

宽带双频微带平板反射阵天线的研究

窦智童¹ 杨峰¹ 欧阳骏¹ 聂在平¹ 周海京²

(电子科技大学电子工程学院, 成都, 610054)¹ (北京应用物理与计算数学研究所, 北京, 100000)²

摘要: 本文采用单层双圆环结构作为反射阵面的微带贴片单元, 设计了 Ku 波段 81 单元的平板反射阵天线, 带宽达到了 20%。以此阵面为基础, 用频率选择表面替代传统的金属地板, 设计了 Ka/Ku 双频共口面反射阵天线, 仿真结果表明, 其性能和有地板的单口面反射阵天线基本一致, 实现了口径复用。

关键词: 微带平板反射阵天线, 宽带, 双频共口面, 频率选择表面

Research on Broad Band Dual-Frequency Microstrip Reflectarray

Zhitong Dou¹ Feng Yang¹ Jun Ouyang¹ Zaiping Nie¹ Haijing Zhou²

(School of electronic engineering, UESTC, ChengDu, 610054)¹

(Physics and computational mathematics research center, Beijing, 100000)²

Abstract: In this paper, a single-layer double circular ring structure is carried out as the cell element of microstrip reflectarray which is proved to be working at Ku band with a 20% bandwidth. At the same time, a dual band Ka/Ku-band application has been designed based on the Ku-band reflectarray. A single ring FSS structure is utilized as an alternative of metal ground plane. Simulation result shows that the performance of FSS backed reflectarray is almost the same compared with ground plane backed counterpart at central frequency.

Key word: Microstrip reflectarray, Wide band, Dual band Co-aperture, FSS

1 引言

伴随卫星通讯事业的蓬勃发展, 微带平板反射阵天线正以其平板低剖面结构, 易共形, 质量轻, 成本低, 效率高, 可折叠展开等优点^[1]受到广泛关注。微带平板反射阵天线由初级馈源和微带贴片单元构成的阵面组成。通过调节各个贴片单元的结构来实现不同的反射系数相位, 补偿馈源到阵面各个单元的空间相位差, 使得馈源入射波经阵面反射之后, 形成指向某一特定方向的窄波束, 实现高增益。

微带平板反射阵天线由于其本身的结构特点, 空间相位差是频率的函数, 带宽较窄^[2], 传统的微带反射阵天线带宽只有 5% 左右。本文采用单层双圆环结构^[3]作为微带阵元, 经过优化设计, 基本实现了贴片反射系数相位随贴片尺寸的线性变化。紧接着设计了 Ku 波段 81 单元平板反射阵天线, 仿真结果表明, 最高增益达到 23.8 dB, 在 20% 的频带范围内,

增益跌落小于 1.2dB。以此 Ku 波段阵面为基础, 设计了 Ka/Ku 双频共口面反射阵天线。Ka 波段阵面置于 Ku 波段阵面的上方, 物理尺寸相同。使用频率选择表面^[4] (FSS) 代替地板, 在 Ka 工作频段将馈源能量全反射, 起到金属地板的作用, 在 Ku 频段基本全透射。仿真结果表明, 利用 FSS 取代金属地板的反射阵天线在中心频率处的性能并没有明显变坏, FSS 结构在 Ku 波段的插入损耗 0.7dB, 有效地实现了口径复用。

2 相位补偿基本原理介绍

典型的微带平板反射阵天线如下图所示, 由初级馈源进行空间馈电, 反射阵面为尺寸不一的微带贴片阵, 馈源相位中心到阵面各个单元距离并不相

基金项目: 国家自然科学基金(No.10876007)

同，为了实现固定波束指向，满足高增益要求，我们需要调节每个贴片的大小或者其他结构因素，调整其反射系数相位，进行相位补偿。

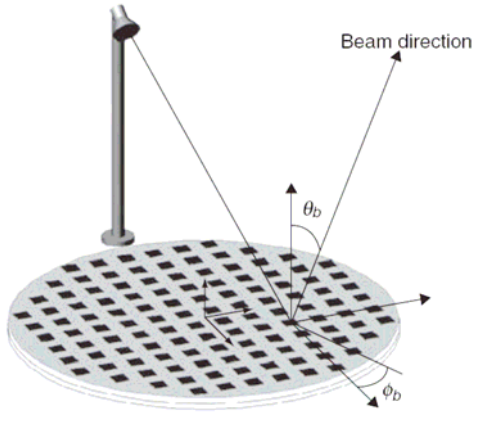


图1 平板反射阵天线示意图

对于需要的波束指向 (θ_b, ϕ_b) ，根据阵列理论，阵列中某个单元的相位关系应满足：

$$\begin{aligned} \phi(x_i, y_i) = & \\ & -k_0 \sin \theta_b \cos \phi_b x_i - k_0 \sin \theta_b \sin \phi_b y_i \end{aligned} \quad (1)$$

其中 (x_i, y_i) 是第 i 个单元的坐标， k_0 是空气中的传播常数。同时，第 i 个单元反射场的相位是由馈源到阵面单元的相位延迟和单元反射系数相位决定的：

$$\phi(x_i, y_i) = -k_0 d_i + \phi_R(x_i, y_i) \quad (2)$$

其中 d_i 是馈源相位中心到贴片单元的距离， $\phi_R(x_i, y_i)$ 是第 i 个单元反射系数相位。这里我们考虑一般情况，最大辐射方向沿阵面法向，则

$$\phi(x_i, y_i) = 0, \quad \phi_R(x_i, y_i) = k_0 d_i \quad (3)$$

3 单元贴片分析和 Ku 波段阵面设计

3.1 微带贴片单元的设计

在分析贴片单元反射系数相位如何随贴片尺寸改变而变化时，用到了一个近似条件，假设微带单元处于无限大阵列环境中，并且周边的贴片大小都一致^[5]。当然这个近似和实际情况不符，但是实践表明误差不大。在仿真过程中采用 CST 建模，设立周期边界条件，模拟平面波入射，中心频率设为 12.5GHz。

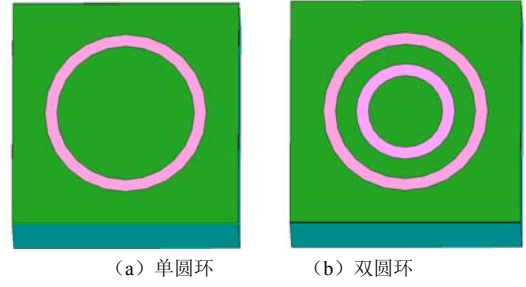


图2 模型结构示意图

图2 为单圆环结构和双圆环结构模型示意图，双圆环结构外圆环外半径设为变量 r_1 ，外圆环宽度 $0.16 \times r_1$ ，内圆环外半径 $0.6 \times r_1$ ，内圆环宽度 $0.16 \times r_1$ 。介质板分两层，上层介质板厚 0.2mm ， $\epsilon_{r1} = 2.2$ ；下层介质板厚 5.5mm ， $\epsilon_{r2} = 1.07$ 。下图是传统的单圆环结构和本文采用的改进型双圆环结构反射系数相位变化曲线。

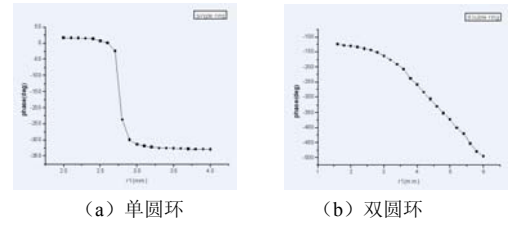


图3 贴片反射系数相位随贴片尺寸变化曲线

如图3(a)所示，普通单圆环结构虽然能够基本满足 360 度的相移量，但是在谐振频点附近，相位变化量随贴片尺寸变化非常剧烈^[6]，在应用中难以控制误差影响，相位调节不够准确。并且由于微带单元的窄带特性，反射阵天线带宽较窄。

如图3(b)所示，改进型双圆环结构完全满足 360 度相移量要求，反射系数相位随贴片尺寸变化基本呈线性关系，在应用中加工误差较小，相位调节准确。双圆环贴片具备多谐振点特性，可以有效地展宽反射阵天线带宽。

3.2 Ku 波段总体阵面设计

3.2.1 馈源位置和相位补偿方法

利用双圆环结构，设计了 81 单元，角锥喇叭正馈，中心频率 12.5GHz 的正方形平板反射阵天线，阵面大小 $L=126\text{mm}$ 。为了保证口径效率和截获效率的最佳组合，可以利用如下近似公式^[7]：

$$L/2F = \tan \theta_F \quad (4)$$

其中 θ_F 为角锥喇叭馈源-10dB 波瓣宽度的一

半, F 为焦距。根据馈源波瓣宽度, 求出 F , 确定馈源相位中心的位置。利用 (3) 式确定各个单元反射系数相位, 对应确定贴片尺寸, 进行精确相位补偿。

3.2.2 结果分析

对于上述 Ku 波段反射阵天线利用 CST 进行整体仿真, 下图为中心频率处 E 面方向图:

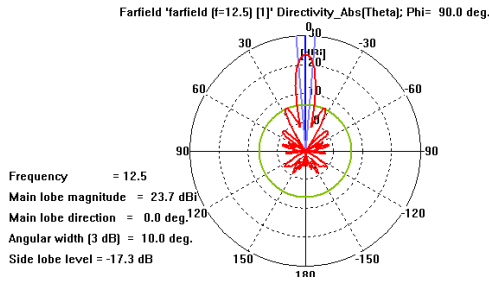


图 4 12.5GHz E 面方向图

中心频率 12.5GHz, 最大增益 23.7dB, 3 dB 波瓣宽度 9.9 度, 第一副瓣-17.3 dB。阵面是正方形, H 面方向图和 E 面类似, 不再累述。

按照阵列理论简化计算方法^[5], 此 81 单元阵列的最大增益估值为 24.4 dB。若以此为参考, 则天线的总体效率大于 80%, 这与实际情况并不吻合, 微带平板反射阵天线总体效率在 50%-60%之间^[5]。仿真并没有考虑加工误差, 各种损耗等因素的影响。天线真实增益估计在 22.5 dB 左右。

如图 5 所示, 仿真结果表明在 11.3GHz 至 13.8GHz 频率范围内 (20%带宽), 最大增益 23.8dB, 最小增益 22.6dB, 增益跌落小于 1.2 dB, 稳定度很高。

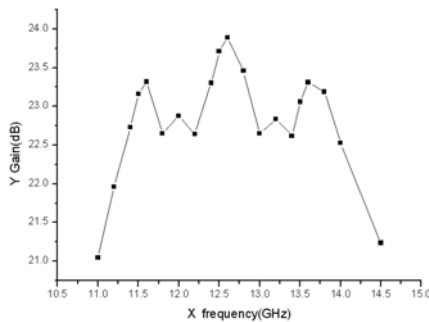


图 5 频带内增益曲线图

4 Ku/Ka 双频共口面反射阵天线设计

利用前面所述 Ku 波段平板反射阵天线的设计方法, 设计了 Ka/Ku 双频共口面平板反射阵天线。

为了减小两层阵面之间的相互干扰, 将 Ka 波段阵面 (中心频率 30GHz) 置于 Ku 波段阵面的上方, 物理尺寸相同, 等间距分布 441 个单元。使用单圆环结构作为频率选择表面 (FSS), 代替 Ka 波段阵面的金属地板。优化设计之后, FSS 在 Ka 工作频段起到金属地板作用, 将能量大部分反射; 在 Ku 波段将能量绝大部分透射到下层反射阵面。结构示意图如下:

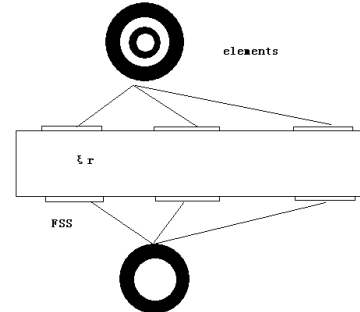


图 6 Ka 波段阵面中 FSS 结构取代金属地板

对 Ka 波段阵面每个阵列单元进行精确相位调整之后, 得出如图 7 所示仿真结果: 最大增益 32 dB, 主瓣宽度 4.8 度, 第一副瓣-24.6 dB。这与使用金属地板的反射阵面 (图略) 相比增益减少了 0.2 dB, 副瓣略有升高。

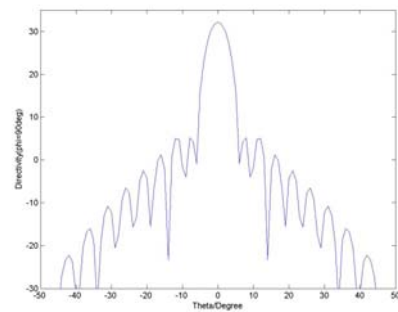


图 7 30GHz E 面方向图

下图为置入上层 Ka 波段阵面后, 反射阵天线在 12.5GHz 处 E 面方向图:

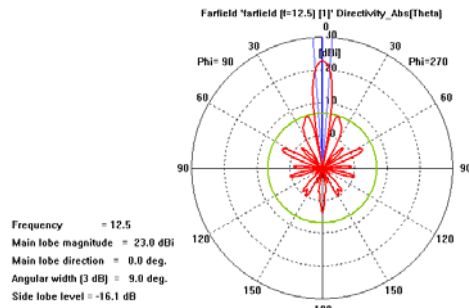


图 8 共口面 12.5GHz E 面方向图

比较图 4 和图 8 可知, Ka 阵面置于 Ku 阵面上方之后, Ku 反射阵面最大增益减少了 0.7 dB, 第一副瓣升高了 1 dB。这主要是因为上层阵面金属贴片单元和 FSS 损耗了一部分能量; 上层阵面的介质改变了空间相位差, 对精确相位补偿产生了影响。

5 结论

本文利用双圆环结构作微带贴片单元, 有效地展宽了反射阵天线的带宽。利用 FSS 结构作 Ka 波段反射阵面的地板, 设计了 Ku/Ka 双频共口面平板反射阵天线, 满足了高增益的要求, 实现了口径复用。

参 考 文 献

- [1] J Huang. Microstrip reflectarray[C].IEEE AP-S. Antennas Propagate 1991,2
- [2] D.M.Pozar, bandwidth of reflectarray, Electron.Lett.Vol39, No.2, 2003, PP.
- [3] Marek E.Bialkowski, Investigations Into Phase Characteristics of a Single-Layer Reflectarray Employing Patch or Ring Elements of Variable Size, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol 56,No.11,November 2008.
- [4] M.R.Chaharmir, FSS-backed Reflectarray with broadband square loop cell elements for dual-band application, 978-1-4244-2042-1-/08/2008 IEEE
- [5] David M. Pozar,Design of Millimeter Wave Microstrip Reflectarrays, IEEE Trans.Vol.45, NO.2, Feb1997.
- [6] JoseA.Encinar, Design of Two-Layer Printed Reflectarrays Using Patches of Variable Size, IEEE Trans. Vol 49, NO.10, October 2001.
- [7] 陈红辉, 三层贴片宽频带正交线极化变换微带反射阵, 电波科学学报, Vol.23, No.2, April, 2008.

作者简介: 窦智童, 男, 硕士, 主要研究微带天线, 反射面天线等。一个贴片的大小或者其它结构因素, 调整其反射系数相位, 进行相位补偿。

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>