

DOI:10.3969/j.issn.1671-0673.2014.04.008

# 基于交替投影法的多波束反射阵天线设计

吴君默, 雷雪, 赵明洋

(信息工程大学, 河南 郑州 450001)

**摘要:**针对传统方法设计的多波束反射阵天线增益低、存在波束偏移等问题,通过将阵列综合理论中的交替投影法引入到多波束反射阵天线设计中,对相位分布进行精确求解,以提高天线性能。为验证其有效性,设计并制作了一副 Ku 频段、电尺寸为  $7.5\lambda_0 \times 7.5\lambda_0$  的单馈源四波束反射阵天线。中心频率(12GHz)实测增益为 19.1dB,效率为 45.8%,带宽达到 10.83% (11.2GHz ~ 12.5 GHz),仿真和实测结果较吻合。相比于传统方法设计的多波束反射阵天线增益提高 2dB 以上,副瓣电平降低 4.5dB 以上。结果表明交替投影法求解的相位分布更加准确,能有效提高多波束反射阵天线性能。

**关键词:**多波束;反射阵;交替投影法

中图分类号:TN822

文献标识码:A

文章编号:1671-0673(2014)04-0430-04

## Design of Multi-Beam Reflect-Array Antenna Using Alternating Projection Method

WU Jun-mo, LEI Xue, ZHAO Ming-yang

(Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Problems with conventional design of multi-beam reflect-array antennas are low antenna gain, beam squint, etc. which are addressed in this paper by introducing the alternating projection method in array synthesis theory into the design of multi-beam reflect-array antennas in order to calculate the phase distribution precisely and improve the antenna performance. A Ku-band single-feed quad-beam reflect-array antenna is designed and manufactured with an electric size of  $7.5\lambda_0 \times 7.5\lambda_0$ . Test gain at center frequency is 19.1dB with an efficiency of 45.8%, bandwidth reaches 10.83% (11.2GHz ~ 12.5 GHz). Simulation results and measurement results match well. Compared to conventional designing methods, the antenna gain improves more than 2dB, and SLL decreases more than 4.5dB. The results show that alternating projection method can not only calculate the phase distribution more precisely and but also improve multi-beam reflect-array antenna performance greatly.

**Key words:** multi-beam; reflectarray; alternating projection method

## 0 引言

多波束天线具有巨大的应用空间,如卫星通信、电子对抗、多目标雷达系统等。传统的多波束天线有

收稿日期:2013-12-30;修回日期:2014-01-22

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2011ZX03003-003-02)

作者简介:吴君默(1990-),男,硕士生,主要研究方向为微带反射阵天线,E-mail:wjmandyl@qq.com。

透镜式、反射面式和相控阵式3种基本形式<sup>[1]</sup>。上述多波束天线有诸多优点,例如可对波束数目和形状进行灵活控制,并可控制波束作快速扫描;不足之处是结构复杂,造价高。

微带反射阵天线结合了抛物面天线和微带阵列天线的优点,自诞生以来便成为天线领域的研究热点<sup>[2]</sup>。微带反射阵天线与抛物面天线相比,具有重量轻、体积小、成本低、易制造、易组装、易集成等优点;与微带阵列天线相比,照射馈源结构克服了传统馈电网络传输损耗大的难题。因此,多波束反射阵天线应运而生。由于拥有微带反射阵天线诸多优点,同时能实现多波束天线的诸多功能,多波束反射阵天线具有广阔的应用前景<sup>[3]</sup>。

本文首先介绍交替投影法的基本原理,其次介绍交替投影法设计多波束反射阵天线基本方法,最后运用上述方法,设计制作了一副中心频率为12GHz的单馈源四波束反射阵天线。为验证其有效性,将其与传统多波束反射阵天线设计方法(几何分区法<sup>[4]</sup>和口径场叠加法<sup>[5]</sup>)进行对比。仿真和实测结果表明,交替投影法可以有效的提高反射阵天线增益,降低副瓣电平。

## 1 交替投影法基本原理

对于多波束反射阵天线,可以将其看做一般性阵列综合问题<sup>[6]</sup>,区别在于每个阵元的激励幅度是由馈源和阵元位置决定的定值,而阵元激励相位可通过单元相位补偿进行独立调节。因此,可以采用阵列综合理论中的交替投影法来设计多波束反射阵天线。交替投影法的基本原理是通过投影迭代寻找两个集合的交集,如图1所示。

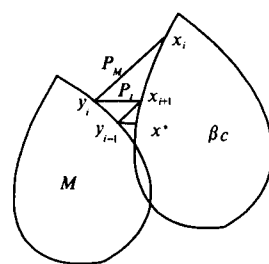


图1 交替投影法原理图

将反射阵天线所有可能的辐射方向图看成是一个集合 $\beta_c$ ,将满足条件限制的理想辐射方向图看成是另一个集合 $M$ :

$$\beta_c \equiv \{F: F = \sum_{(m,n) \in I} a_{mn} e^{jk(P_{mn}^x \sin\theta \cos\varphi + P_{mn}^y \sin\theta \sin\varphi)}\} \equiv \{F: F(u, v) = \sum_{(m,n) \in I} a_{mn} e^{jk(P_{mn}^x u + P_{mn}^y v)}\} \quad (1)$$

$$M \equiv \{F: M_L(u, v) \leq |F(u, v)| \leq M_U(u, v)\} \quad (2)$$

其中, $I$ 是数对 $(m, n)$ 表示的阵元位置的集合, $a_{mn}$ 是阵元的激励幅度, $k$ 为传播常数, $P_{mn}^x$ 为阵元 $x$ 方向坐标, $P_{mn}^y$ 为阵元 $y$ 方向坐标。 $u = \sin\theta \cos\varphi$ ,  $v = \sin\theta \sin\varphi$ ,  $(u, v)$ 为角度坐标, $F(u, v)$ 为反射阵辐射方向图。 $M_U, M_L$ 分别为所需理想辐射方向图的上、下界函数。

由上述分析可知,交替投影法设计多波束反射阵天线的关键在于寻找一个辐射方向图,属于两个集合的交集 $M \cap \beta_c$ 。

运用交替投影法,定义两个投影算子 $P_M, P_{\beta_c}$ <sup>[6]</sup>, $P_M$ 在迭代过程中利用理想辐射方向图的上、下界不断修正反射阵天线的方向图, $P_{\beta_c}$ 由一系列特征函数组成,将辐射方向图投影为阵元的激励幅度和相位。值得注意的是阵元的激励幅度是定值,每次迭代仅修正阵元的补偿相位。

反射阵因子 $F(u, v)$ 和阵元激励矩阵之间满足二维傅里叶变换对关系<sup>[7]</sup>:

$$F(u, v)_{n+1} = \text{IDFT2}\{P_{\beta_c}\{\text{DFT2}[P_M F(u, v)_n]\}\} \quad (3)$$

## 2 交替投影法设计多波束反射阵天线

运用交替投影法设计多波束反射阵天线的首要步骤是定义理想辐射方向图集合。多波束反射阵天线所需要的方向图一般是不同方向上的笔形波束。因此, $M_U, M_L$ 可表示为

$$\begin{cases} M_U = 1, (u, v) \in \text{主波束} \\ M_L = 0.707, (u, v) \in \text{3dB 波瓣宽度} \end{cases} \quad (4)$$

交替投影法优化的主要目标是降低旁瓣,因此可以将上下界函数在旁瓣区域都赋值为零。在迭代过程中,需要定义一个代价函数来控制迭代次数以使迭代收敛。由于主波束区域满足(4)式, $F(u, v)$ 在上下界之间,因此代价函数仅需考虑旁瓣区域。若 $(u, v) \notin \text{主波束}$ ,且 $|F(u, v)| > M_U(u, v)$ ,则

$$F_{\text{cost}} = \sum_{u^2 + v^2 \leq 1} \sum (|F(u, v)| - M_U(u, v))^2 \quad (5)$$

在理想辐射方向图集合以及代价函数确定后,通过交替投影法的迭代,可以解出反射阵的相位分布。由以上分析可知,当代价函数趋于一个稳定值时,迭代收敛,由此找到了满足限制条件的解。交替投影法实现多波束反射阵天线流程图如图 2 所示。通常情况下,迭代收敛,但有些时候迭代过程收敛于局部最优解,因此必须选择一个合适的初值,以使迭代收敛于全局最优解并且减少迭代次数。初值的选择应尽量接近未知的最优解。文献[6]给出了一个比较合理的初值,即使用口径场叠加法所求得的阵元相位分布作为初值进行迭代。

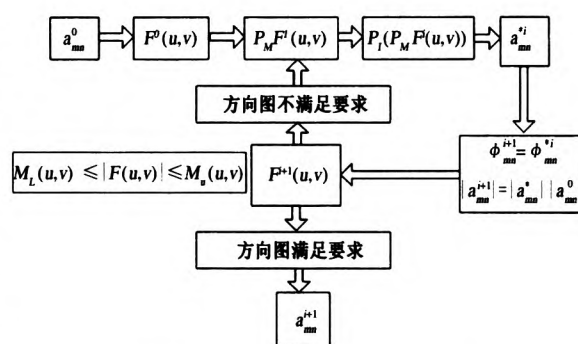


图 2 交替投影法实现多波束反射阵天线流程图

### 3 Ku 频段单馈源四波束反射阵天线设计

为验证本文方法的有效性,设计并制作了一副单馈源四波束反射阵天线。天线中心频率为 12GHz。馈源采用现有的右旋圆极化波纹喇叭, -10dB 波瓣宽度为 80°, 反射阵天线焦径比为 0.6。阵元采用文献[8]所使用的阵元,并对其进行适当的修改,如图 3 所示。阵元周期为  $p$ ,  $p$  取 12.5mm ( $0.5\lambda_0$ ), 阵元参数: 外环半径  $rw_2 = 3.68\text{mm}$ , 内环半径  $rw_{21} = 2.4\text{mm}$ , 外环宽度  $w_2 = 0.52\text{mm}$ , 内环宽度  $w_{21} = 0.9\text{mm}$ ,  $\theta_2 = 10^\circ$ ,  $\theta_{21} = 23.5^\circ$ ,  $g = 1.6\text{mm}$ 。金属贴片印制在介质板上,介质采用 Rogers RT5880,介电常数  $\epsilon_r = 2.2$ ,介质板厚度  $h = 2\text{mm}$ ,介质下方为金属地板。

反射阵天线尺寸为  $15 \times 15$  (225 个阵元),电尺寸为  $7.5\lambda_0 \times 7.5\lambda_0$ ,分别在  $(30^\circ, 0^\circ)$   $(30^\circ, 90^\circ)$   $(30^\circ, 180^\circ)$   $(30^\circ, 270^\circ)$  4 个方向上形成笔形波束。天线实物及其仿真图如图 4 所示。

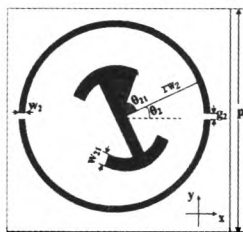


图 3 单元结构图

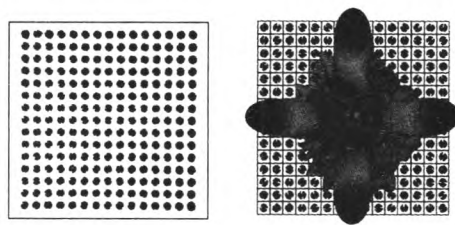


图 4 反射阵天线及其 CST 仿真图

天线实测增益和轴比曲线如图 5 所示。天线在中心频率 (12GHz) 实测增益为 19.1dB,效率为 45.8%,1dB 增益带宽为 10.83% (11.2GHz ~ 12.5GHz), 3dB 轴比带宽为 13.33% (11.0GHz ~ 12.6GHz)。对圆极化反射阵天线而言,天线带宽由 1dB 增益带宽和 3dB 轴比带宽共同定义,所以天线带宽为 10.83% (11.2GHz ~ 12.5GHz)。

天线仿真和实测方向图如图 6 所示。天线在指定的方向上形成了所需的 4 个笔形波束,实测波束指向准确,与仿真值相比基本没有波束偏移。由于制作和测试误差的存在,在  $(30^\circ, 0^\circ)$  方向上天线实测增益略低于仿真值。 $\varphi = 0^\circ$  和  $\varphi = 90^\circ$  两个平面上方向图基本相同。

为更好的将交替投影法和传统设计方法进行对比,分别使用几何分区法、口径场叠加法和交替投影法设计了 3 副单馈源四波束反射阵天线,同时设计了一副相同尺寸的单波束反射阵天线作为参考。图 7 给出了 3 种方法所设计反射阵天线在  $\varphi = 0^\circ$  平面方向图仿真值的对比。表 1 给出了这 4 副天线重要参数的仿真数据对比。

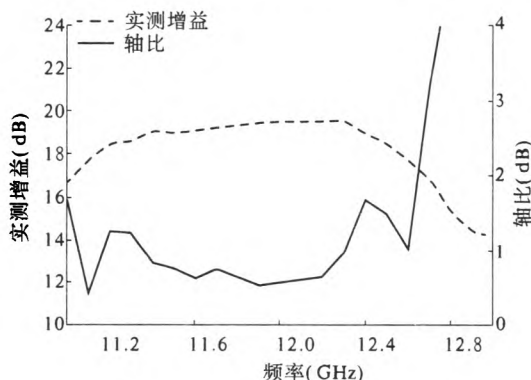


图 5 实测增益和轴比曲线

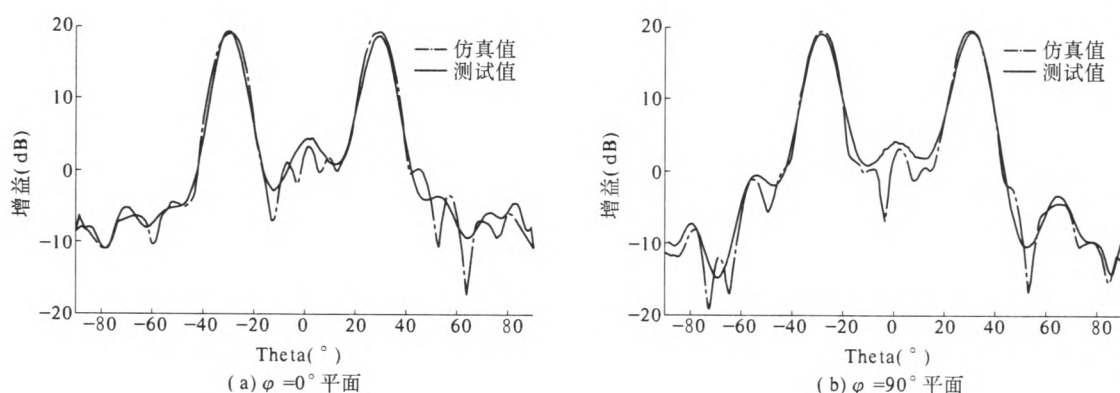


图 6 反射阵天线仿真和实测方向图

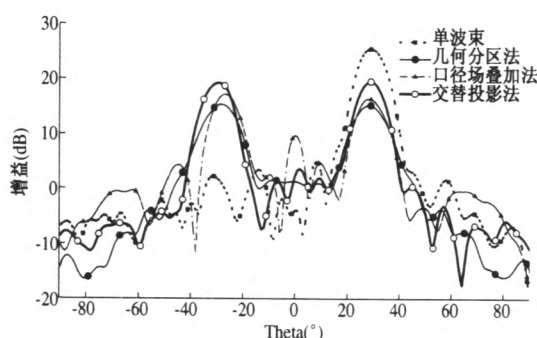


图 7  $\phi = 0^\circ$  平面仿真方向图对比

表 1 反射阵天线重要参数对比

反射阵	设计	波束	SLL	增益
天线	方法	指向	(dB)	(dB)
单波束		30°	-20.6	25.5
	几何分区法	28	-13.7	15.3
四波束	口径场叠加法	27°	-7.5	17.2
	交替投影法	30°	-18.5	19.5

由图 7 和表 1 可知,几何分区法和口径场叠加法两者波束指向都有小量偏移。对几何分区法而言,由于反射阵被分成  $N$  个子阵,每个子阵接收馈源  $1/N$  的能量以辐射笔形波束,单馈源四波束反射阵天线,理论上增益下降 12dB,但是一个方向上的波束,会叠加其它方向波束在此方向的副瓣,因此,实际增益下降小于 12dB。对口径场叠加法而言,由于补偿相位误差的存在,副瓣电平较高。其增益下降实际值比理想值(6dB)要高 2dB 左右。交替投影法相比于几何分区法,增益提高 4.2dB,副瓣电平下降 4.8dB,相比于口径场叠加法,增益提高 2.3dB,副瓣电平下降 11dB。相对于单波束天线,其增益下降 5.99dB,非常接近由于形成四波束带来的增益下降理想值(6dB)。对某个方向的波束,会叠加其它波束在此方向的副瓣,因此,天线增益下降应略小于 6dB。

## 4 结论

针对传统方法设计的多波束反射阵天线增益低,副瓣电平等高问题,本文将阵列综合理论中的交替投影法引入到多波束反射阵天线设计中,并实际制作了一副 Ku 频段单馈源四波束反射阵天线。天线在中心频率(12GHz)实测增益为 19.1dB,效率为 45.8%,1dB 增益带宽和 3dB 轴比带宽均能覆盖 11.2GHz ~ 12.5 GHz 频带范围,天线带宽达到 10.83% (11.2GHz ~ 12.5 GHz),仿真和实测结果较吻合。通过仿真对比,交替投影法相比于几何分区法设计的反射阵天线增益提高 4.2dB,副瓣电平下降 4.8dB,相比于口径场叠加法设计的反射阵天线,增益提高 2.3dB,副瓣电平下降 11dB。由此可见交替投影法求解的反射阵相位分布更为准确,天线性能得到有效提高。

### 参考文献:

- [1] 谢崇进,王华芝. 卫星多波束天线综述 [J]. 中国空间科学技术,1995,15(5): 37-44.

(下转第 439 页)



## 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](http://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](http://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](http://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>