

射电天文用太赫兹三通带频率选择表面设计

刘海文 占昕 任宝平

Design of triple bandpass frequency selective surface in terahertz wave band for radio astronomy

Liu Hai-Wen Zhan Xin Ren Bao-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 174103 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.174103

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174103>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I17>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海面与其上方双矩形截面柱复合散射的混合算法研究

Study on composite electromagnetic scattering from the double rectangular cross-section columns above rough sea surface using hybrid method

物理学报.2015, 64(17): 174101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174101>

基于十字形结构的相位梯度超表面设计与雷达散射截面缩减验证

Design and radar cross section reduction experimental verification of phase gradient metasurface based on cruciform structure

物理学报.2015, 64(16): 164102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164102>

一种采用互补结构的宽阻带共模缺陷地滤波器

A broad stopband common-mode suppression defected ground structure filter with complementary structure

物理学报.2015, 64(16): 164101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164101>

基于变换光学的椭圆形透明聚集器的设计研究

Design and study of the elliptically cylindrical transparent concentrator based on transformation optics

物理学报.2015, 64(15): 154102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154102>

超材料谐振子间的电耦合谐振理论与实验研究

Theoretical and experimental study of the electric resonant coupling between two metamaterial resonators

物理学报.2015, 64(14): 144101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.144101>

射电天文用太赫兹三通带频率选择表面设计*

刘海文^{1)†} 占昕¹⁾²⁾ 任宝平¹⁾

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) (中国人民解放军 73681 部队, 南京 210042)

(2014 年 11 月 22 日收到; 2015 年 3 月 23 日收到修改稿)

本文设计一种基于单屏改进型开口谐振环 (SRR) 的太赫兹频率选择表面 (FSS). 改进型 SRR 谐振单元由具有开口缝的金属贴片组成, 开口缝的物理尺寸会影响其阶跃特征阻抗特性. 本文通过对改进型 SRR 单元结构建立 LC 等效电路模型, 提取等效电路模型参数, 并结合传输线理论, 得到 FSS 的基频计算公式和谐波关系式. 相比于传统均匀 SRR, 本文所提出的改进型 SRR 多频带传输的控制更为灵活. 基于此特点, 设计了一款中心频率依次为 0.46 THz, 0.86 THz 和 1.03 THz, 可应用于射电天文的三通带太赫兹 FSS. 采用电磁仿真软件对影响该 FSS 传输特性的关键参数、周期间隔、小型化程度以及入射角敏感性等重要指标进行分析研究. 结果表明, 改进型 SRR 三通带 FSS 在三个通带内的反射系数分别为 -37.6 dB, -13 dB 和 -19.6 dB, 在 0° — 60° 范围内均具有稳定的频率响应特性, 且具有小型化程度高、损耗低等特点. 这种三通带 FSS 在太赫兹频段射电天文方面有潜在的应用价值.

关键词: 频率选择表面, 太赫兹, 三通带, 开口谐振环

PACS: 41.2Jb, 78.20.Ci, 84.30.Vn, 84.40.-x

DOI: 10.7498/aps.64.174103

1 引言

频率选择表面 (frequency selective surface, FSS) 是一种沿一维或二维方向周期排列的金属贴片阵列或金属平面上的孔径阵列, 可实现低通、高通、带通和带阻等不同的空间滤波特性. FSS 的每个周期单元相当于一个谐振器, 这些无源谐振器在介质层上按一定方式周期性地排列在一起, 构成了对电磁波进行空间滤波的 FSS. 利用 FSS 空间滤波特性, 探索和开发太赫兹 (0.1 到 10 THz) 频段的 FSS, 在射电天文、高温超导材料的性质研究以及化学和生物的检测^[1-3]等领域具有重要的价值. 随着射电天文领域的迅速发展, 如今 FSS 已经广泛应用于太赫兹技术中的准光学系统、雷达罩和电磁屏蔽等领域, 可用作偏振器^[4]、分光镜^[5]、反射镜、谐振腔镜以及滤波器^[6]等. 因此, 小型化、多频段的

太赫兹 FSS 成为射电天文领域中的一个研究热点.

目前, 设计多频带的 FSS 的主要方法有: 1) 多谐振单元方法^[7]; 2) 多层结构方法^[8]; 3) 微扰方法^[9]; 4) 分形单元方法^[10]; 5) 基因算法^[11]等. 方法 1) 和方法 4) 这两种技术, 是通过单元中较大的图形部分或高阶分形部分谐振产生低频通带, 通过较小图形部分或一阶分形部分谐振产生高频通带, 在一定条件下可以使单屏 FSS 结构具有多频特性, 相对于多层的复杂 FSS 结构, 其制作工艺简单, 工程难度较低. 然而, 根据 FSS 具有稳定滤波特性的条件: FSS 工作波长大于衍射边缘波长 (衍射边缘波长与单元周期相关)^[12], 当通带间隔较远时, 高次谐振通带很难满足稳定滤波条件; 另外, 同一单元中不同图形所产生的谐振模式间存在复杂的相互作用, 使 FSS 极易出现模式互作用零点和栅瓣, 影响其滤波特性, 尤其在扫描角度较大时, 也难以产生稳定理想的高次谐振通带. 采用方法 2) 多层

* 国家自然科学基金 (批准号: No. 61461020 和 U1431110) 和江西省国际合作基金 (批准号: 20133BDH80007 和 20132BDH80013) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liuhaiwen@gmail.com

结构往往随着层数越多, 结构越复杂, 传输特性对结构参数的敏感程度越高, 制作成本也会大幅度增加. 方法3)、方法5)中所涉及的分析 and 计算方法复杂, 单元形状与目标的关系不直观, 设计和优化周期长.

本文提出的改进型开口环 (split ring resonator, SRR) 谐振单元结构, 既避免了多谐振单元和分形单元所面临的通带间相互作用较大的问题, 又规避了多层结构中精确对准、剖面厚度及欧姆损耗增加等问题. 改进型 SRR 谐振单元是在传统 SRR 谐振单元的基础上, 通过调节开口缝的物理尺寸从而调节金属贴片的线宽, 使得改进型 SRR 具有区别于传统均匀 SRR 的阶跃阻抗特性. 基于改进型 SRR 谐振单元的阶跃阻抗特性, 结合传输线理论、等效电路法和仿真方法分析了改进型 SRR 谐振单元太赫兹 FSS 的基频、一次谐波、二次谐波与开口缝尺寸之间的关系, 设计了一种可用于射电天文频段的三通带太赫兹 FSS. 利用等效电路模型大大提高了设计速度、缩短了设计周期, 并且还能够直观地反映周期结构的物理机理. 结果表明, 该 FSS 在太赫兹频段产生了三个频点可控的

通带, 通带效果良好. 同时, 第二通带和第三通带之间的传输零点, 大大增强了两个通带之间的隔离度. 在其入射角稳定性、小型化程度方面, 其性能更加优越, 为太赫兹多频带 FSS 设计应用提供了一种有效的方案.

2 三通带频率选择表面理论分析方法

FSS 的理论分析方法主要有三维全波数值分析法和等效电路分析法^[13,14]等. 全波分析法包括周期矩量法、有限元法和时域有限差分法等, 能获得精确的 S 参量、电场及电流分布等信息, 但是在计算过程中需要大量的计算机内存和时间. 等效电路法通过分析 FSS 结构, 建立相应的 LC 等效电路模型, 利用电路模型快速获得 FSS 频率响应特性. 尽管其精度略低于全波分析法的计算结果, 但是能够大大提高设计速度、缩短设计周期, 并能够直观地反映周期结构的物理机理, 加深对 FSS 性能的理解. 因此, 提取有效的等效电路参数, 利用电路模型快速分析 FSS 频率响应特性, 是 FSS 设计和特性分析的关键.

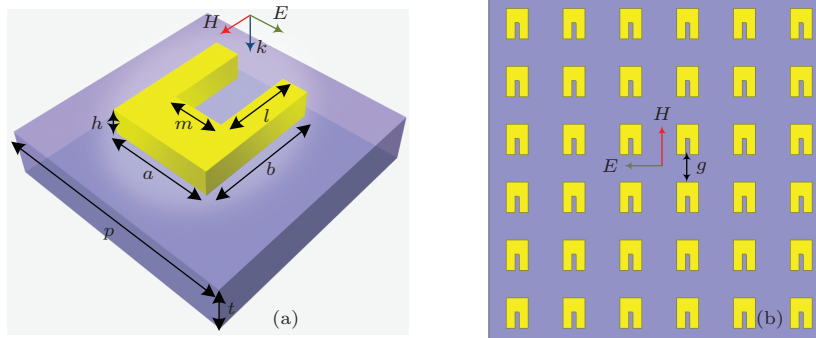


图1 (网刊彩色) (a) SRR 谐振单元结构示意图; (b) 周期阵列结构示意图

Fig. 1. (color online) (a) Schematic diagram of SRR unite cell; (b) schematic diagram of periodic array.

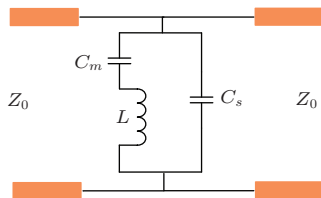


图2 (网刊彩色) FSS 单元等效电路模型

Fig. 2. (color online) Equivalent circuit model of FSS unite cell.

图1(a)为谐振单元结构示意图, 当入射电磁波的电场分量平行于 FSS 屏表面时, 电流会沿着金属贴片流动形成 LC 谐振回路. 本文考虑 FSS 的

单个改进型 SRR 结构, 表征磁场效应的电感 L 的大小由金属贴片的面积 ($a \times b$) 定, 其中 a 是金属贴片的宽度, b 金属贴片的长度; 表征电场效应的电容 C 则包括开口缝电容 C_s 和金属贴片电容 C_m , 并且可以用开口缝的宽长比 m/l 表示, 其中 m 是开口缝的宽度, l 是开口缝的长度. 建立相应的等效电路模型如图2所示.

其谐振频率可近似为

$$f_1 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

此外, 单元周期 p 也会对周期结构间的耦合产生影响, 从而改变谐振频率.

采用传输线理论分析该电路模型, 其 SRR 环的电容、电感可近似为^[15]

$$C = \epsilon_0 m h / l, \quad (2)$$

$$L = -\mu_0 (1/h)^2 (a \times b) h, \quad (3)$$

其中 h 是金属薄膜的厚度, ϵ_0 是相对介电常数, μ_0 是磁导率.

因此, 该 FSS 的基频谐振频率可近似表示为^[15]

$$f_1 \approx \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{l \times (a \times b)}} = \frac{c}{2\pi \sqrt{a \times b}} \cdot \sqrt{\frac{m}{l}}, \quad (4)$$

其中 $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$, 表示真空中的光速.

由(4)式可以看出, 当谐振单元 SRR 的面积 ($a \times b$) 确定时, 可以通过改变开口缝的宽长比 m/l 来调整 SRR 的基频, 即 SRR 的基频可以仅仅通过改变等效电容而不影响等效电感这一简单的方式得以实现.

对于分布参数结构均匀的半波长 SRR 而言, 所有的电路参数都是频率的变量, 随着频率的增大, 将会依次在 $f_1, 2f_1, 3f_1, \dots$ 出现谐波分量, 无法实现多频带单独可控的应用需求. 本文提出的改进型 SRR 则具有区别于传统结构的阶跃特征阻抗特性, 通过改变开口缝的物理尺寸可以改变金属贴片的线宽, 从而影响 FSS 谐波出现的位置, 产生相对单独可控的三通带.

图 1(b) 为 FSS 的阵列结构. 假设金属贴片厚度近似为零, 则平行于磁场 H 方向的金属贴片为容性, g 是谐振单元之间的间距, B 是等效电路模中的容抗, Y_0 是特征导纳, λ 是入射波长, θ 是入射角, 则可得该金属贴片的归一化容抗为^[16]

$$\frac{B}{Y_0} \approx \frac{4a}{p} F(p, g, \lambda), \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} & F(p, g, \lambda) \\ &= \frac{p}{\lambda} \cos \theta \left[\ln \left(\csc \frac{pg}{2p} \right) + G(p, g, \lambda) \right], \\ & G(p, g, \lambda) \\ &= 0.5(1 - C^2)^2 \left[\left(1 - \frac{C^2}{4} \right) (A_+ + A_-) \right. \\ & \quad \left. + 4C^2 A_+ A_- \right] \times \left[\left(1 - \frac{C^2}{4} \right) \right. \\ & \quad \left. + C^2 \left(1 + \frac{C^2}{2} - \frac{C^4}{8} \right) (A_+ + A_-) \right. \\ & \quad \left. + 2C^6 A_+ A_- \right]^{-1}, \\ & A_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{1 \pm \frac{2p \sin \theta}{\lambda} - \left(\frac{p \cos \theta}{\lambda} \right)^2}} - 1, \\ & C = \sin \frac{pg}{2p}. \end{aligned}$$

同理可知, 平行于电场方向的金属贴片为感性, s_i ($i = 1, 2$) 是金属贴片的宽度 (其中 $s_1 = b - l$, $s_2 = (a - m)/2$), X 是等效电路模中的感抗, Z_0 是特征阻抗, 则可得该金属贴片的归一化感抗为

$$\frac{X}{Z_0} \approx \frac{b}{p} F(p, s_i, \lambda). \quad (6)$$

当 FSS 的感抗和容抗确定后, 可得 FSS 的等效导纳 Y_{fss} 为

$$Y_{\text{fss}} = \frac{1}{j(X - 1/B)}. \quad (7)$$

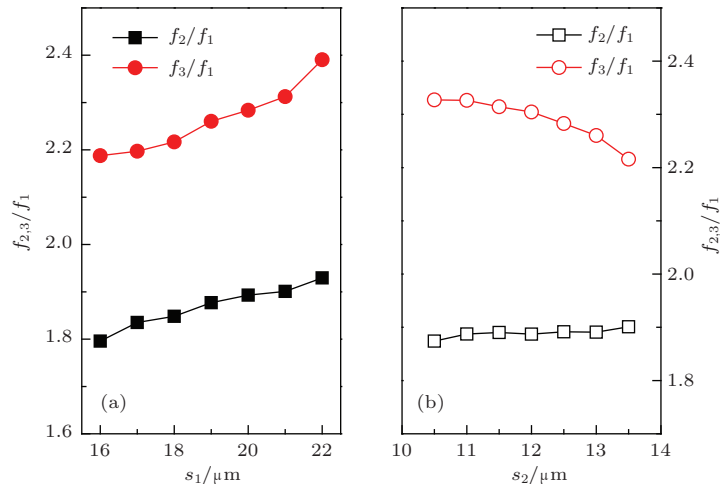


图 3 (网刊彩色) 贴片宽度 (a) s_1 ; (b) s_2 对频率的影响

Fig. 3. (color online) Influence of different patch widths on the frequency: (a) s_1 ; (b) s_2 .

当等效导纳 Y_{fss} 的虚部 $\text{Im}(Y) = 0$ 时, FSS 阵列能够谐振. 若 (7) 式中参量 a, b, g, p 和 θ 均为定值, 则可以得出金属贴片的宽度 s_i 与谐振频率之比的关系如图 3 所示. 由图 3 可知, 当 s_1 增大时, f_2/f_1 和 f_3/f_1 均会变大且后者变化更大, 这表明随着 s_1 的增大, 一次谐波和二次谐波都被拉远, 且对二次谐波的影响更大; 当 s_2 增大时, f_2/f_1 基本保持不变而 f_3/f_1 反而变小, 这表明 s_2 的变化对一次谐波基本没有影响, 但是可以独立调节二次谐波. 因此, 通过选取合适的参数值, 就能够设计出满足应用需求的三通带 FSS.

3 仿真结果与分析

对于所提出的三通带 FSS 结构, 本文采用有限元三维电磁仿真软件 HFSS 对 TE 极化方式的平面波入射情况下滤波器频率响应特性进行了模拟计算. 考虑到太赫兹频段下的低损耗特性, 介质基底选择损耗极低的高温超导材料. 介质基底采用 MgO, 介质基底的厚度 $t = 100 \mu\text{m}$, 相对介电常数 $\epsilon_r = 9.7$. 同时, 选择具有极低损耗的 NbN 超导薄膜, 薄膜厚度 $h = 50 \text{ nm}$. FSS 的频率选择特性, 包括谐振频率、通带频带宽度等, 可以通过调整 FSS 的单元结构来控制 [17]. 本文通过调整改进型 SRR 的几何结构, 设计出三个中心频率为 0.46 THz, 0.86 THz 和 1.03 THz, 且相对带宽分别为 50%, 14%, 9.7%, 可在射电天文用的太赫兹带通滤波器. 仿真结果如图 4 所示.

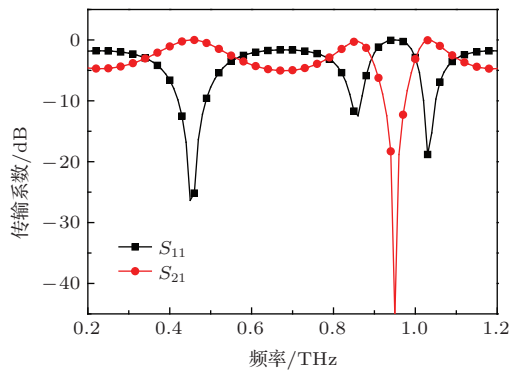


图 4 (网刊彩色) 频率响应特性

Fig. 4. (color online) Simulated frequency response of FSS.

3.1 尺寸与频率响应特性的关系分析

改进型 SRR 带通滤波器的特性 (如谐振频率、通带带宽等) 可以通过调整谐振单元结构参数

来控制. SRR 单元形状简单, 工艺精度容易达到, 适合正方形格子排列. 图 1 结构中, $a = 30 \mu\text{m}$, $b = 42.5 \mu\text{m}$, $p = 80 \mu\text{m}$. 根据传输线理论, FSS 的基频可由 (4) 式确定.

由图 5 可以看出, 对应开口缝的长度 l 取不同值, 第一通带的中心频率 (f_1) 没有变化, 但是第二通带和第三通带的中心频率 (f_2, f_3) 均随着 l 的增加向低频偏移. 同时, 第三通带的反射系数增加而第二通带的反射系数减小. 读图可知, 当 $l = 24.5 \mu\text{m}$ (绿色三角点线) 时, 第二通带的插入损耗未达到 -10 dB , 无法满足 FSS 在通信系统中的应用需求; 当 $l = 23.5 \mu\text{m}$ (蓝色菱形点线) 时, 在 0.98 THz 处出现干扰, 会影响该频点处的滤波效果; 而当 $l = 22.5 \mu\text{m}$ (红色三角点线) 时, FSS 既能满足插入损耗的要求又能排除寄生通带的干扰, 从而较好地实现滤波. 由此可见, 参数 l 对第二通带和第三通带的中心频率 (f_2, f_3) 及相对带宽 (FBW1, FBW2) 均有重要影响.

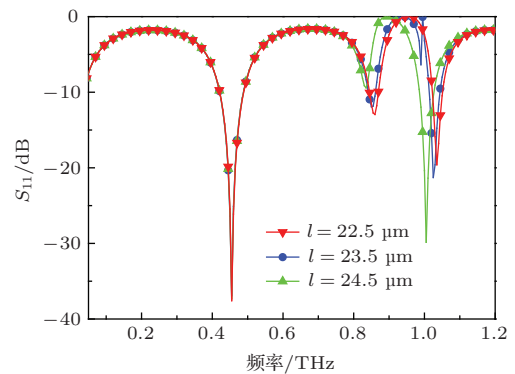


图 5 (网刊彩色) 参数 l 对 FSS 频率响应特性的影响

Fig. 5. (color online) Simulated S_{11} with different l .

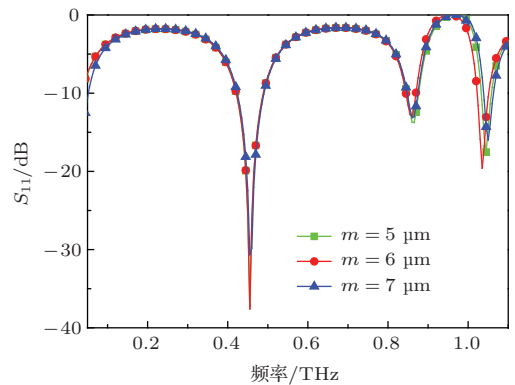


图 6 (网刊彩色) 参数 m 对 FSS 频率响应特性的影响

Fig. 6. (color online) Simulated S_{11} for different m .

开口缝的宽度 m 对 FSS 频率响应特性的扫描结果如图 6 所示. 从图 6 中可以看出, 改变参数 m

对第一通带和第二通带的中心频率 (f_1, f_2) 及相对带宽 (FBW1, FBW2) 均没有明显的影响, 但是能独立控制第三通带的中心频率 (f_3). 当 $m < 6 \mu\text{m}$ 时, f_3 随着 m 的增大而减小; 当 $m > 6 \mu\text{m}$ 时, f_3 随着 m 的增大而增大; 当 $m = 6 \mu\text{m}$ 时, $f_3 = 1.03 \text{ THz}$, 且该点处插入损耗达到 -19.6 dB , 实现良好的带通效果.

3.2 周期间隔与频率响应特性的关系分析

改进型 SRR 的参数 ($a = 30 \mu\text{m}, b = 42.5 \mu\text{m}, l = 22.5 \mu\text{m}, m = 6 \mu\text{m}$) 保持不变, 改变相邻两环之间的周期间隔 p , 周期间隔由每步 $20 \mu\text{m}$ 从 $40 \mu\text{m}$ 增加到 $80 \mu\text{m}$, 其周期间隔与频率响应特性 (反射系数和透射系数) 的关系如图 7(a) 所示. 由图 7(b) 可以更加直接地观察到: 第一通带和第二通带的中心频率 (f_1, f_2) 随着 p 的增大略有升高, 但变化不明显, 而第三通带的中心频率 (f_3) 却随着 p 的增大反而降低; 同时三个通带的反射系数均随着 p 的增大逐渐增大. 这是由于在正入射条件下, 当增大周期间隔时, 电磁波损耗增高, 因此传输的能量会减小, 反射系数会逐渐增大.

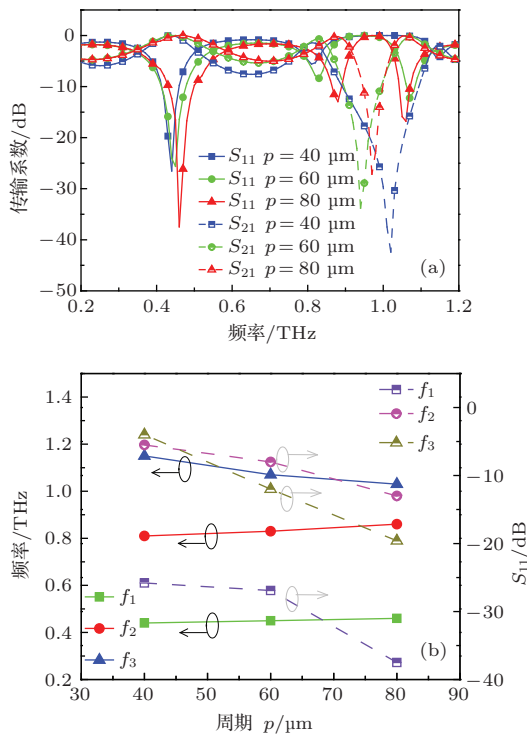


图7 (网刊彩色) (a) 周期间隔 p 对 FSS 频率响应特性的影响; (b) 周期间隔 p 与中心频率及反射系数的关系
Fig. 7. (color online) (a) The influence of periodic distances p on FSS frequency response; (b) variation of center frequency and reflection coefficient with periodic distances p .

3.3 入射角敏感性分析

TE 极化波入射角 θ (与 Z 轴的角度) 依次取 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$, 通过仿真得到频率特性的变化情况如图 8 所示. 当 θ 增大时, 三个通带的中心频率 f_1, f_2, f_3 均向高频漂移, 角度稳定性较好. 同时, 带宽和中心频率透过率随着入射角度增加而降低, 说明在通带内均有较好的透射率. 这是因为方格形单元能够获得一致插入相位, 且排布得较为紧密, 可以延迟栅瓣的产生. 仿真结果表明, 在 $0^\circ-60^\circ$ 范围内, 该 FSS 结构的频率响应特性几乎不随入射波的角度发生变化. 这是由于该 FSS 结构的金属贴片在平面上呈现均匀分布, 因此入射角度的改变并没有引起 FSS 周期单元谐振长度的变化, 从而不影响其频率响应特性 [18].

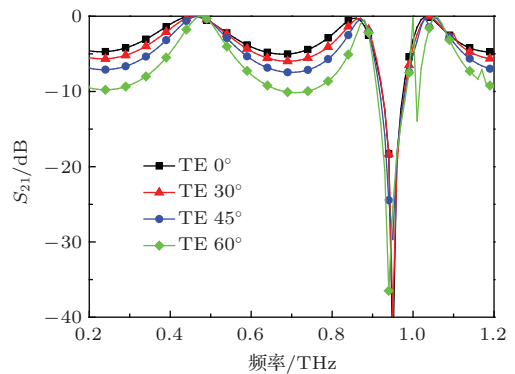


图8 (网刊彩色) 不同极化角度对 FSS 频率响应特性的影响
Fig. 8. (color online) The influence of different incidence angles on FSS frequency response.

4 结 论

本文对传统的 SRR 结构进行了改进, 提出了一种可以通带中心频率单独可调的改进型 SRR 谐振单元. 综合考虑反射系数、透射系数、中心频率和带宽等参数分析, 通过建立等效电路模型和仿真优化, 设计了中心频率为 $0.46 \text{ THz}, 0.86 \text{ THz}, 1.03 \text{ THz}$ 可应用于射电天文的三通带太赫兹 FSS. 该 FSS 的 3 dB 通带范围为 $0.34-0.57 \text{ THz}, 0.78-0.90 \text{ THz}, 1.00-1.10 \text{ THz}$, 相对带宽分别为 $50\%, 14\%, 9.7\%$, 通带内反射系数的峰值依次为 $-37.6 \text{ dB}, -13 \text{ dB}$ 和 -19.6 dB , 具有良好的通带特性, 并且在 0.94 THz 时产生一个传输零点, 增强了通带之间的隔离度. 其单元尺寸为 $0.046\lambda_0 \times 0.065\lambda_0$, 较文献 [19] ($0.103\lambda'_0 \times 0.103\lambda'_0$) 相比分别减小了 55.3% 和 36.9% , 这说明该 FSS

具有小型化的优点. 此外, 通过对入射角敏感性研究发现, 改进型 SRR 谐振结构还具有良好的入射角度稳定性, 在 0° — 60° 范围内均具有稳定的频率响应特性.

参考文献

- [1] Raymond D, Robert C, Vincent F, Harold S G, Neil M 2011 *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **1** 450
- [2] Huang H Y, Ding S, Wang B Z, Zang R 2014 *Chin. Phys. B* **23** 064101
- [3] Leng W X, Ge L N, Xu S S, Zhan H L, Zhao K 2014 *Chin. Phys. B* **23** 107804
- [4] Li S S, Zhang H, Hou Y, Bai J J, Liu W W, Chang S J 2013 *Applied Optics* **52** 3305
- [5] Carelli P, Chiarello F, Cibella S, Di G A, Leoni R, Ortolani M, Torrioli G 2012 *J Infrared Milli Terahz Waves* **33** 505
- [6] Yuan C, Xu S L, Yao J Q, Zhao X L, Cao X L, Wu L 2014 *Chin. Phys. B* **23** 018102
- [7] Wang G D, Liu M H, Hu X W, Kong L H, Cheng L L, Chen Z Q 2014 *Chin. Phys. B* **23** 017802
- [8] Wang W J, Wangle J F, Yan M B, Lu L, Ma H, Qu S B, Chen H Y, Xu C L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 174101 (in Chinese) [王雯洁, 王甲富, 闫明宝, 鲁磊, 马华, 屈绍波, 陈红雅, 徐翠莲. 2014 物理学报 **63** 174101]
- [9] Goussetis G, Feresidis A P 2010 *IET Microw. Antennas Propag.* **4** 1105
- [10] Campos A L P S, Segundo F C G D S, Manicoba R H C, Neto G A, Assuncao A G D 2012 *Microwave Opt Technol Lett.* **54** 2321
- [11] Ohira M, Deguchi H, Tsuji M, Shigesawa H 2004 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **52** 2925
- [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] Dubrovka R, Vazquez J, Parini C, Moore D 2006 *IEE Proc. Microwaves Antenn. Propag* **153** 213
- [14] Costa F, Monorchio A, Manara G 2012 *IEEE Antenn. Propag. Mag.* **54** 35
- [15] Claus J, Niels A M, Anders K 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 193108
- [16] Wang H Q 2008 *Systems Engineering and Electronics* **30** 2054 (in Chinese) [王焕青 2008 系统工程与电子技术 **30** 2054]
- [17] Munk B(translated by Hou X Y) 2009 *A Frequency Selective Surfaces Theory and Design*(Beijing: Science Press) pp688–695 (in Chinese) [Munk B 著 (侯新宇译) 2009 频率选择表面理论与设计 (北京: 科学出版社) 第 688—695 页]
- [18] Wu Z, Wu Z B 2005 *Acta Electron. Sin.* **33** 517 (in Chinese) [武哲, 武振波 2005 电子学报 **33** 517]
- [19] Yan S, Vandenbosch G A E 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 103503

Design of triple bandpass frequency selective surface in terahertz wave band for radio astronomy*

Liu Hai-Wen^{1)†} Zhan Xin¹⁾²⁾ Ren Bao-Ping¹⁾

1) (Department of Information Engineering, East China Jiaotong University, RF Communications and Sensor Networks, Jiangxi Province Key Laboratory, Nanchang 330013, China)

2) (Unit 73681 of PLA, Nanjing 210042, China)

(Received 22 November 2014; revised manuscript received 23 March 2015)

Abstract

A single screen terahertz frequency selective surface (FSS) using the improved split ring resonators (SRRs) is designed in this paper. The resonance unit of an improved SRR consists of an open seam metal patch, while the physical size of the open seam metal patch will directly affect the stepped impedance characteristics. In the paper, LC equivalent circuit model for the improved SRR unit structure is established to extract the equivalent circuit model parameters. Then the relationship between the fundamental frequency of the FSS formula and the harmonics is obtained from the basic theory of the transmission line. Compared to the traditional uniform SRR, the control of multi-band in the improved SRR is more flexible. It is an outstanding characteristic for multi-band FSS design. Based on this characteristic, the triple-band terahertz FSS centered at 0.46, 0.86 and 1.03 THz respectively is designed successively, which can be used in radio astronomy application. By using HFSS 13.0 electromagnetic software simulation, many important indicators such as the key parameters that affect the transmission characteristics of the FSS, periodic intervals, miniaturization degree and the sensitivity of the incidence angle have been studied and analyzed. Both the theoretical analysis and simulated results demonstrate the validity of the method. The triple-band FSS using the improved SRR has a lot of reformative performances. It is shown that the reflection coefficients of triple-band FSS using the improved SRR are -37.6 dB, -13 dB, and -19.6 dB, respectively. On the other hand, it owns the stable frequency response characteristics in the 0° – 60° range, which is beneficial to a large incidence angle. In addition, a high degree of miniaturization and the low loss characteristics are the another two significant advantages of this FSS. This triple-band FSS with improved SRR has potential applications in the terahertz frequency radio astronomy polarizer, beam splitter, mirror and resonator mirror, etc.

Keywords: frequency selective surface (FSS), terahertz, triple-band, split ring resonators

PACS: 41.2Jb, 78.20.Ci, 84.30.Vn, 84.40.-x

DOI: 10.7498/aps.64.174103

* Project supported by the National Science Foundation of China, (Grant No. 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