

基于高阻抗表面的多频带 Salisbury 屏设计

党可征 时家明 李志刚 孟祥豪 王启超

Design of multiband Salisbury screen based on high impedance surfaces

Dang Ke-Zheng Shi Jia-Ming Li Zhi-Gang Meng Xiang-Hao Wang Qi-Chao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 114101 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.114101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

圆极化波反射聚焦超表面

[Circularly polarized wave reflection focusing metasurfaces](#)

物理学报.2015, 64(12): 124102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124102>

基于雷达海杂波的区域性非均匀蒸发波导反演方法

[Inversion of regional range-dependent evaporation duct from radar sea clutter](#)

物理学报.2015, 64(12): 124101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124101>

基于超材料吸波体的低雷达散射截面波导缝隙阵列天线

[Low-RCS waveguide slot array antenna based on a metamaterial absorber](#)

物理学报.2015, 64(9): 094102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094102>

二维宽带相位梯度超表面设计及实验验证

[Design and verification of a two-dimensional wide band phase-gradient metasurface](#)

物理学报.2015, 64(9): 094101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094101>

基于宽带吸波体的微带天线雷达散射截面缩减设计

[Radar cross section reduction of microstrip antenna based on wide-band metamaterial absorber](#)

物理学报.2015, 64(8): 084101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084101>

基于高阻抗表面的多频带Salisbury屏设计*

党可征¹⁾²⁾ 时家明^{1)2)†} 李志刚¹⁾²⁾ 孟祥豪²⁾ 王启超¹⁾²⁾

1) (脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

2) (电子工程学院, 合肥 230037)

(2014年10月15日收到; 2014年11月24日收到修改稿)

为进一步提高传统Salisbury屏的吸波性能, 本文提出了利用高阻抗表面在特定频率同相反射的特性, 替代原有结构中的金属平板设计多频带Salisbury屏的方法. 通过分析不同频率电磁波经高阻抗表面反射后空间电磁场的场强分布, 说明可以通过共用Salisbury屏的损耗层, 在高阻抗表面同相反射的特征频率附近引入新的吸收带. 以不同尺寸方形周期结构的单频和双频高阻抗表面为例, 从仿真和实验两个方面验证了多频带Salisbury屏设计的可行性, 且实验和仿真结果十分符合. 结果表明, 多频带Salisbury屏基本保留了原有的吸波性能, 同时又引入了新的吸收峰, 吸收峰的位置和数量与高阻抗表面同相反射的频带位置和数目有关. 与传统的Salisbury屏相比, 在材料增加厚度不足1 mm的情况下, 多频带Salisbury屏的设计使反射率小于-10 dB的吸波带宽由8.5 GHz增加到10.1 GHz, 且实现了向长波方向的拓展, 最低频率由7.5 GHz拓展到5.98 GHz.

关键词: 高阻抗表面, 人工磁导体, Salisbury屏, 吸波体

PACS: 41.20.Jb, 73.40.Rw, 75.70.cn

DOI: 10.7498/aps.64.114101

1 引言

高阻抗表面 (high impedance surface, HIS)^[1] 是Sievenpiper在1999年首次提出的一种电磁带隙结构. 这种结构在一定的频带内具有极高的表面阻抗, 能够使入射的电磁波几乎同相反射. 这一特性与理想磁导体近似, 因而学术界也把它称为人工磁导体^[2-4]. 高阻抗表面具有同向反射和表面波抑制特性, 在波导^[5]、天线^[6-8]及RCS缩减等^[9,10]方面均得到了广泛的应用.

高阻抗表面本身吸波性能较差, 但利用其对入射电磁波的强电、磁谐振作用, 可以通过多种方式增加电磁损耗. 例如, Cheng等^[11]设计的双U形结构磁谐振器, 通过加载集总电阻增加磁损耗, 实现了7.7—18 GHz的宽带电磁波吸收, 但加工复杂且

低频吸收效果不足. 而Zhang等^[12]则用磁性材料代替电介质的方法增加磁损耗, 可以有效吸收低频电磁波, 但高频吸收效果较差. 此外, Cheng等^[13]还设计了一种双层结构吸波体, 将电阻型的频率选择表面 (frequency selective surface, FSS) 嵌入HIS的介质中来增加欧姆损耗, 实现了低频电磁波的吸收. 除了利用电磁谐振来拓展吸波带宽, Seman等^[14]还提出了将HIS与传统的Salisbury屏吸波体复合的方法, 且实现了双频或多频吸收, 在一定程度上拓展了吸波带宽. 实质上, 这种复合材料虽然包含HIS结构, 但主要利用了FSS的频率选通特性, 与HIS自身独特的性质无关.

论文则利用了HIS同相反射的特殊性质, 用多频HIS取代传统Salisbury屏中的金属衬底, 在HIS同相反射的频率附近产生出新的吸收频带, 制备得到了具有多频带吸收能力的Salisbury屏.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61171170) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: shijmeei@yahoo.com

2 结构及设计原理

传统的 Salisbury 屏由电阻薄膜、介质隔离层和金属衬底三层结构组成, 当介质层厚度等于四分之一波长时产生峰值吸收. 这种吸波体结构简单, 通过改变介质层厚度, 几乎适用于所有频段的吸波设计, 但存在吸收带宽固定且难以拓展等问题, 此外材料厚度上的要求限制了其在长波吸收方面的应用.

本文设计的 Salisbury 屏用高阻抗表面结构替代普通的金属衬底, 在 HIS 实现同相反射的频率处引入新的吸收峰, 同时几乎完整保留了原有的吸收

频带, 因此称为多频带 Salisbury 屏. 下面对这种吸波体的设计原理进行简单说明.

假设均匀平面电磁波从自由空间垂直入射到 HIS 表面, 根据电磁波传输理论, 在界面处的电磁波反射率为

$$\Gamma = \frac{Z_i - Z_0}{Z_i + Z_0}, \quad (1)$$

其中, Z_0 为自由空间阻抗, 且 $Z_0 = 377 \Omega$, Z_i 为 HIS 的等效输入阻抗.

若已知 HIS 产生同相反射的特征频率为 f_1 , 则在 f_1 处 HIS 可以近似为理想磁导体 (暂不考虑带宽), 在其余频段内可近视为理想电导体, 电磁波在不同频率 f 处将呈现出不同的反射特性.

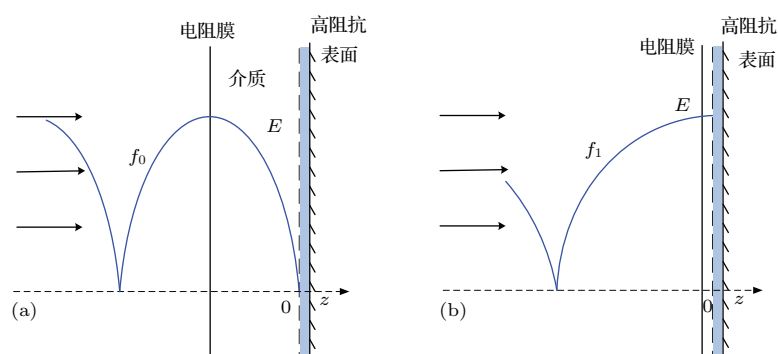


图 1 多频带 Salisbury 屏吸波原理示意, 入射电磁波频率 (a) $f = f_0$; (b) $f = f_1$

Fig. 1. Microwave absorbing mechanism of multiband Salisbury screen at different frequencies: (a) $f = f_0$; (b) $f = f_1$.

1) 当 $f \neq f_1$ 时, HIS 近似为理想电导体 (PEC). 由于理想电导体的电导率是无穷大, 输入阻抗 $Z_i = 0$, 则反射率 $\Gamma = -1$, 即入射电磁波完全反射, 且负号说明相位相反. 根据边界条件, 求解 Maxwell 方程组得到场强分布如下:

$$\begin{aligned} E_r &= 2 |E_i| \cdot \sin(kz) \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2} + \phi_0\right), \\ H_r &= 2 |H_i| \cdot \cos(kz) \cdot \cos(\omega t + \phi_0), \end{aligned} \quad (2)$$

式中, E_i 和 H_i 分别为入射电场和磁场强度, E_r 和 H_r 分别为反射电场和磁场强度, ϕ_0 为入射电场的初始相位.

(2) 式表明, 入射和反射电磁波在空间形成驻波, 且在 $kz = -\left(m\pi + \frac{\pi}{2}\right)$ 即

$$z_m = -\left(\frac{\lambda}{4} + m\frac{\lambda}{2}\right), \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

处, 驻波电场的振幅最大. 若在 z_m 处放置电损耗层, 将有利于消耗电磁波能量, 降低反射波功率.

为实现某一频率 (如 f_0) 的特征吸收, 在 $\lambda/4$ 处放置一层电阻膜, 引入电阻损耗, 如图 1(a) 所示, 同时还要满足阻抗匹配条件, 保证电磁波完全进入材料内部. 这一结构与 Salisbury 屏基本一致, 说明当 $f \neq f_1$ 时, HIS 的加入在本质上并未改变 Salisbury 屏的结构, 对其原有的吸波性能也不会有很大影响.

2) 当 $f = f_1$ 时, HIS 近似为理想磁导体 (PMC). 由于理想磁导体的输入阻抗 $Z_i = \infty$, 则反射率 $\Gamma = 1$, 说明入射电磁波仍会完全反射. 根据边界条件, 求解 Maxwell 方程组得到场强分布如下:

$$\begin{aligned} E_r &= 2 |E_i| \cdot \cos(kz) \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2} + \phi_0\right), \\ H_r &= 2 |H_i| \cdot \sin(kz) \cdot \cos(\omega t + \phi_0). \end{aligned} \quad (4)$$

形式上, 与向理想电导体入射的情况类似, 但形成驻波的波腹和波节点位置发生改变. 此时在 $kz = -m\pi$ 即

$$z_m = -m\frac{\lambda}{2}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (5)$$

处,驻波电场的振幅最大.

(5)式表明,若要吸收频率为 f_1 的电磁波,需要在半波长位置引入电损耗层,但半波长条件比传统的Salisbury屏要求的隔离介质更厚,显然此方法不实用.考虑到当 $m=0$ 时,等式依然成立,说明可以直接将损耗引入HIS,文献[15]在单元间加载贴片电阻的方法正是基于此原理.这种办法虽然可行,但要在每个单元之间都焊接电阻,制备过程复杂,材料成本也很高.最理想的情况就是, f_0 和 f_1 频率的电磁波共用同一个损耗层.

若HIS使用Salisbury屏的电阻膜作为损耗层,在经过隔离介质层后, f_1 频率的驻波强度会大大减弱,难以形成特征吸收.不过,由于实际制备的HIS具有一定的带宽,使得 f_1 附近某一频率(假设为 f'_1)电磁波原本未能同相反射,但经过介质传播并产生相位延迟后在介质和电阻膜界面处同相反射形成驻波,从而在电阻膜上产生强损耗,出现特征吸收.

3 仿真及分析

由前文分析可知,本文设计的Salisbury屏的吸收频带个数取决于高阻抗表面的设计,即HIS能实现同相反射的特征频率越多,Salisbury屏的吸收频带就越多.为进一步说明这一点,本节分别以单频和双频HIS为例,对多频带Salisbury屏的实现进行仿真和分析.

HIS单元及整体结构如图2所示,考虑到对吸波带宽的拓展,HIS的实现采用方形图案周期排列的方法,因为这种设计具有最优的特征带宽.图2(a)所示为典型的单频HIS,所有方形的尺寸相

同;图2(b)所示为双频HIS,由两种不同尺寸的方形交替排列[16].具体参数为:方形边长 $l_0=10.5$ mm, $l_1=8$ mm, $l_2=10.5$ mm,单元周期 $p_0=14$ mm, $p_1=24$ mm;按照复合结构从上至下的顺序,最外层电阻膜的方阻 $R_s=377\ \Omega/\square$;介质隔离层厚度 $d_1=6.6$ mm,介电常数 $\varepsilon_1=1.13$;HIS的介质基体厚度 $d_2=0.6$ mm,介电常数 $\varepsilon_2=4.6$.

采用电磁仿真软件CST微波工作室进行全波段仿真,设置方形图案和HIS衬底材质为PEC,定义周期性边界条件,定义入射端口为平面波垂直入射.由于复合结构的对称性,为简化仿真过程,仅考虑TE模式电磁波入射情况,电场和磁场方向如图2(c)所示.

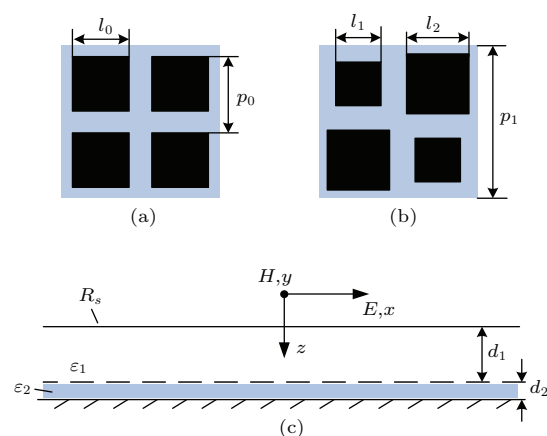


图2 HIS单元及复合结构示意图 (a) 单频HIS单元; (b) 双频HIS单元; (c) 多频带Salisbury屏复合结构

Fig. 2. Sketch of two elements of (a) single band HIS and (b) dual-band HIS, and (c) the side view of the multiband Salisbury screen's complex configuration.

不考虑电阻膜,仿真得到复合结构中HIS表面和介质隔离层表面处电磁波的相位反射特性如图3所示.

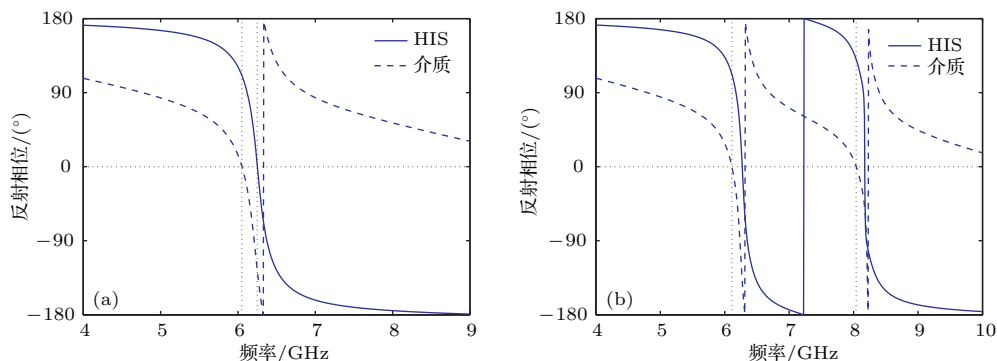


图3 电磁波在HIS表面和介质表面的反射相位对比 (a) 单频HIS; (b) 双频HIS

Fig. 3. Comparisons of the reflection coefficient phase on the outer surfaces of the dielectric layer and (a) the single band HIS and (b) the dual-band HIS respectively.

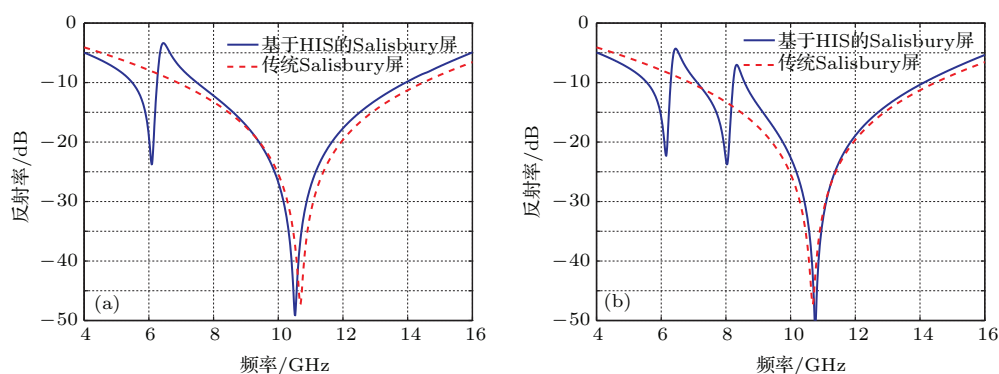


图4 多频带与传统 Salisbury 屏的反射率对比 (a) 单频 HIS; (b) 双频 HIS

Fig. 4. Comparisons of the simulated reflectivity results between the traditional Salisbury screen and the multiband ones based on (a) the single band HIS and (b) the dual-band HIS respectively.

由图3可知, 对于单频 HIS 同相反射的特征频率 $f_1 = 6.25$ GHz, 双频 HIS 的特征频率为 $f_2 = 6.27$ GHz, $f_3 = 8.17$ GHz. 由于介质隔离层的加入, 介质表面位置处产生同相反射的频率与 HIS 相比向低频方向发生偏移, 其中 $f'_1 = 6.05$ GHz, $f'_2 = 6.11$ GHz, $f'_3 = 8.04$ GHz.

加入电阻膜后, 仿真得到多频 Salisbury 屏复合结构对入射电磁波的反射率, 与传统结构的仿真结果进行比较, 如图4所示.

由图4可知, 用 HIS 结构替代传统的金属衬底后, Salisbury 屏产生了新的峰值吸收, 而且原有的吸收峰值位置基本不变. 对于如图2(a)所示的单频 HIS, 新的吸收峰频率为 $f'_1 = 6.08$ GHz; 对于图2(b)所示的双频 HIS, 新的吸收峰频率分别为 $f'_2 = 6.16$ GHz, $f'_3 = 8.03$ GHz, 与之前对同相反射频率的分析完全符合. 新的吸收峰的位置和数量与 HIS 的结构单元密切相关, 说明通过 HIS 单元的设计可以实现对不同频率电磁波的特征吸收, 且 HIS 的同相反射特征频率越多, Salisbury 屏的吸收频带就越多. 此外, 在材料厚度增加很小的情况下

(不足 1 mm), 多频带 Salisbury 屏的吸收频带顺利向长波方向拓展, 这是传统的 Salisbury 屏所无法比拟的.

不过, 虽然多频带 Salisbury 屏的设计会引入新的吸收峰, 但在部分频段处吸波能力有所下降, 因此实际应用中还需要做出权衡.

4 材料制备与测试

采用印刷电路板技术制备高阻抗表面, 单元形状及尺寸与仿真参数相同(见上节), 电路板基材选用普通 FR4 板材, 其相对介电常数为 4.6, 厚度为 0.6 mm, 表面镀铜厚度约 35 μm ; 采用平面印刷技术制备电阻薄膜, 用四探针法测得电阻膜方阻约 380 $\Omega/\square$, 膜厚约 25 μm , 电阻膜覆于 PS 高密度泡沫板上; 泡沫板厚为 6.6 mm, 介电常数为 1.13, 复合结构样品实物如图5(a)所示.

采用如图5(b)所示的测试系统测量样品的雷达波反射率, 样品大小为 180 mm $\times$ 180 mm, 利用矢量网络分析仪 (Anritsu 37347D) 的时域功能消除

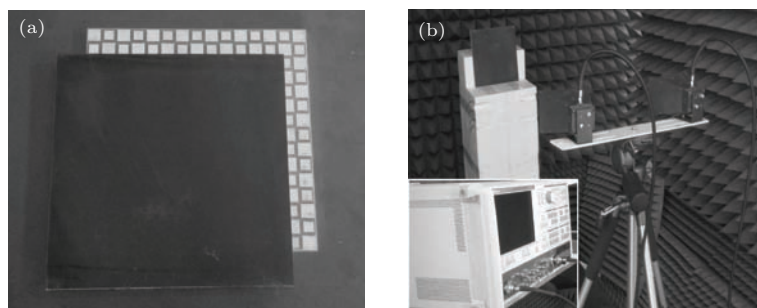


图5 复合结构样品及测试系统实物图 (a) 制备的样品; (b) 反射率测试系统

Fig. 5. Pictures of (a) a testing sample composed of a traditional Salisbury screen and a dual-band HIS ground plane and (b) the reflectivity measurement system comprising two polarized horns and a vector network analyzer (the inset).

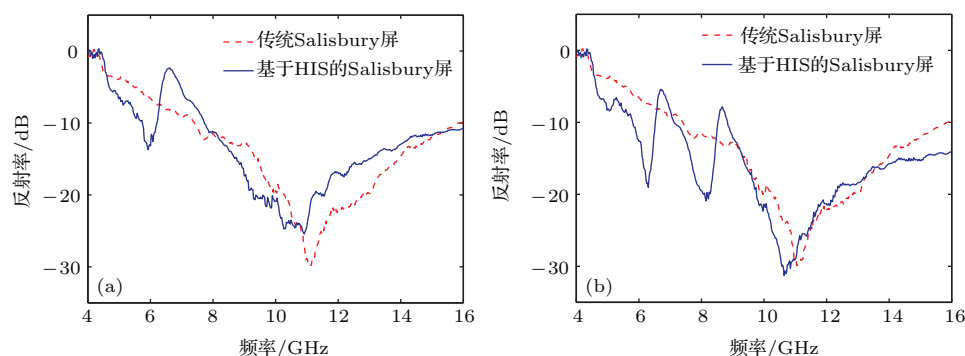


图6 多频带 Salisbury 屏样品反射率测试结果 (a) 单频 HIS; (b) 双频 HIS

Fig. 6. Measured reflectivity results of multiband Salisbury screens based on (a) the single band HIS and (b) the dual-band HIS respectively, compared to the conventional Salisbury screen.

多路径杂波影响, 通过对比样品和相同大小金属标准板的反射信号计算出样品的反射率, 如图6所示.

由图6可知, 不管是采用单频HIS还是双频HIS, 本文设计的Salisbury屏都实现了多频带吸收, 原来的吸收峰强度基本不变, 但位置向低频方向略有偏移, 可能是因为介质隔离层和HIS贴合不够严密, 相当于额外增加了材料厚度; 而新的吸收峰位置分别为 $f'_1 = 5.98$ GHz, $f'_2 = 6.26$ GHz, $f'_3 = 8.12$ GHz, 说明实验测试结果与仿真基本符合, 位置偏差主要是由材料加工误差造成的. 从吸收带宽的角度, 传统的Salisbury屏满足反射率小于10 dB的带宽为8.5 GHz, 双频Salisbury屏为9.3 GHz, 三频Salisbury屏为10.1 GHz, 说明多频带Salisbury屏的设计方法可以有效拓展电磁波吸收带宽, 且吸收峰越多带宽越宽. 更重要的是, 多频带Salisbury屏对带宽的拓展是朝着长波方向, 例如 $f'_1 = 5.98$ GHz和 $f'_2 = 6.26$ GHz这两个位置的吸收峰, 而Salisbury屏原来反射率小于-10 dB的最低频率为7.5 GHz. 不过, 多频带Salisbury在部分频段内出现了吸波性能下降的情况, 与前文的分析一致, 在这点上采用双频HIS的效果要好于单频HIS.

5 结 论

本文将高阻抗表面和传统Salisbury屏复合, 制备得到了多频带吸收体, 实验结果与仿真基本符合. 研究表明, HIS的引入既保留了Salisbury屏原有的吸波特性, 又在同相反射频带内产生了新的吸收峰, 而且HIS的同相反射频带数越多且带宽越宽, 引入的吸收峰数量就越多带宽也越宽. 此外, 通过改变HIS的单元尺寸和形状可以实现低频电磁波

的同相反射, 意味着多频带Salisbury屏吸收体可以在材料增加厚度不足1 mm的情况下, 不断向长波方向拓展. 不过复合结构材料在部分频段的吸波性能有所下降, 这是下一步工作需要克服的问题. 总之, 多频带Salisbury屏既有利于拓展吸波带宽又易于实现长波吸收, 因而在吸波材料的应用方面具有广阔的前景.

参考文献

- [1] Sievenpiper D 1999 *Ph. D. Dissertation* (UCLA)
- [2] Monorchio A, Manara G, Lanuzza L 2002 *IEEE Antenn. Wirel. Pr.* **01** 196
- [3] Clavijo S, Díaz R E, McKinzie W E 2003 *IEEE T. Antenn. Propag.* **51** 2678
- [4] Kretly L C, Silva A M P A 2003 *International Microwave and Optoelectronics Conference* Parana, Brazil Sept. 20–23, 2003 p219
- [5] Ren L H, Luo J R, Zhang C 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 088401 (in Chinese) [任丽红, 罗积润, 张弛 2011 物理学报 **60** 088401]
- [6] Tan Y, Yuan N, Yang Y, Fu Y 2011 *Electron. Lett.* **47** 582
- [7] Vallecchi A, De Luis J R, Capolino F, De Flaviis F 2012 *IEEE T. Antenn. Propag.* **60** 51
- [8] Almutawa A T, Mumcu G 2013 *IET Microw. Antenna. P.* **07** 1137
- [9] Zhao Y, Cao X Y, Gao J, Yao X, Ma J J, Li S J, Yang H H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 154204 (in Chinese) [赵一, 曹祥玉, 高军, 姚旭, 马嘉俊, 李思佳, 杨欢欢 2013 物理学报 **62** 154204]
- [10] Iriarte Galarregui J C, Tellechea Pereda A, Martinez De Falcon J L, Ederra I, Gonzalo R, de Maagt P 2013 *IEEE T. Antenn. Propag.* **61** 6136
- [11] Cheng Y Z, Gong R Z, Nie Y, Wang X 2012 *Chin. Phys. B* **21** 127801
- [12] Zhang H B, Deng L W, Zhou P H, Zhang L, Cheng D M, Chen H Y, Liang D F, Deng L J 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 013903

- [13] Cheng Y Z, Wang Y, Nie Y, Zheng D H, Gong R Z, Xiong X, Wang X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 134102 (in Chinese) [程用志, 王莹, 聂彦, 郑栋浩, 龚荣洲, 熊炫, 王鲜 2013 物理学报 **62** 134102]
- [14] Seman F C, Cahill R, Fusco V F, Goussetis G 2011 *IEE Microw. Antenna. P.* **05** 149
- [15] Seman F C, Cahill R, Fusco V 2010 *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation* Barcelona, Spain, April 12–16, 2010 p1
- [16] Fu Y Q, Li Y Q, Yuan N C 2011 *Microw. Opt. Techn. Lett.* **53** 712

Design of multiband Salisbury screen based on high impedance surfaces*

Dang Ke-Zheng¹⁾²⁾ Shi Jia-Ming^{1)2)†} Li Zhi-Gang¹⁾²⁾
Meng Xiang-Hao²⁾ Wang Qi-Chao¹⁾²⁾

1) (State Key Laboratory of Pulsed Power Laser, Hefei 230037, China)

2) (Electric Engineering Institute, Hefei 230037, China)

(Received 15 October 2014; revised manuscript received 24 November 2014)

Abstract

High impedance surface, due to its unique property of in-phase reflection at some frequency, could be used in designing multiband Salisbury screen by replacing the metallic ground plane in a traditional structure, which is proposed, in this paper, to enhance the microwave absorbing performance of the conventional Salisbury screen. First, electromagnetic wave field intensity of different frequency in space after being reflected by a high impedance surface is analyzed, which implies that new absorption bands can be introduced at about the frequencies of in-phase reflection by sharing Salisbury screen's resistive sheet, without adding extra lossy materials such as lumped elements or others. Then, by taking a single band high impedance surface at 6.25 GHz and a dual-band high impedance surface at 6.27 and 8.17 GHz, which are both composed of patches array with varying periodic size and a thickness of 0.6 mm, the multiband Salisbury screens can be constructed utilizing a conventional one with an absorbing peak at about 10.5 GHz. The reflectivity of these multiband absorbers are simulated by employing the commercial CST microwave studio and later measured using a reflectivity measurement system comprising two polarized horns and a vector network analyzer. Experimental results agree well with the simulations, and all results verify that the method presented at the beginning is effective. Results also show that new additional absorptions appear at the frequencies where microwaves are nearly reflected in phase from the high impedance surface, with the same number of the in-phase reflection bands. Meanwhile, the original microwave absorbing capability of the traditional Salisbury screen is reserved mostly. Compared to the single band high impedance surface, the dual-band high impedance surface performs better in the design as the absorbing bandwidth is wider and the absorbing frequency is lower. With an additional thickness of the high impedance surface (no more than 1 mm), the total absorption bandwidth of the multiband Salisbury screen with a reflection below -10 dB increases from 8.5 to 10.1 GHz, and the lowest frequency with 10 dB absorption falls from 7.5 to 5.98 GHz. So it could be concluded that the design of multiband Salisbury screen is helpful to widen the absorption, especially towards the lower frequency direction.

Keywords: high impedance surface, artificial magnetic conductor, Salisbury screen, microwave absorber

PACS: 41.20.Jb, 73.40.Rw, 75.70.cn

DOI: 10.7498/aps.64.114101

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61171170).

† Corresponding author. E-mail: shijmeei@yahoo.com