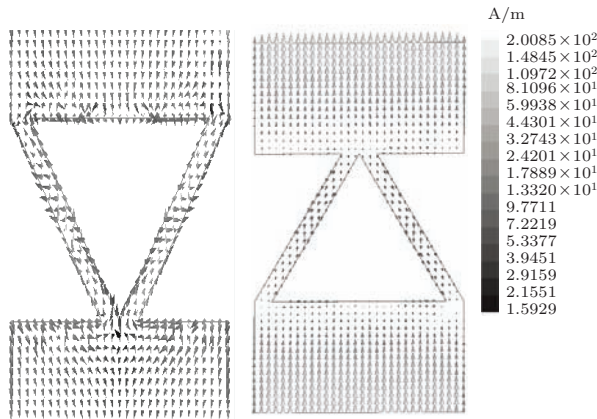


图3 电磁波垂直入射时,在谐振点处前后两个三角形金属结构的电流分布图

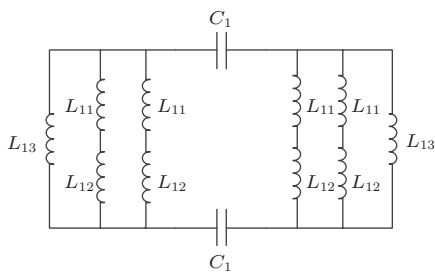


图4 双三角形结构等效电路图

## 2.2 电磁波平行于介质板入射

在电磁波平行入射的情况下,周期边界条件设置中 $x$ 方向保持不变,仍为电边界(PEC),磁边界(PMC)设置为 $z$ 方向, $y$ 方向设置为激励入射端口.通过HFSS仿真得到的 $S$ 参数幅度(dB)曲线如图5(a)所示,提取的等效电磁参数如图5(b)所示.可以看出 $S_{21}$ 参数在8—10 GHz之间存在传输通带,产生明显的谐振,在8.25—8.46 GHz的频域内介电常数 $\epsilon$ 和磁导率 $\mu$ 实部同时为负,表现出左手特性.

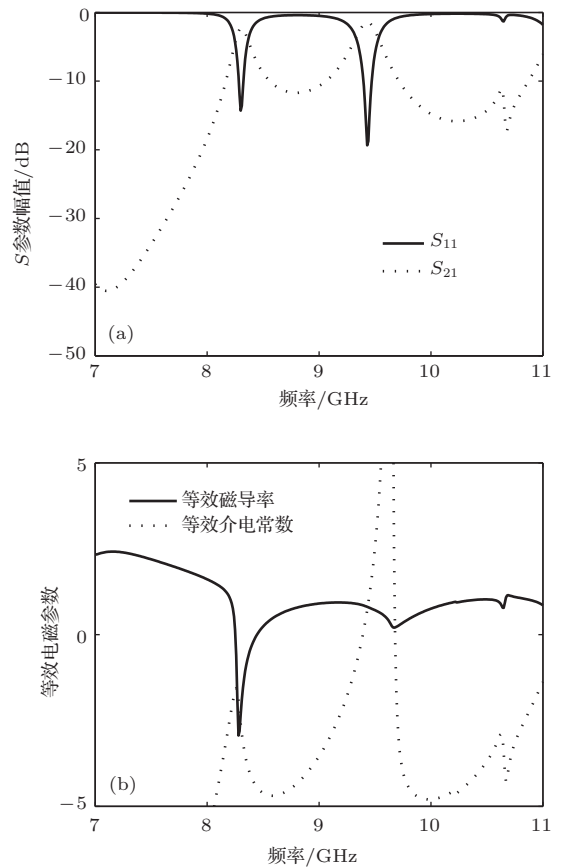


图5 电磁波平行入射时,得到(a) $S$ 参数曲线;(b)提取的等效电磁参数

在电磁波平行入射的情况下,介质板两侧的金属条在等离子体效应的作用下产生电谐振从而实现负的介电常数,此机理与电磁波垂直入射是相同的.而负磁导率的产生机理与垂直入射时完全不同.由于介质板两侧的金属结构是反向对称的,从结构的 $z$ 方向看去,该结构组成了四个相对的三角形和一个菱形,图6为电磁波平行入射时在谐振点处双三角形结构的电流分布图,可以看出 $z$ 向磁场的作用下可耦合形成5个不同的磁谐振环路,从而产生负磁导率.此响应的产生原理与双Z形和双 $\Sigma$

形结构相同, 惟一不同就是各自形成的磁谐振回路个数与分布不同, 这只会对出现双负特性的频段和产生的磁谐振强度有所影响.

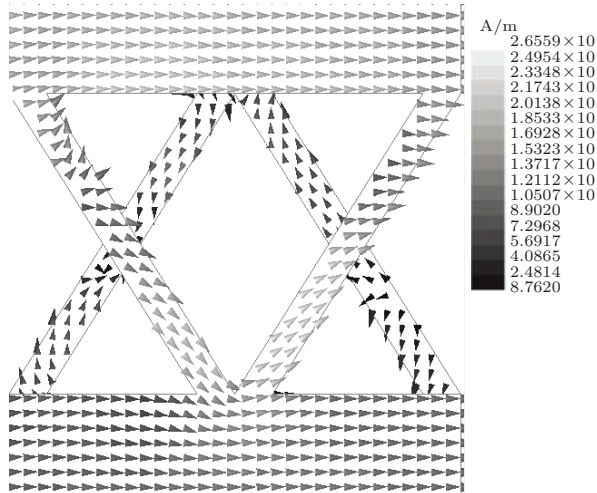


图6 电磁波平行入射时在谐振点处双三角形结构的电流分布图

### 3 衍生结构的设计与对比分析

由于该新形结构的特殊性, 基于该结构可以衍生出一系列结构相似的设计. 本文中提出的三角形结构是两宽金属条中间引入两条交叉细长金属线的结构, 基于该结构, 可以设计出两宽金属条中间引入三条交叉细长金属线、四条交叉金属线等的一系列结构设计. 接下来就分别对中间引入三条与四条交叉金属线的结构进行设计与仿真, 并与前文得出的结论进行对比分析, 得出该一系列结构的内在联系与一般规律.

#### 3.1 中间引入三条金属线结构的仿真分析

中间引入三条金属线的结构如图7所示, 与图1相比惟一不同的就是中间引入了三条交叉细长金属线, 结构的尺寸参数与图1中标示的完全一致, 仿真条件与前文完全相同. 图8(a)为该衍生结构在电磁波垂直入射时的 $S$ 参数幅度(dB)曲线, 可以发现在8—9 GHz的频域内 $S_{21}$ 存在传输通带. 图8(b)为提取得到的等效电磁参数的曲线图, 观察可以发现在图8(a)对应的8.36—8.68的频域内 $\epsilon$ 与 $\mu$ 同时为负.

电磁波平行入射时, 仿真得到图9(a)所示的 $S$ 参数幅度(dB)曲线, 在11.5—12.5 GHz频域内 $S_{21}$ 存在明显传输通带, 再观察图9(b)所示的等效电

磁参数曲线, 在12.3—12.5的频域内出现双负.

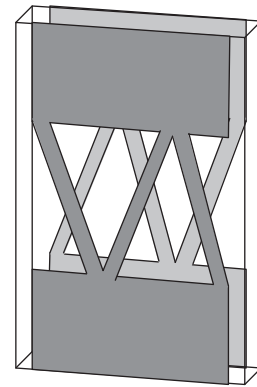


图7 中间引入三条金属线结构

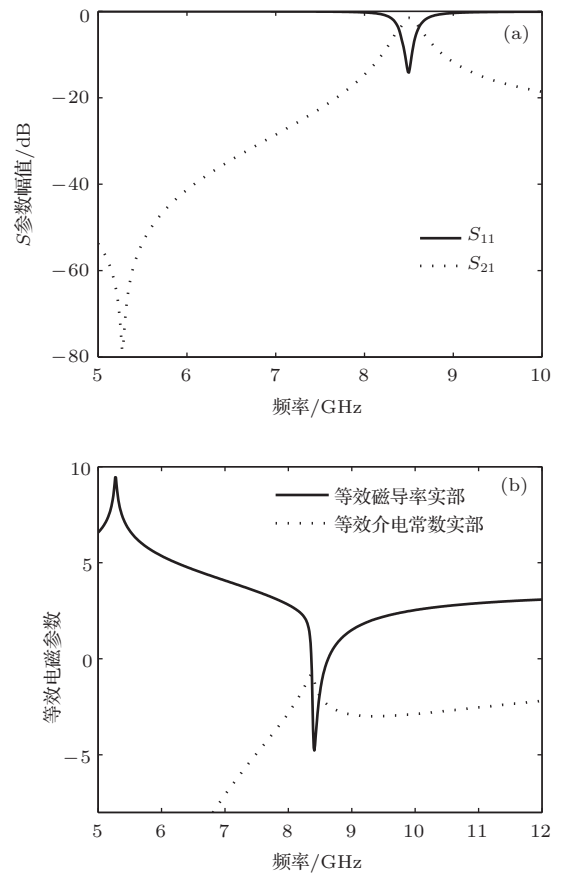


图8 电磁波垂直入射时, 得到(a) $S$ 参数曲线; (b)提取的等效电磁参数

#### 3.2 中间引入四条金属线结构的仿真分析

本文结构衍生的又一种类型形结构如图10所示, 中间引入金属线个数变为四条. 在电磁波垂直入射的条件下得到图11(a)所示的 $S$ 参数幅度(dB)曲线, 可以看出 $S_{21}$ 在9 GHz附近存在传输通带, 图11(b)为提取的等效电磁参数, 在8.98—9.13 GHz的频域内实现了双负的特性.

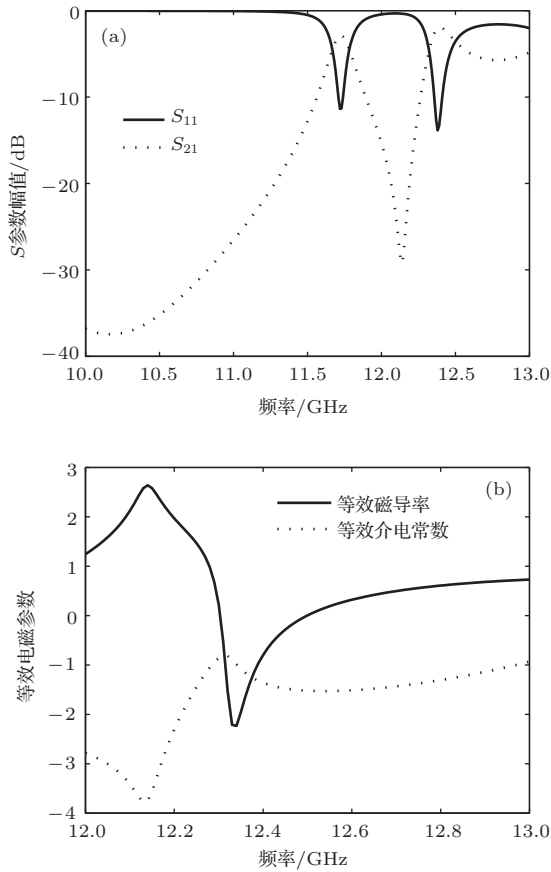


图9 电磁波平行入射时, 得到(a)S参数曲线; (b)提取的等效电磁参数

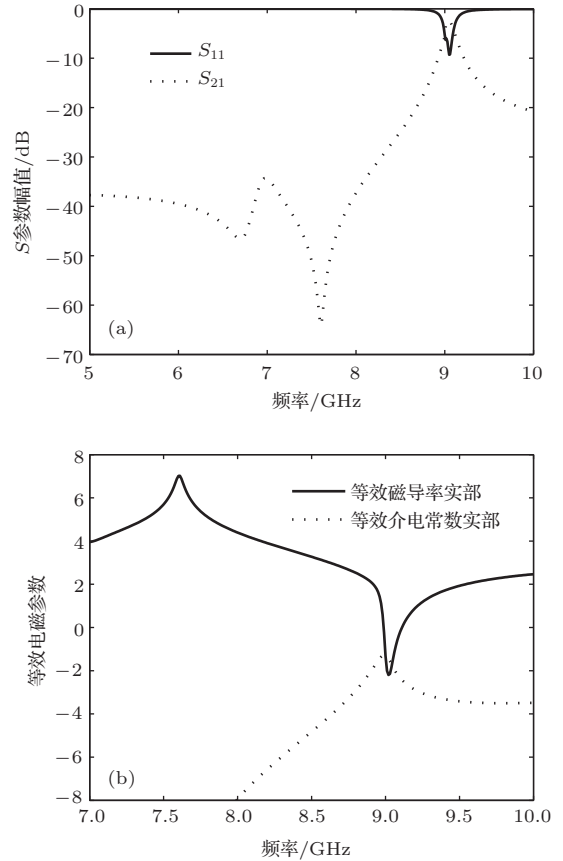


图11 电磁波垂直入射时, 得到(a)S参数曲线; (b)提取的等效电磁参数

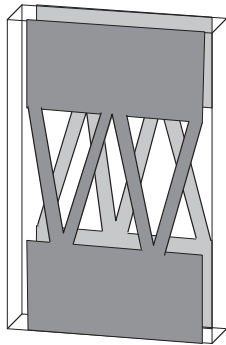


图10 中间引入四条金属线结构

电磁波平行入射时, 仿真与提取得到的  $S$  参数幅度 (dB) 曲线和等效电磁参数曲线如图 12(a), (b) 所示, 可以看出在 16—17 GHz 的频域内  $S_{21}$  存在传输通带, 并在 16.62—16.79 GHz 的频域内实现双负特性.

对以上所有的实验结果进行比较分析, 对比三种结构仿真得到的  $S$  参数, 发现在相同的仿真条件下, 三种结构具有一致的电磁响应, 一个明显的差异就是不同结构出现左手特性的频域不同. 对比三种结构的等效电磁参数可知, 在电磁波垂直入射的

条件下, 三种结构出现左手特性的频域分别为: 两条金属线 (7.83—8.17 GHz); 三条金属线 (8.36—8.68 GHz); 四条金属线 (8.98—9.13 GHz). 比较分析可以归纳出该类形结构的一般特性: 电磁波垂直入射时, 随着结构中间引入的金属线个数的增加, 结构的谐振频率呈线性增长趋势, 每增加一根金属线, 谐振频率向高频方向移动 0.5 GHz 左右. 在电磁波平行入射条件下, 三种结构出现左手特性的频域分别为: 两条金属线 (8.25—8.46 GHz); 三条金属线 (12.3—12.5 GHz); 四条金属线 (16.62—16.79 GHz). 同样可以归纳出: 电磁波平行入射时, 谐振频率也是随着结构中间引入金属线个数的增加呈线性增长趋势的, 每增加一根金属线, 谐振频率向高频方向移动 4 GHz 左右.

这里需要说明的是, 电磁波垂直入射时, 在谐振点处结构中间各金属线中的电流方向相同, 各金属线引入的等效电感相互并联. 对于中间引入三条金属线的结构, 其等效电路中有三部分由金属线引入的等效电感相互并联, 而双三角形结构等效电路中有两部分金属线引入的等效电感相互并联, 显然中间引入三条金属线结构的总电感比双三角形结

构的总电感小. 由谐振频率公式计算得出三条金属线结构的磁谐振频率

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{C_1L_{11} + C_1L_{12}} + \frac{1}{C_1L_{13}}}. \quad (3)$$

与(2)式相比可知中间引入三条金属线结构的磁谐振频率较双三角形结构向高移动. 同理中间引入四条金属线结构的磁谐振频率也向高频移动. 然而电磁波平行入射时结构的磁谐振机理与垂直入射时完全不同. 电磁波平行入射时结构的磁谐振是由结构耦合成的谐振环路所产生的, 结构中间引入金属线越多, 耦合成的谐振环路越多, 并且各谐振环路在磁谐振点处形成方向相同的电流环, 属于并联关系. 多个谐振环路的并联会使结构整体等效电感减小, 由磁谐振频率的计算公式  $f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  可以看出, 电磁波水平入射时, 增加结构中间引入金属线的个数会使结构的磁谐振频率向高频移动.

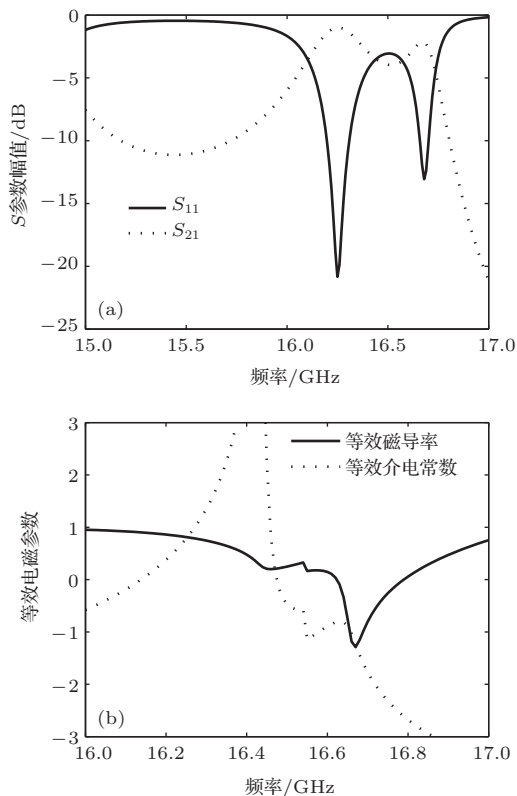


图12 电磁波平行入射时, 得到(a)S参数曲线; (b)提取的等效电磁参数

## 4 结 论

本文基于两宽金属条中间引入两细长交叉金属线的三角形金属结构, 提出了一种新型的二维左手材料结构, 同时也衍生出了一系列类形结构. 通

过仿真模拟, 验证了该类形结构在电磁波垂直和平行入射时均出现左手通带. 通过对比分析发现: 相同仿真条件下, 各结构具有相同的电磁响应; 无论电磁波以哪种方式入射, 随着结构中间引入的金属线个数的增加, 结构的谐振频率呈线性增长趋势. 垂直入射时, 每增加一根金属线, 谐振频率向高频方向移动0.5 GHz左右; 水平入射时, 每增加一根金属线, 谐振频率向高频方向移动4 GHz左右. 通过对三种衍生结构的仿真对比, 归纳出了该系列结构的一般规律, 对该类形结构左手材料的应用提供了参考价值, 同时进一步推动二维以及多维左手材料的研究.

## 参考文献

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [3] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 418
- [4] Zhou J F, Economou E N, Koschny T, Soukoulis C M 2006 *Opt. Lett.* **32** 3620
- [5] Grzegorzczak T M, Moss C D, Lu Jie, Chen X D 2005 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **53** 2956
- [6] Chen H S, Ran L X, Huangfu J T, Zhang X M, Chen K S 2004 *Phys. Rev. E* **70** 057605
- [7] Liu Y H, Luo C R, Zhao X P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5883 (in Chinese) [刘亚红, 罗春荣, 赵晓鹏 2007 物理学报 **56** 5883]
- [8] Huang H Y, Ding Sh, Wang B Z, Zang R 2014 *Chin. Phys. B* **23** 064101
- [9] Huang Y J, Wen G J, Li J, Zhong J P, Wang P, Sun Y H, O Gordon, Zhu W R 2012 *Chin. Phys. B* **21** 117801
- [10] Zhou J F, Zhang L, Tuttle G, Koschny T, Soukoulis C M 2006 *Phys. Rev. B* **73** 041101
- [11] Zhang S, Qu S B, Ma H, Xie F, Xu Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3961 (in Chinese) [张松, 屈绍波, 马华, 谢峰, 徐卓 2009 物理学报 **58** 3961]
- [12] Wang H X, Lü Y H, Zhang H X, Wu Y L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 034101 (in Chinese) [王海侠, 吕英华, 张洪欣, 吴艳玲 2011 物理学报 **60** 034101]
- [13] Tian Z J, Chen W C, Fan J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 074102 (in Chinese) [田子建, 陈文超, 樊京 2013 物理学报 **62** 074102]
- [14] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 25
- [15] Markos P, Soukoulis C M 2002 *Phys. Rev. E* **65** 036622
- [16] Kokkinos T, Sarris C D, Eleftheriades G V 2005 *IEEE Trans. Micro. Theo. Tech.* **53**
- [17] Ziolkowski R W 2003 *IEEE Trans. Ante. Prop.* **51** 1516
- [18] Smith D R, Vier D C, Koschny Th, Soukoules C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617
- [19] Szabo Z, Park G H, Hedge R, Li E P 2010 *IEEE Trans. Microwave. Theory. Tech.* **58** 2646

# Performance analysis of double incidence derivative metamaterial based on double-triangular structure\*

Tian Zi-Jian<sup>1)†</sup> Li Wei-Xiang<sup>1)</sup> Fan Jing<sup>2)</sup>

1) (*School of Mechanical Electronic & Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China*)

2) (*Department of Electronics and Electrical Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China*)

( Received 7 July 2014; revised manuscript received 18 August 2014 )

## Abstract

A new two-dimensional left-handed material based on double-triangular structure is proposed. The simulation software HFSS is used to analyse the structure and its derivative structure. Results show that this type of structure can present left-handed properties when electromagnetic waves are incident on either perpendicularly or parallelly the plane of the substrate. And the general rule for this type structure is that: When the incident electromagnetic wave is in the perpendicular or parallel direction, and for each additional metal strip in the middle of the metal wires, the resonant frequency of the structure moves to higher frequencies around 0.5 or 4 GHz. These can be of reference values in further development of multi-dimensional left-handed material.

**Keywords:** double-triangular structure, two-dimensional, derivative structure, left-handed material

**PACS:** 41.20.Jb, 78.20.Ci

**DOI:** [10.7498/aps.64.034102](https://doi.org/10.7498/aps.64.034102)

---

\* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51134024), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2012AA062203), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U1261125).

† Corresponding author. E-mail: [tianzj0726@126.com](mailto:tianzj0726@126.com)