

基于发卡式开口谐振环的柔性双频带超材料

刘海文 朱爽爽 文品 覃凤 任宝平 肖湘 侯新宇

A flexible dual-band metamaterial based on hairpin split-ring resonators

Liu Hai-Wen Zhu Shuang-Shuang Wen Pin Qin Feng Ren Bao-Ping Xiao Xiang Hou Xin-Yu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 038101 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.038101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.038101>

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

温度测量范围加倍的单微环传感器

Doubled temperature measurement range for a single micro-ring sensor

物理学报.2014, 63(15): 154209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154209>

基于频率选择表面的双层改进型互补结构太赫兹带通滤波器研究

Terahertz bandpass filter using double-layer reformative complementary frequency selective surface structures

物理学报.2014, 63(10): 104209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104209>

输出能量4mJ的1kHz飞秒掺钛蓝宝石激光再生放大研究

A 4 mJ femtosecond Ti: sapphire regenerative amplifier at 1 kHz repetition rate

物理学报.2014, 63(10): 104211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104211>

一种带有U形波导的交叉信道单微环电光开关

A cross bus single microring electro-optical switch with U bend waveguide

物理学报.2014, 63(9): 094207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.094207>

碳硅二炔结构及性质分子动力学模拟研究

Molecular dynamics study on the structure and properties of silicon-graphdiyne

物理学报.2013, 62(23): 238101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.238101>

基于发卡式开口谐振环的柔性双频带超材料*

刘海文^{1)†} 朱爽爽¹⁾ 文品¹⁾ 覃凤¹⁾ 任宝平¹⁾ 肖湘¹⁾ 侯新宇²⁾

1) (华东交通大学信息工程学院, 射频通信与传感器网络江西省重点实验室, 南昌 330013)

2) (中国航天科工集团第二研究院 207 所, 北京 100084)

(2014 年 8 月 26 日收到; 2014 年 9 月 14 日收到修改稿)

本文设计了一种基于开口谐振环 (split ring resonator, SRR) 混合排列单元格的小型化双频带超材料 (metamaterial, MM). 该 MM 的单元结构为发卡式 SRR, 所设计的双频带 MM 可以应用于无线局域网 (2.4 GHz) 和全球微波互联接入 (3.5GHz) 系统. 并且, 采用柔性介质作为基板增加了 MM 的柔韧度和普适性, 实验和测试结果表明: 双频带 MM 的中心频率可以通过调节 SRR 的尺寸进行控制. 此外, 本文也对 MM 在不同入射角的情况进行了分析, 结果表明 MM 对入射角度不敏感. 最后, 通过 MM 的表面电流分布情况研究, 进一步解释了其双频带谐振频率的产生原理.

关键词: 超材料 (MM), 双频带, 柔性, 开口谐振环 (SRR)

PACS: 81.05.Zx, 42.60.Da, 84.30.Vn, 41.20.Jb

DOI: 10.7498/aps.64.038101

1 引言

超材料 (metamaterial, MM) 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, 由于其新的物理现象和电磁特性, 受到了越来越广泛的关注. 人工磁性和负的折射率是 MM 两个独有的特性^[1], 采用 MM 设计隐身衣、集线器、调制器等, 成为未来 MM 应用的研究趋势. 目前, MM 针对单频带进行了较多的研究, 特别是, 开口谐振环 (Split ring resonator, SRR) 所具有的结构简单、易于分析的优点, 使其成为 MM 设计的首选结构. 而且, 针对不同类型 SRR 的谐振特性, 国内外学者已经做了大量的研究工作^[2-5], 这些 SRR 通常实现的是单频带的效果.

近年来, 随着多频带无线通信系统的快速发展, 具有小型化、多频带特性的 MM 滤波器件逐渐成为研究热点. 以往人们设计多频带滤波器, 是将具有不同谐振频率的谐振器进行组合^[6-9]、对结构进行分形^[10,11] 或者采用多层结构^[12-14]. 然而,

上述方法增大了设计和加工的难度, 并且会使结构尺寸增加. 文献^[15] 基于 SRR 提出了一个双频带结构, 然而尺寸仍然较大. 因此, 设计结构更简单、尺寸更小且更易于集成的多频带 MM 滤波器件^[16-18], 显得尤为必要. 尽管如此, 在设计多频带 MM 时, 对频带谐振频率的灵活调控仍然很难实现. 另一方面, 柔性器件在以任意角度集成到应用材料表面时, 仍能保持原来平面的特性, 并且具有自由弯曲、卷绕、折叠、节省空间、减轻重量及灵活性高等诸多特点, 这些特点使其可以应用于柔性显示器以及基于柔性显示器的各种新型电子产品, 如智能手机、柔性屏幕、智能穿戴设备等, 如文献^[19, 20] 采用 SRRs 阵列结构设计了单频带的柔性 MM, 取得了良好应用效果.

基于以上分析, 本文设计了一种柔性且频带单独可控的双频带 MM, 该 MM 采用发卡式的 SRR 实现, 可应用于无线局域网 (wireless local area network, WLAN) 和全球微波互联接入 (worldwide interoperability for microwave access, WiMAX) 系

* 国家自然科学基金 (批准号: 61461020, U1431110) 和江西省国际合作基金 (批准号: 20133BDH80007, 20132BDH80013) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liuhaiwen@gmail.com

统, 其带阻特性可以实现信号的屏蔽作用. 设计的发卡式SRR采用C4结构进行排列^[5](如图2所示)——每个发卡式相对于其相邻SRR旋转90°, 这样有利于减小其对入射角度的敏感性, 因此, 所设计的MM对大入射角度的应用是可行的文中还给出了测试结果, 进而从实验上验证了设计方法的正确性.

2 超材料结构及其设计

图1(a)中传统的SRR主要用来设计单频带的MM^[21]. 为了设计得到双频带特性MM, 本文基于传统的SRR结构提出了一种紧凑型发卡式SRR结构, 该结构具有两个谐振频率, 其结构拓扑图如图1(b)所示, 从图中可以看出, 发卡式SRR包括外环部分(如图中黄色部分所示)和内环部分(如图中红色部分所示), 将发卡式SRR进行弯折可以实现

整体设计的小型化. 双频带谐振频率的基频主要由外环部分的长度决定, 其计算公式可以近似表示为^[22]

$$f_1 \approx \frac{c}{4L_1\sqrt{(\epsilon_r + 1)/2}} \quad (1)$$

其中 ϵ_r 是相对介电常数, c 为真空中的光速. 在此基础上, 外环部分和内环部分共同作用产生双频带MM的第二个谐振频率, 该设计机理保证了该结构的两个谐振频率方便可控由于本文提出的SRR具有不对称性, 所以对入射角度和极化方式较为敏感, 这极大地限制了MM结构在实际中的应用. 针对该问题, 本文将4个发卡式SRRs组合到一起, 每个SRR相对于其临近的SRR进行90°的旋转, 这种排列方式称为C4结构, 其排列结构图如图2所示, 这种方式的排列实现了一种相对对称的结构, 消除了MM对入射角度和极化方式敏感的缺点.

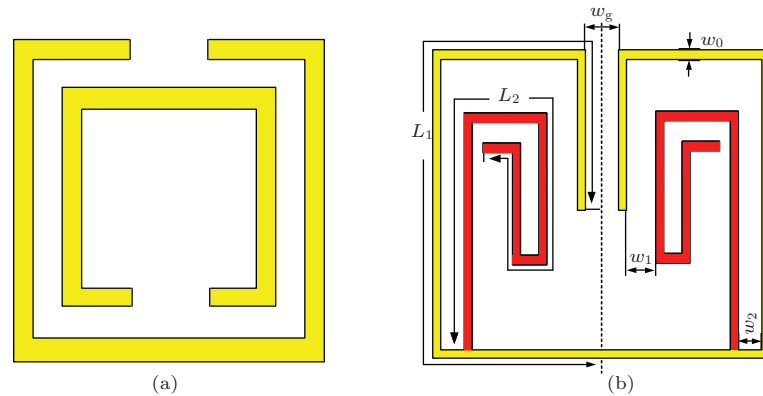


图1 (a) 传统开口谐振环结构示意图; (b) 发卡式开口谐振环结构示意图

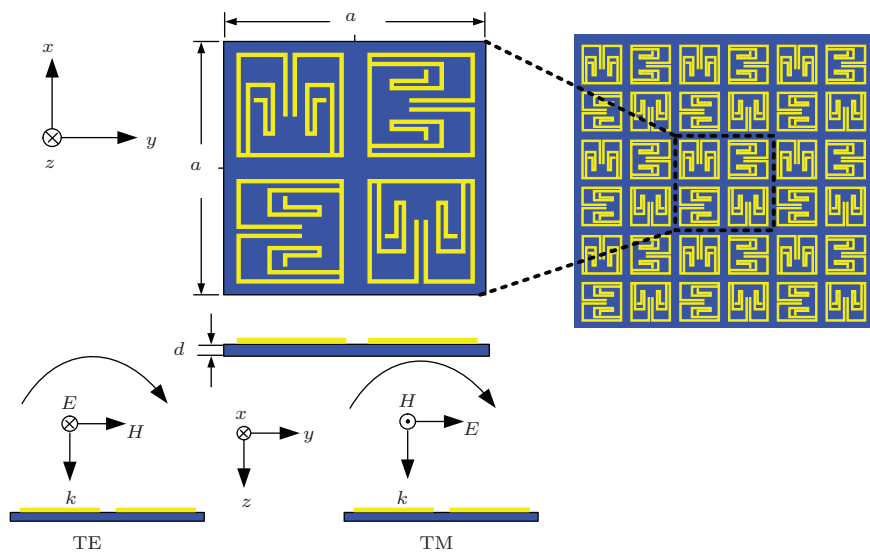


图2 超材料结构图(上部: 放大的周期阵列中的单元结构; 下部: 对应于超材料的电磁波传播方向)

在本文中, 该双频带MM由两层结构组成, 底部为介质基板, 上层为周期排列的单元结构, 这样的设计有利于使加工尽可能简单. 选择的介质基板为PTFE, 厚度为0.127 mm, 相对介电常数为2.2, 介质基板较薄可以使得所设计的双频带MM能够很好的和应用材料表面实现共形, 如图2中所示, 每个单元包含4个发卡式SRRs, 在仿真时, 单元结构位于xy平面内, k 为电磁波的传播方向, TE波极化方向和TM波极化方向也在图2中给出. TE波极化和TM波极化情况类似, 所以本文只研究在TE波极化情况下的MM的特性.

3 结果以及分析

为了研究所提出的双频带MM的性能, 本文采用Ansoft HFSS 13进行仿真, 在仿真过程中, 平面波作为激励源, 设置周期边界条件将单元结构模拟成阵列结构为了得到所需的频段, 首先, 选取合适的 L_1 的长度来设计第一频带的谐振频率; 然后再选取合适的 L_2 的长度来设计第二频带的谐振频率, 最终优化后的结构尺寸为 $L_1 = 25.5$ mm, $L_2 = 19.7$ mm, $w = 0.2$ mm, $w_1 = 0.8$ mm, $w_2 = 0.6$ mm, $w_g = 1$ mm, $\alpha = 24$ mm, 仿真的传输特性结果如图3所示, 从图中可以看出, 设计的MM谐振在2.4 GHz和3.5 GHz, 在2.4 GHz时, 透射系数为-15 dB, 相对带宽为4.2%(2.37—2.47 GHz); 在3.5 GHz时, 透射系数为-29 dB, 相对带宽为2.3%(3.45—3.53 GHz). 由此可见, 该双频MM能够很好的满足WLAN和WiMAX双频带的应用.

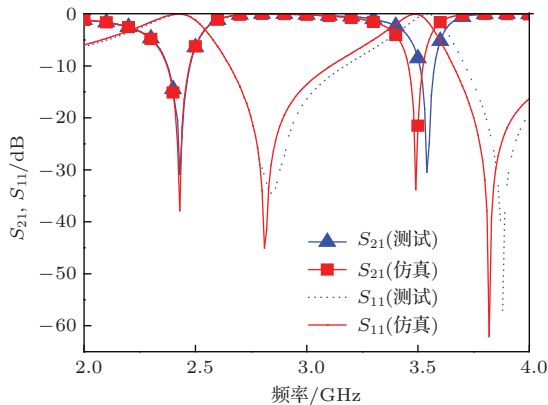


图3 垂直入射角度双频带超材料的频率响应特性

此外, 在测试过程中, 采用矢量网络分析仪产生信号, 将两个一样的喇叭形天线分别作为输入和

输出端口, 为了将测试结果与仿真结果进行对比, 测试结果也在图3中给出, 测试结果和仿真结果相对符合, 其中较小的误差主要是由加工以及测试过程中产生的误差导致的, 考虑实际加工条件的限制, 本文加工的是一个 5×5 单元的结构, 图4为加工的实物图.

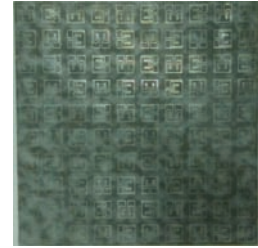


图4 柔性双频带超材料的加工结构实物图

另外, 本文针对不同尺寸的单元结构进行了仿真, 以此来验证双频带MM的工作原理, 对于不同尺寸的 L_1 和 L_2 的仿真结果如图5所示. 从图5(a)中可以看出, 当 L_1 的长度增加时, 第一频带的谐振频率和第二频带的谐振频率都会减小; 从图5(b)中可以看出, 当 L_2 的长度增加时, 只有第二频带的谐振频率有所下降, 第一频带的谐振频率保持不变. 也就是说, 发卡式SRR的第一频带的谐振频率主要由 L_1 的长度决定, 选取我们需要的第一频带的谐振频率后, 进而选择合适的 L_2 的长度, 使第二频带的谐振频率满足我们的需求.

为了验证设计的双频带MM对入射角度的依赖性, 图6给出了入射角度分别为 0° , 15° , 30° , 45° 时双频带MM的频响特性. 从图6可以看出, 在垂直入射(也就是入射角度为 0°)时, 第一频带和第二频带的透射系数分别为-38 dB (2.4 GHz处)和-32 dB (3.5 GHz处); 当入射角度增大到 45° 时, 第一频带和第二频带的透射系数分别为-34 dB (2.4 GHz处)和-36 dB (3.5 GHz处). 同时, 在入射角度增大的过程中, 第一频带和第二频带谐振频率分别有0.02 GHz和0.01 GHz的偏移. 总的来说, 本文设计的MM对入射角度相对比较稳定.

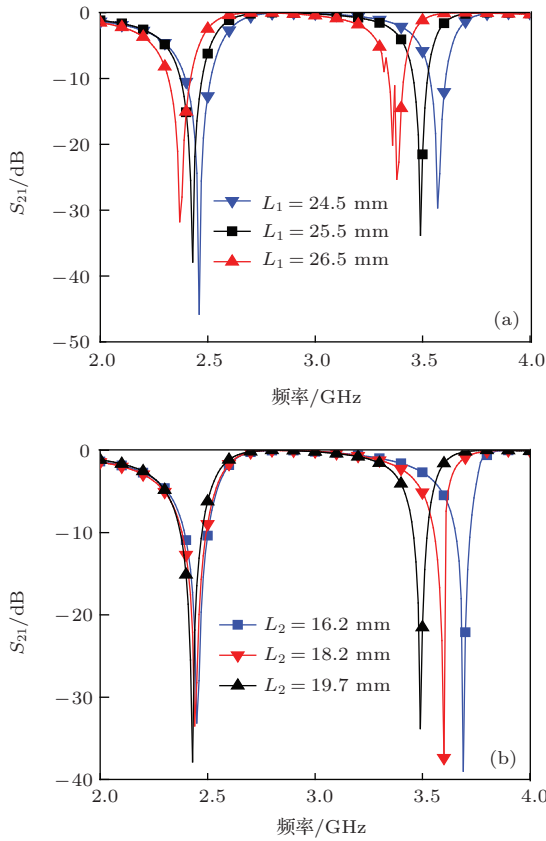


图5 不同尺寸对超材料频率响应特性的影响 (a) L_1 的长度; (b) L_2 的长度

为了进一步的验证单元结构对电磁响应的激励机理, 本文还给出了双频带MM在垂直入射时中心频率点处的表面电流分布情况^[13], 如图7所示. 在第一频带中心频率2.4 GHz处, 电流主要分布于外环部分上, 内环部分上的电流明显比外环部分上的电流弱(如图7(a)所示); 在第二频带中心频率3.5 GHz处, 电流分布于整个SRR上(如图7(b)所示). 此外, 从图7中还可以得出结论: 第一频带的谐振频率主要由 L_1 决定, 而第二频带的谐振频率由 L_1, L_2 共同决定.

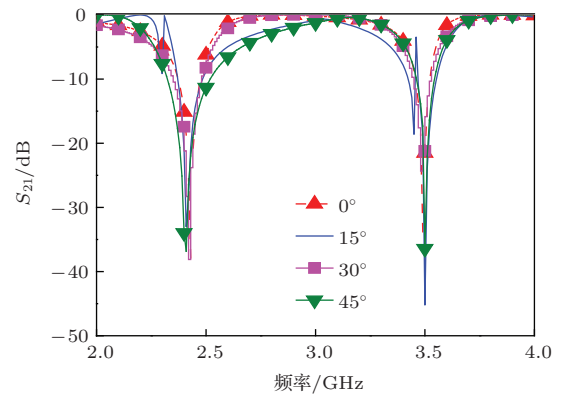


图6 超材料对不同入射角的频率响应特性彩色印刷

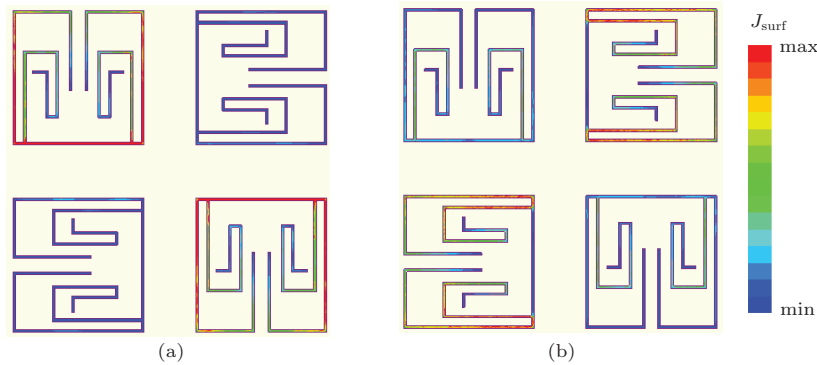


图7 垂直入射时单元结构的表面电流分布图 (a) 2.4 GHz; (b) 3.5 GHz

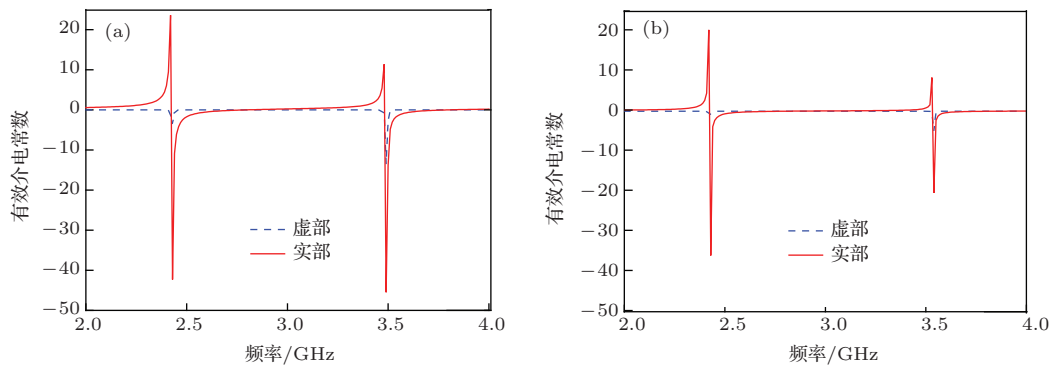


图8 有效介电常数的实部和虚部 (a) 仿真; (b) 测试

基于参考文献 [8] 中的分析理论和计算公式

$$\varepsilon_r \approx \frac{2}{jkd} \frac{1 - S_{11} - S_{21}}{1 + S_{11} + S_{21}}. \quad (2)$$

本文给出了双频带 MM 结构的有效介电常数的仿真和实测结果, 如图 8 所示. 在频带 2.37—2.67 GHz 和 3.52—3.68 GHz 内, 有效介电常数的实部具有负的反应. 至此, 本文实现了一个基于发卡式 SRR 结构的双频带 MM 的设计.

4 结 论

本文对一个柔性的双频带 MM 的传输特性、输入角度稳定性、电流分布进行了分析, 并对加工制作出的双频带 MM 进行测试, 测试结果和仿真结果相对符合, 从而验证了本文设计原理的有效性. 该平面双频带 MM 采用了柔性介质板, 方便加工和测试, 并且易于与应用材料表面进行共形. 总的来说, 设计的柔性双频带 MM 对将来双频带或多频带的隐身介质和共形形状的 MM 研究具有推动作用.

参考文献

- [1] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K 2004 *Science* **305** 788
- [2] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **47** 2075
- [3] Zhou J, Koschny T, Kafesaki M, Economou E N, Pendry J B, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 223902
- [4] Azad A K, Taylor A J, Smirnova E, O'Hara J F 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 011119
- [5] Li Z F, Zhao R K, Koschny T, Kafesaki M, Alici K B, Colak E, Caglayan H, Ozbay E, Soukoulis C M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 081901
- [6] Zhai H Q, Li Z H, Li L, Liang C H 2013 *Microwave Opt Technol Lett.* **55** 1606
- [7] Ma X L, Huang C, Pu M B, Wang Y Q, Zhao Z Y, Wang C T, Luo X G 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 161901
- [8] Li B, He L X, Yin Y Z, Guo W Y, Sun X W 2013 *Microwave Opt Technol Lett.* **55** 988
- [9] Wang X Z, Gao J S, Xu N X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 167307 (in Chinese) [王秀芝, 高劲松, 徐念喜 2013 物理学报 **62** 167307]
- [10] Gao J S, Wang S S, Feng X G, Xu N X, Zhao J L, Chen H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7338 (in Chinese) [高劲松, 王珊珊, 冯晓国, 徐念喜, 赵晶丽, 陈红 2010 物理学报 **59** 7338]
- [11] Ma Y B, Zhang H W, Li Y X, Wang Y C, Lai W E, Li J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 058102
- [12] Wang X Z, Gao J S, Xu N X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 237302 (in Chinese) [王秀芝, 高劲松, 徐念喜 2013 物理学报 **62** 237302]
- [13] Xiong H, Hong J S, Jin D L 2013 *Chin. Phys. B* **22** 014101
- [14] Wang X Z, Gao J S, Xu N X, Liu H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 047303
- [15] Li M H, Yang H L, Hou X W 2010 *Progress In Electromagnetics Research* **108** 37
- [16] Ekmekci E, Turhan-Sayan G 2010 *Electron. Lett.* **46** 324
- [17] Romeu J, Rahmat-Samii Y 2000 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **48** 1097
- [18] da Silva P H F, dos Santos A F, Cruz R M S, D'Assuncao A G 2012 *Microwave Opt Technol Lett.* **54** 771
- [19] Ragi P M, Umadevi K S, Nees P, Jose J, Keerthy M V, Joseph V P 2012 *Microwave Opt Technol Lett.* **54** 1415
- [20] Tao H, Bingham C M, Strikwerda A C, Pilon D, Shrekenhamer D, Landy N I, Fan K, Zhang X, Padilla W J, Averitt R D 2008 *Phys. Rev. B* **78** 241103
- [21] Smith D R 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 024507
- [22] Gao Q, Yan D B, Yuan N C, Fu Y Q 2007 *Journal of Electronics & Information Technology* **29** 506 (in Chinese) [高强, 闫敦豹, 袁乃昌, 付云起 2007 电子与信息学报 **29** 506]

A flexible dual-band metamaterial based on hairpin split-ring resonators*

Liu Hai-Wen^{1)†} Zhu Shuang-Shuang¹⁾ Wen Pin¹⁾ Qin Feng¹⁾ Ren Bao-Ping¹⁾
Xiao Xiang¹⁾ Hou Xin-Yu²⁾

1) (*Department of Information Engineering, East China Jiaotong University-RF communications and sensor networks, Jiangxi Province Key Laboratory 330013, China*)

2) (*Institute No. 207, China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100084, China*)

(Received 26 August 2014; revised manuscript received 14 September 2014)

Abstract

A miniaturization dual-band metamaterial (MM) model with a unit cell of hybrid-aligned hairpin split ring resonator (SRR) is proposed in this letter. The unit cell of this MM structure is a hairpin SRR, and the proposed dual-band MM is designed for security applications of wireless local-area networks (WLAN) at 2.4 GHz and worldwide interoperability for microwave access (WiMAX) at 3.5 GHz. Furthermore, a flexible substrate is adopted to improve the flexibility and practicability of the MM. Both simulated and measured results show that the center frequencies of the dual-band MM can be allocated by properly choosing the dimension parameters of the SRR. In addition, the MM are simulated at different angles of incidence, and the results reveal that the MM can operate quite well over a range of angles of incidence. Finally, the current distribution in the MM has also been investigated to explain the mechanism of the dual-band resonance produced.

Keywords: Metamaterial (MM), dual-band, flexible, split ring resonator (SRR)

PACS: 81.05.Zx, 42.60.Da, 84.30.Vn, 41.20.Jb

DOI: [10.7498/aps.64.038101](https://doi.org/10.7498/aps.64.038101)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China, (Grant Nos. 61461020, U1431110), and the International Cooperation Funds and Science and Technology Innovation Team of Jiangxi Province of China (Grant Nos. 20133BDH80007, 20132BDH80013).

† Corresponding author. E-mail: liuhaiwen@gmail.com