

# 共形相控阵天线方向图综合\*

陈云,何炳发

(南京电子技术研究所, 南京 210013)

**【摘要】** 交替投影法灵活性强,效率高,且其收敛也非常好,尤其是在大型阵列天线的方向图综合中。文中给出了改进的交替投影法的计算步骤,并将该方法成功地应用于旋转抛物面(GPOR)上的2个共形相控阵天线的方向图综合。研究表明,该方法对共形相控阵天线的方向图综合适用且高效。

**【关键词】** 交替投影法;共形相控阵天线;方向图综合;旋转抛物面

中图分类号:TN820.1+2 文献标识码:A

## Pattern Synthesis to Conformal Phased Antenna

CHEN Yun, HE Bing-fa

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210013, China)

**【Abstract】** In the pattern synthesis to the conformal phased antenna, we found that the method of alternating projections is a good way. It is flexible, efficient and convergence quickly, especially in the pattern synthesis in the large phased array antennas. In the paper, we will make use of the improved alternating projections to carry out two examples on pattern synthesis of the conformal phased antennas on the general paraboloid of revolution (GPOR) and analysis them. Finally, they will make us get that the method of alternating projections is a good approach to the pattern synthesis of the phased antennas.

**【Key words】** alternating projections; conformal phased array antenna; pattern synthesis; general paraboloid of revolution (GPOR)

### 0 引言

随着相控阵天线的发展,共形相控阵天线的优势和需求越来越明显。共形阵的设计与通常的直线阵或平面阵天线有很大的不同,需要探索不同的适用于共形相控阵天线方向图综合的方法。针对这个需要,本文提出了2个目标:(1)寻找一种针对共形相控阵天线方向图综合的有效方法;(2)用此方法优化共形相控阵天线方向图的参数,如波束宽度,旁瓣电平,交叉极化电平等。

本文首先对所研究的目标建模,然后再用交替投影法对旋转抛物面(GPOR)上的2个共形相控阵天线实例方向图综合并分析研究。

### 1 模型的建立

在仿真模型中,飞行器的前端可以表示为一个GPOR模型,而阵元分布在GPOR上。阵元的分布<sup>[1]</sup>原则如下(设阵元间距 $d \leq 0.5\lambda$ ):1)第1个阵元放在GPOR的顶点位置;2)第1个环上的阵元距离顶点的

最短弧线距离为 $d$ ;3)以此类推,在下一个环上安放阵元。每一个环上阵元距离顶点的最短弧线距离为 $d$ 的整数倍,环上第一个阵元的初始位置放置在GPOR的母线上,然后环上的每一个阵元都要绕GPOR的对称轴转动半个阵元间距;4)每一个环上的第一个阵元距顶点的弧长为

$$\frac{L}{f} = \frac{v}{2} \sqrt{1 + \frac{v^2}{4}} + \ln\left(\frac{v}{2} + \sqrt{1 + \frac{v^2}{4}}\right) \quad (1)$$

式中: $f$ 为抛物线的焦距; $v = r/f$ 为归一化半径; $r$ 为抛物线上的点距抛物线对称轴的距离。

按照以上步骤,建立的GPOR阵列模型如图1~图2所示。其中GPOR的底面半径为 $R$ ,高为 $H$ 。阵元是中心频率为3.6 GHz的微带圆贴片天线。图中 $R = 200 \text{ mm}$ , $H = 50 \text{ mm}$ ,共37个阵元。

### 2 改进的交替投影法

交替投影法是一种数值迭代方法,具有很大的灵活性,且对赋形波束和笔形波束都能适用。它通过寻

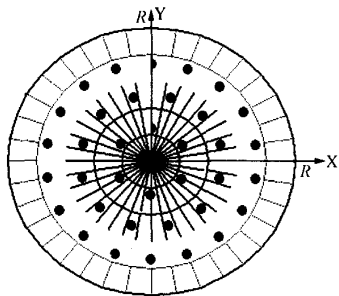


图 1 旋转抛物面共形相控阵天线俯视图

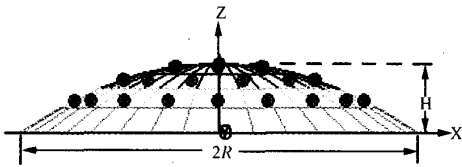


图 2 旋转抛物面共形相控阵天线侧视图

找目标方向图空间  $F_d$  和天线方向图可实现空间  $F_r$  的交集来完成天线方向图的综合<sup>[2]</sup>。

用  $f_n(\theta, \Psi)$  表示阵列中第  $n$  个阵元的方向图,那么可实现的方向图  $F_r$ <sup>[3]</sup> 可以表示成

$$F_r(\theta, \Psi) = \sum_{n=1}^N a_n f_n(\theta, \Psi) \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} (\sin\theta \cos\Psi x_n + \sin\theta \sin\Psi \cdot y_n + \cos\theta \cdot z_n) \right\} \quad (2)$$

式中:  $a_n$  为第  $n$  个阵元的复激励系数;  $\lambda$  为波长;  $(\theta, \Psi)$  为已知的球坐标。将  $(\theta, \Psi)$  简化为  $\varphi$ , 则目标方向图可以表示成方向图上限  $Mu(\varphi)$  和下限  $ML(\varphi)$  之间的函数集合。将  $\varphi$  离散化, 有  $\varphi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_M] (M \gg N)$ , 那么迭代步骤<sup>[4]</sup> 如下

1) 正投影由  $F_r(\varphi)$  获得  $F_d(\varphi)$ , 令

$$Fu(\varphi_m) = Mu(\varphi_m) \cdot F_r(\varphi_m) / |F_r(\varphi_m)| \quad (3)$$

$$Fl(\varphi_m) = ML(\varphi_m) \cdot F_r(\varphi_m) / |F_r(\varphi_m)| \quad (4)$$

由式(3)和式(4)得到

$$k = |F_r(\varphi_m) - Fu(\varphi_m)| / |F_r(\varphi_m) - Fl(\varphi_m)| \quad (5)$$

那么有改进的正投影方法为

$$F_d(\varphi_m) = \begin{cases} F_r(\varphi_m) & ML(\varphi_m) \leq F_r(\varphi_m) \leq Mu(\varphi_m) \\ \frac{Fu(\varphi_m) - Fl(\varphi_m)}{k+1} + Fl(\varphi_m) & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

2) 反投影由  $F_d(\varphi)$  通过解下面的超定方程组来  
万方数据

获得  $F_r(\varphi)$ 。

$$F_r(\varphi_m) = \sum_{n=1}^N a_n g_n(\varphi_m) = F_d(\varphi_m) \quad (7)$$

其中

$$g_n(\varphi_m) = f_n(\theta_m, \Psi_m) \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} (\sin\theta_m \cos\Psi_m x_n + \sin\theta_m \sin\Psi_m \cdot y_n + \cos\theta_m \cdot z_m) \right\} \quad (m = 1, 2, \dots, M)$$

这可以使用最优化算法<sup>[5]</sup> 来解此方程组, 以获得最优结果。

3) 循环 1) 和 2), 直至获得满足要求的解或最优解为止。

详细的改进交替投影法请参考文献[6]。

3 阵元沿 X 轴分布

如图 3 所示, 阵元为圆贴片微带天线, 中心频率为 3.6 GHz, 7 个阵元在 GPOR 上沿 X 轴分布。阵元在阵列中的电压驻波比和归一化电场方向图(记及互耦)如表 1 和图 4 所示。

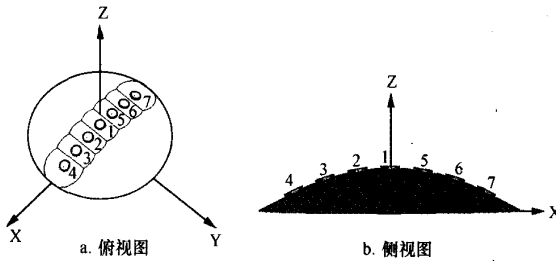


图 3 GPOR 上的圆贴片阵列 (HFSS 中建模)

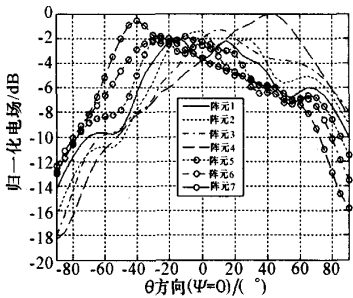


图 4 阵元归一化电场方向图

设定交替投影法综合的目标方向图满足: 在  $\Psi = 0^\circ$  时,  $\theta$  方向上的波束宽度为  $40^\circ$ , 主副瓣比大于 10 dB 的水平极化平顶波束。

运用交替投影法, 经过约 50 次迭代后, 所得到的阵元激励的幅度和相位如图 5 所示。

表 1 阵元的电压驻波比(3.6 GHz)

端口号	VSWR
1	1.201 063
2	1.126 864
3	1.232 712
4	1.131 805
5	1.290 995
6	1.249 980
7	1.208 313

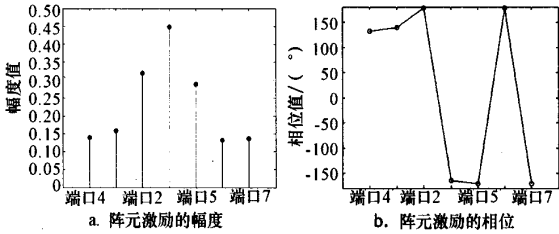


图 5 阵元的复激励

如图 6(HFSS 中仿真所得)所示,经过用交替投影法综合后所得到的方向图,电场半功率波束宽度约为  $44^{\circ}$ ,主极化方向的半功率波束宽度约为  $42^{\circ}$ ;旁瓣电平都小于  $-10\text{ dB}$ 。交叉极化电平小于  $-25\text{ dB}$ 。

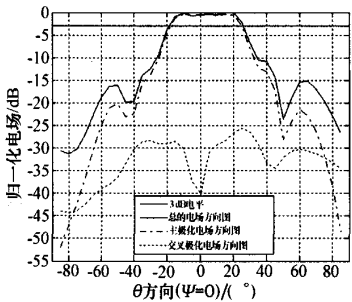


图 6 GPOR 上阵元 X 方向排列的归一化电场方向图

4 阵元在 GPOR 上均匀分布

按照前述的方法,在 GPOR 上排布阵元。要求所综合的方向图在 O-XYZ 上的线极化笔形波束。在不记及互耦的情况下,图 7 是每一个环上阵元的归一化电场方向图。经过约 70 次迭代得到的归一化电场方向图如图 8 所示。

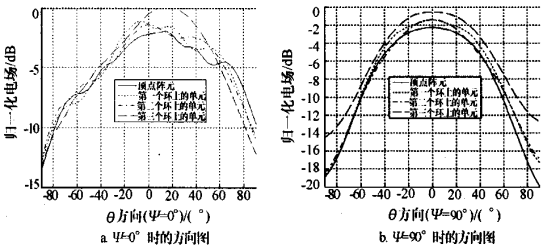


图 7 每一个环上的阵元归一化方向图

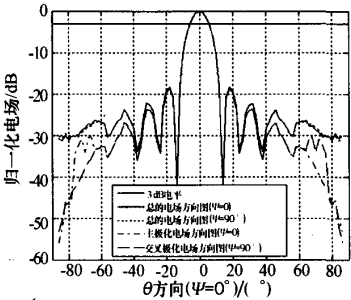


图 8 GPOR 上的归一化电场方向图

5 结束语

本文把改进的交替投影法运用于 GPOR 共形相控阵天线的方向图综合。分析表明,对于共形相控阵天线的方向图综合,交替投影法是一种比较好的方法。根据所要求的目标方向图,可以利用不同方向图的上下来获得,这体现了交替投影法的灵活性;其次,根据阵列的大小或阵元的多少,交替投影法所迭代计算的次数不同。但一般而言,只要方向图的门限设置合理,则迭代的次数比较少。本文 2 个实例分别迭代了约 50 和 70 次,并且每次迭代计算的时间很短,这正好体现了它的收敛性好,且效率高。

参 考 文 献

[1] Lars J, Patrik P. Conformal array antenna theory and design [M]. New Jersey: IEEE Press, 2006.

[2] Boyd S, Dattotro J. Alternating projections [J]. Stanford: Stanford University, 2003.

[3] 束威荣,何炳发,高铁. 相控阵雷达天线[M]. 北京:国防工业出版社,2007.

[4] Bucci Q M, Franceschetti G. Intersection approach to array pattern synthesis [C]// IEE Proceedings Napoli: [ s. n. ], 1990.

[5] 粟塔山. 最优化计算原理与算法程序设计[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2001.

[6] 陈云,何炳发. 相控阵方向图的交替投影法[C]. 北京:第十届全国雷达学术年会,2008.

陈云男,1983 年生,硕士研究生。研究方向为相控阵方向图综合研究。

何炳发男,1963 年生,研究员。1983 年毕业于西安电子科技大学。中国电子学会高级会员,IEEE 会员。长期从事天线与微波技术理论和工程的研究。发表论文近 30 篇。曾荣获国防科技一等奖和二等奖各一项,中国电子科技集团公司一等奖一项。

## 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>