

采用阶跃阻抗谐振器的小型化双频天线

马润波, 张文梅*

(山西大学 物理电子工程学院, 山西 太原 030006)

摘要:提出一种采用阶跃阻抗谐振器(SIR)设计双频天线的方法. 通过建立天线的传输线模型, 得到了双频天线的工作频率与传输线特性的关系式. 然后, 利用该方法设计了一个 2.4/5.2 GHz 的小型化双频天线, 其结构尺寸由工作频率直接综合得到. 同时用电磁全波仿真, 优化了天线的馈电位置. 所实现的天线尺寸为 29.3 mm×7.7 mm, 相当于 0.5λ×0.125λ. 仿真和测试结果表明, 采用阶跃阻抗谐振器设计双频天线的方法是可行且有效的.

关键词:射频; 阶跃阻抗谐振器; 双频; 天线

中图分类号: TN828.6 **文献标识码:** A

0 引言

随着多标准移动通信终端的飞速发展, 国内外学者对双频段或多频段天线进行了大量的研究工作, 提出了很多实现方法和结构. 针对无线局域网应用中的双频段或多频段天线, 文献[1]提出了采用双 L 形缝隙的实现方法, 而文献[2]和[3]分别设计了小型化的微带馈电共面天线和印刷单极子天线. 一种利用较小地平面上寄生参数的三角形贴片双频天线在文献[4]中提出. 文献[5]则提出两种印刷倒 F 天线, 一种将倒 F 天线的尾部进行螺旋处理, 另一种将馈电结构变为耦合形式. 文献[6]提出了一种工作于多频段的阶跃阻抗贴片天线, 它的结构接近二分之一波长的阶跃阻抗谐振器(SIR), 其中天线贴片尺寸通过优化得到.

本文提出了一种同轴馈电的小型化双频天线, 其结构接近四分之一波长 SIR. SIR 由两种不同特性阻抗的传输线组成^[7], 一般应用于滤波器设计中^[8,9]. SIR 的基本谐振频率和第一杂散频率可以通过改变传输线的电长度和阻抗比来调整, 可以利用这个特点来设计双频天线. 文中首先通过分析天线的传输线模型, 给出了两个工作频率与天线结构中传输线阻抗比和电长度的关系. 然后, 利用本方法设计了一个工作频率为 2.4/5.2 GHz 的双频天线, 其结构尺寸可以根据工作频率直接综合得到, 并在此基础上进行了修正. 接着, 按照设计尺寸对天线进行了电磁全波仿真, 在分析了馈电点位置对天线输入阻抗的影响后确定了合适的馈电点位置. 最后, 对设计天线进行了制作和测量, 验证了所提出设计方法的有效性.

1 设计原理

图 1(a)(P234) 给出 SIR 双频天线的原理结构, 顶层为辐射贴片, 中间为介质层, 底层为天线地. 贴片由三部分组成, I 部分是宽金属贴片, 右端通过金属接地带连接到地层, 其特性阻抗和电长度分别为 Z_1 、 θ_1 , II 和 III 部分对称地分布在 I 部分的两边, 两部分的特性阻抗和电长度均为 Z_2 、 θ_2 . 为减小整个结构的尺寸, 将 II 和 III 部分进行弯曲. 设天线的工作频率为 f_0 和 f_{s1} .

忽略阻抗阶跃非连续性及开路端的边缘电容, 得到天线的传输线模型如图 1(b)所示, 天线左端面导纳 Y_{in} 为,

$$Y_{in} = -j \frac{Z_2 - 2Z_1 \tan\theta_1 \tan\theta_2}{Z_1 Z_2 \tan\theta_1} \quad (1)$$

收稿日期: 2009-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(60771052)

作者简介: 马润波(1974-), 男, 山西长治人, 硕士, 研究领域: 通信、微波和射频电路集成. * 通讯联系人: zhangwm@sxu.edu.cn

当 $Y_{in} = 0$ 时,得谐振条件

$$Z_2 - 2Z_1 \tan\theta_1 \tan\theta_2 = 0 \quad (2)$$

进一步得

$$\tan\theta_1 \tan\theta_2 = Z_2 / (2Z_1) = R_Z \quad (3)$$

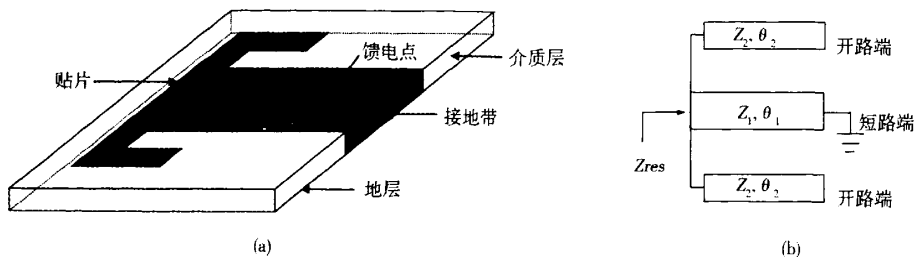


图 1 SIR 双频天线, (a) 原理结构, (b) 传输线模型

Fig. 1 Proposed SIR dual-band Antenna, (a) Structure, (b) transmission line model

可以看到,谐振条件取决于电长度 θ_1 、 θ_2 和阻抗比 R_Z 。须注意这里阻抗比 R_Z 定义为 $Z_2/(2Z_1)$, 和文献 [7] 中的标准四分之一 SIR 的阻抗比定义 (Z_2/Z_1) 有区别。这是因为在本结构中特性阻抗为 Z_2 的传输线有两条, 并联后阻抗为 $Z_2/2$, 从而这里的阻抗比形式上是标准 SIR 阻抗比的一半。另外, 当 $\theta_1 = \theta_2 = \theta_0$ 时, 总电长度 $\theta_1 + \theta_2$ 最小^[7], 由公式 (3) 得

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta_0 = \arctan \sqrt{R_Z} \quad (4)$$

可以看出, 当天线的第一工作频率为 f_0 时, 贴片的 I、II、III 部分电长度可从公式 (4) 得到。另外, 设第二谐振频率为 f_{s1} , 那么 f_0 和 f_{s1} 的关系为^[7]

$$R_Z = \tan^2[f_0\pi/(f_0 + f_{s1})] \quad (5)$$

可见, I、II、III 的阻抗和电长度确定后, 贴片的两谐振频率 f_0 和 f_{s1} 也随着确定了; 经同轴向贴片馈送信号后, 在 f_0 和 f_{s1} 频率上会产生谐振。由于贴片 I 部分左端为宽开路端, 这里能够形成强辐射, 从而实现双频天线功能。反之, 如果给定贴片的 f_0 和 f_{s1} , 可以由公式 (5) 得到阻抗比, 然后利用公式 (4) 就可以确定天线各部分的电长度。

2 2.4/5.2 GHz 双频天线设计实例

下面通过设计一个 2.4/5.2 GHz 双频天线来说明利用 SIR 结构设计双频天线的方法和步骤。设计中采用 FR4 介质板, 介电常数 $\epsilon = 4.4$, 厚度 $h = 1.52$ mm。

首先, 将 $f_0 = 2.4$ GHz 和 $f_{s1} = 5.2$ GHz 代入公式 (5), 得 $R_Z = 2.343$ 。再利用公式 (4), 得到贴片各部分电长度为 $\theta_1 = \theta_2 = 56.8^\circ$ 。

然后, 为提高辐射能力, 将 Z_1 设定为介质板上可实现的较小值, 如 $Z_1 = 15 \Omega$ 。由前面得到的阻抗比 R_Z , 计算得 $Z_2 = 70.3 \Omega$ 。由各部分特征阻抗和电长度, 利用软件 Ansoft Designer SV 综合得到各部分的物理尺寸: I 部分长度为 $l_{s1} = 9.92$ mm, 宽度为 $w_1 = 15.05$ mm, II 和 III 部分长度为 $l_{s2} = 11.05$ mm, 宽度为 $w_2 = 1.53$ mm。

最后, 按照图 2(P235)(a) 的布局布置和连接贴片的部分, 根据图 2(b)、(c) 的电流模式和天线的辐射特点, 对贴片各部分的长度进行修正。I 部分右端经短路带接地, 短路带等效长度为 $0.5h$ 。另外, 考虑贴片左端辐射缝隙宽度约 $h^{[10]}$, 根据图 2(b) 给出 5.2 GHz 时贴片上的电流模式, I 部分顶层贴片长度 l_1 应取为 $l_{s1} - 1.5h = 7.65$ mm。II 和 III 部分的长度主要影响天线的第一个工作频率, 根据图 2(c) 给出的 2.4 GHz 电流模式可知, l_2 和 l_3 应满足,

$$l_1 + l_2 + l_3 + 0.5h = l_{s1} + l_{s2} \quad (6)$$

将 $l_1 = l_{s1} - 1.5h$ 代入公式 (6) 得

$$l_2 + l_3 = l_{s2} + h \quad (7)$$

由此确定 $l_2 + l_3 = 12.6$ mm. 为缩短纵向尺寸, l_2 应该取较小值, 但过小会使长度为 l_3 的部分与 I 部分间产生耦合而影响特性. 折中考虑, 取 $l_2 = 5.5$ mm, $l_3 = 7.1$ mm. 这样得到的天线贴片尺寸为 29.3 mm \times 7.7 mm, 相当于 $0.5\lambda \times 0.125\lambda$, λ 为 2.4 GHz 对应波长.

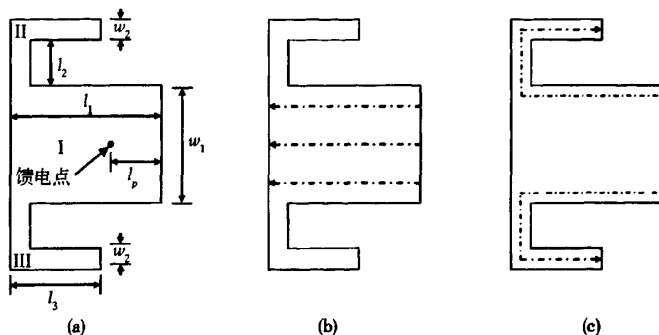


图2 (a) 顶层贴片结构, (b) 5.2 GHz 电流模式, (c) 2.4 GHz 电流模式

Fig. 2 (a) Geometry of the patch on top layer, current patterns for (b) 5.2 GHz and (c) 2.4 GHz

3 仿真和测量结果

天线的谐振频率主要由各部分长度和宽度决定, 同时还会受到馈电点位置的影响, 图3给出天线输入阻抗随 l_p 变化的仿真结果. 可以看到, 天线输入阻抗虚部随 l_p 增加而变化范围增加, 并在 2.4 GHz 和 5.2 GHz 处接近于 0, 说明天线可以在这两个频率处形成谐振. 同时, 在 2.4 GHz 和 5.2 GHz 处, 天线输入阻抗实部随 l_p 增加而增加, 且低频处的最大值小于高频处的最大值. 为使输入阻抗和馈电端口阻抗在 2.4 GHz 和 5.2 GHz 两处的匹配都较好, 取 $l_p = 3.5$ mm.

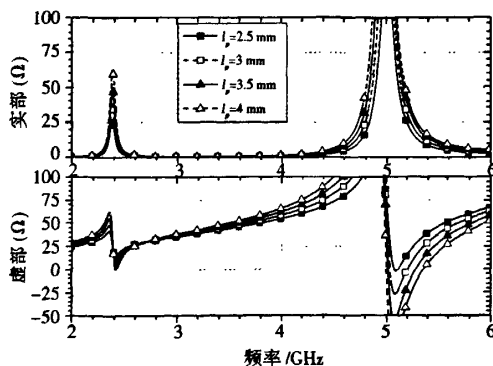


图3 不同 l_p 时天线的输入阻抗

Fig. 3 Input impedance of the SIR antenna for different l_p

所设计的天线在 FR4 基板上实现, 测量结果如图 4、5、6(P236)所示. 图 4 给出了仿真和测量的反射系数, 二者比较吻合. 测量的天线工作频率在 2.33 GHz 和 5.06 GHz, 略低于仿真的 2.4 GHz 和 5.2 GHz, 这是由于实际介质和设计介质的介电常数存在偏差造成的. 天线在两个频率上的反射系数分别为 -14 dB 和 -13 dB, 反射系数 < -10 dB 的带宽分别为 40 MHz 和 160 MHz.

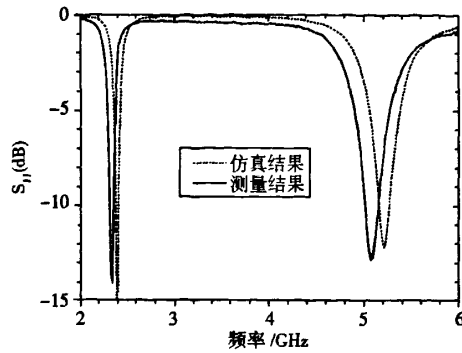


图 4 天线的仿真和测量反射系数

Fig. 4 The simulation and measurement reflection coefficient of the antenna

图 5 给出了测量的天线辐射方向图. 两个频段上, 天线的 E 面和 H 面主极化具有准全向特性. 低频段 E 面主极化比交叉极化大 15 dB, H 面主极化和交叉极化具有接近的峰值. 高频段 E 面主极化比交叉极化大 45 dB, 而 H 面主极化比交叉极化大 20 dB.

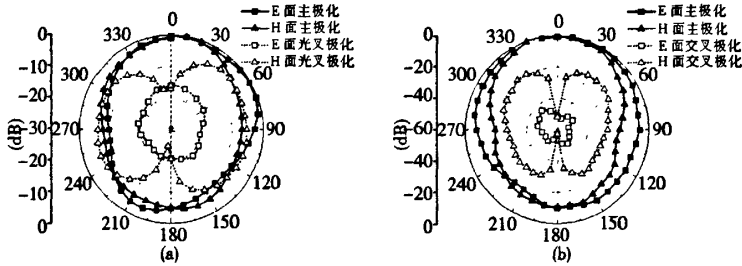


图 5 天线辐射方向图

Fig. 5 Measured radiation patterns for (a) 2.33GHz and (b) 5.06 GHz

图 6 给出了天线增益的测量结果. 低频段最高增益为 -6.2 dBi, 高频段最高增益为 3.3 dBi. 低频增益较低的原因是低频时电场的最强区域在 II、III 两部分的开路端, 贴片左面最宽端的电场不是最强的, 因此降低了辐射能力.

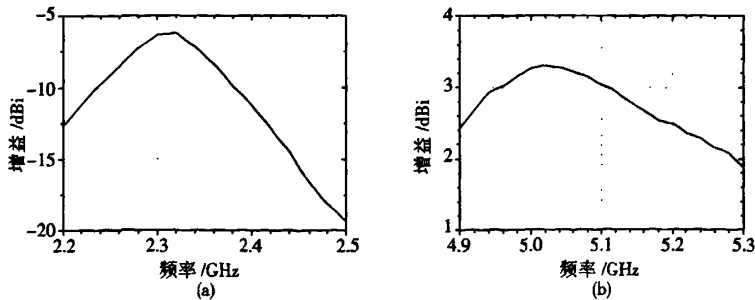


图 6 天线增益: (a) 2.4 GHz 频段, (b) 5.2 GHz 频段

Fig. 6 Measured gain in (a) 2.4 GHz band and (b) 5.2 GHz band

4 结论

本文提出一种采用 SIR 结构设计小型化双频天线的方法, 通过分析给出了双频天线的工作频率与天线传输线模型中传输线阻抗比和电长度的关系式. 利用此关系式, 由工作频率可以直接综合出天线的尺寸. 最后通过设计实例验证了方法的有效性.

参考文献:

- [1] KIM T H, PARK D C. Compact Dual-Band Antenna with Double L-Slits for WLAN Operations [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2005, **4**: 249-252.
- [2] RAJ R K, JOSEPH M, AANANDAN C K, *et al.* A New Compact Microstrip-Fed Dual-Band Coplanar Antenna for WLAN Applications [J]. *IEEE Trans. Antennas and Propag*, 2006, **54**(12): 3755-3762.
- [3] SONG Y, JOAP Y C, ZHAO H, *et al.* Compact Printed Monopole Antenna for Multiband WLAN Applications [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2008, **50**(2): 365-367.
- [4] LIU L, ZHU S, LANGLEY R. Dual-band Triangular Patch Antenna with Modified Ground Plane [J]. *Electronics Lett*, 2007, **43**(3): 140-141.
- [5] WANG Y S, LEE M C, CHUNG S J. Two PIFA-Related Miniaturized Dual-Band Antennas [J]. *IEEE Trans. Antennas and Propag*, 2007, **55**(3): 805-811.
- [6] AVRILLON S, MAHE Y, CHOUSSEAUD A, *et al.* Multi-standard patch antenna based on stepped impedance microstrip [C]. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2004, **3**: 3103-3106.
- [7] SAGAWA M, MAKIMOTO M, YAMASHITA S. Geometrical Structures and Fundamental Characteristics of Microwave Stepped-impedance Resonators [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech*, 1997, **45**(7): 1078-1085.
- [8] LIN S C, DENG P H, LIN Y S, *et al.* Wide-Stopband Microstrip Bandpass Filters Using Dissimilar Quarter-Wavelength Stepped-Impedance Resonators [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech*, 2006, **54**(3): 1011-1018.
- [9] ZHANG Y P, SUN M. Dual-Band Microstrip Bandpass Filter Using Stepped-Impedance Resonators with New Coupling Schemes [J]. *IEEE Trans Microw Theory and Tech*, 2006, **54**(10): 3779-3785.
- [10] BHARTIA P, BAHLL I, GARG R, *et al.* Microstrip Antenna Design Handbook [M]. London: Artech House Publishers, 2000.

Design of Miniaturized Dual-band Antenna Using Stepped Impedance Resonator

MA Run-bo, ZHANG Wen-mei

(School of Physics and Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: A design method of dual-band antenna by using stepped impedance resonator (SIR) is proposed. By establishing the transmission line model of the SIR dual-band antenna, the relation between the two operation frequencies and the characteristics of the transmission lines is obtained. Moreover, a miniaturized 2.4/5.2 GHz antenna is designed by using the method. The geometry of the designed antenna can be synthesized directly from the operation frequencies. The designed antenna size is 29.3 mm × 7.7 mm, about 0.5λ × 0.125λ. Finally, the antenna is simulated and measured, and the results indicate that the design method of dual-band antenna by using SIR is feasible and effective.

Key words: radio frequency; stepped impedance resonator; dual-band; antenna

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训：

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势：

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们：

- ※ 易迪拓培训官网：<http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网：<http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店：<http://shop36920890.taobao.com>