

# Ka 波段共形低副瓣微带天线阵的研究

傅佳辉 吴群

哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001

fjh@hit.edu.cn

**摘 要** 本文利用幅度加权中的 Dolph-Chebyshev 分布方法, 设计并仿真了一种可用于空间二维扫描的  $8 \times 8$  共形低副瓣阵列。文中首先设计了作为阵元的辐射单元, 通过馈电网络的设计, 搭建了  $8 \times 8$  平面阵列, 然后将设计好的平面共形天线阵列共形于半径为 100mm 的圆柱面上, 阵元间距为  $0.6\lambda$ , 阵列的整体加权保持平面阵列的馈电分布。天线阵谐振于 35GHz, 其反射系数为 -23dB, 带宽达 5.1%; 天线的增益为 25.3dB, H 面副瓣电平为 -17.6dB, E 面副瓣电平为 -26.9dB, 达到了低副瓣的设计要求。

**关键词** 共形, 低副瓣, 天线阵

## Research on Conformal antenna array with Low Side-lobe in Ka Band

Jiahui Fu, Qun Wu

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001

**Abstract:** In this paper, a Plane array which can achieve 2-D scanning is designed through Dolph-Chebyshev weighted. First, we design a microstrip antenna as array element and design the feed network. Then we construct the  $8 \times 8$  plane array and conform to 100mm cylindrical surface. The space of array element is  $0.6\lambda$ . The antenna gain of antenna is 25.3dB at working band 35GHz. The reflectance is -23dB with 5.1% bandwidth. The side-lobe level of E plane is -17.6dB and H plane is -26.9dB, which achieved the design target.

**Keywords:** Conformal, Low side-lobe, Antenna array

### 1 引言

低副瓣是天线的重要指标之一, 在雷达侦察跟踪中越来越受到人们的重视。在一些特定的功能环境下, 较低的副瓣已经超越增益带宽等指标, 成为了天线设计首先要考虑的重要参数<sup>[1]</sup>。在雷达技术中, 为了提高抗干扰和反地面杂波的性能, 避免反辐射导弹的袭击, 要求副瓣尽量低。远距离噪声干扰和反辐射导弹都是利用对方天线副瓣发挥作用的。在高脉冲重复频率的下视雷达中, 为了有效地抗地面杂波干扰, 最大副瓣要求达到 -50dB 左右。在通讯方面, 为了提高卫星轨道的利用率, 要求通讯卫星分布增密; 既满足这些要求而又不增加相互之间的干扰, 势必要对天线副瓣电平和位置提出更严的要求<sup>[2]</sup>。正因为这些原因, 各个国家都投入了大量的工作来实现天线低副瓣和超低副瓣。

低副瓣天线阵列的实现形式多样, 利用微带天线阵列, 综合了微带天线的优势, 结合相控阵理论, 共形技术, 可灵活使用于导弹末制导领域, 在实现导弹的侦查、跟踪、自适应、智能化、集成化中获得了广阔的生存空间。因此研究微带的低副瓣相控阵天线阵列是极有意义和必要的<sup>[3,4]</sup>。

### 2 微带辐射单元的设计与仿真

作为整个阵列设计的基础, 本文首先设计了一种中心嵌入式馈电贴片天线。天线结构如图 1 所示, 其尺寸见表 1。利用全波电磁仿真得出了天线的基本参数仿真结果, 如图 2 所示, 天线谐振在 35GHz,  $S_{11}$  达 -40dB 以下; 天线增益为 7.47dB, E 面和 H 面 -3dB 波束宽度分别为  $79^\circ$  和  $88^\circ$ 。H 面和 E 面的方向图基本上一致, 但也存在一些小差别, 这会引引起阵列方向图不对称。

**作者简介:** 傅佳辉, 男, 副教授, 博士生导师, 主要研究领域为天线技术, 电磁学计算方法及实现, RF MEMS 器件建模; 吴群, 男, 教授, 博士生导师, 微波毫米波理论与技术, 天线与射频网络技术, 人工复合材料。

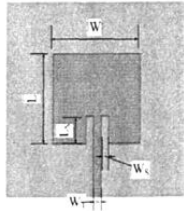


图 1 中心嵌入式馈电贴片天线

表 1 贴片单元结构参数

W(mm)	L(mm)	LS(mm)	WS(mm)	WT(mm)
2.85	2.73	0.84	0.25	0.25

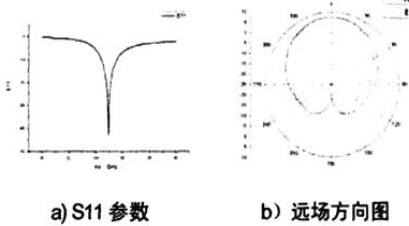


图 2 贴片单元仿真结果

### 3 天线低副瓣的实现方法

天线阵列的低副瓣实现方法可以分为三类，1) 相位加权方法：假设阵列中某些单元的相位为  $\varphi_1$ ，其他单元的相位为  $\varphi_2$ 。

通过数学算法进行迭代，最终确定应该出现  $\varphi_1$  及  $\varphi_2$  相位加权阵列因子的位置，满足既定的天线方向图。2) 密度加权方法：对天线阵列中的阵元位置进行加权。在阵列相位和幅度都固定的情况下，利用数学手段，诸如矩阵法，微扰法，枚举法，优选法等对阵元的排列进行研究，最终筛选出副瓣电平最低的排列形式。3) 幅度加权方法，这种方法是最为常用的低副瓣实现方法，通过对阵列天线阵因子进行数学变换，可以有效的得出一定方向图下的阵列幅度分布方法，最终实现低副瓣的效果。

本文所使用的是幅度加权方法中的 Dolph-Chebyshev 加权方法。这种方法又被称之为最优分布方法，因为它综合考虑的波束宽度和副瓣电平两个因素。在相同副瓣电平时，此方法实现的天线方向图最窄；当天

线的波束宽度相同是，所实现的副瓣电平最低<sup>[9]</sup>。因此，在工程实践中经常使用这种加权方法，取得了较好的效果。利用切比雪夫线阵公式得  $1 \times 8$  线阵的加权分布，见表 2。

表 2  $8 \times 1$  Dolph-Chebyshev 线阵加权分布

a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8
1	1.7	2.6	3.1	3.1	2.6	1.7	1

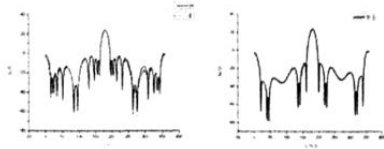
比较平面阵列与线阵的阵因子表达式，可以看出平面阵因子可以表达为两个正交方向的线阵因子的乘积，这就是平面阵列的一种分析方法—可分离口径分布的方法<sup>[9]</sup>。对于  $N \times N$  个单元矩形口径阵列，要求两个可分离方向的副瓣电平分别为  $-S_1\text{dB}$  和  $-S_2\text{dB}$ ，则可以设计一个矩形阵列，在两个方向的激励加权分别按  $-S_1\text{dB}$  和  $-S_2\text{dB}$  设计，然后将两个可分离方向的激励加权相乘，这就得到了阵列口径上所有单元的馈电分布。利用这种设计方法，可以在相应的平面上达到  $-S_1\text{dB}$  和  $-S_2\text{dB}$  的副瓣电平，而其他方向平面上，其副瓣水平要低于这两个方向上的副瓣电平。因此得出了平面阵列的电流加权方法，见表 3。

表 3  $8 \times 8$  Dolph-Chebyshev 平面阵加权分布

	a11	a21	a31	a41	a51	a61	a71	a81
a1	1	1.7	2.6	3.1	3.1	2.6	1.7	1
a2	1.7	1.87	4.42	5.27	5.27	4.42	1.87	1.7
a3	2.6	4.42	6.76	8.06	8.06	6.76	4.42	2.6
a4	3.1	5.27	8.06	9.61	9.61	8.06	5.27	3.1
a5	3.1	5.27	8.06	9.61	9.61	8.06	5.27	3.1
a6	2.6	4.42	6.76	8.06	8.06	6.76	4.42	2.6
a7	1.7	1.87	4.42	5.27	5.27	4.42	1.87	1.7
a8	1	1.7	2.6	3.1	3.1	2.6	1.7	1

利用这个加权分布，通过 CST 中的方向图综合功能对已经设计好的阵列单元进行综合，仿真得出了在没有天线单元间互偶和馈电网络影响的条件下，平面阵列的远场方向图。图 3a) 图显示了 E 和 H 面的方向图，H 面和 E 面副瓣电平分别为  $-25.8\text{dB}$  和

-26dB, b) 图为  $\varphi = 45^\circ$  的方向图, 副瓣电平达到了-29dB。E 面和 H 面副瓣电平不对称, 主要原因是阵列所使用的天线单元的 E 面和 H 面方向图存在差异。



a) E 面和 H 面      b)  $\varphi = 45^\circ$  方向  
图 3 不考虑互偶和馈电网络影响的  $8 \times 8$  低副瓣远场方向图

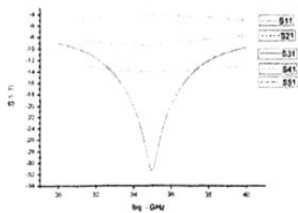
#### 4 低副瓣平面阵列及其馈电网络设计

由  $1 \times 8$  线阵的加权方法, 我们可以看到其加权是对称的, 利用 CST 仿真软件设计仿真幅度比为 1: 1.7: 2.6: 3.1 的四支路功率分配器。此功率分配器是对称结构的, 便于平面阵列的使用, 见图 4。

从其仿真结果可以看出,  $S_{11}$  谐振在 35GHz, 达到-30dB 以下。 $S_{21}$  比  $S_{31}$ 、 $S_{41}$ 、 $S_{51}$  小 4.7dB, 8.4dB, 9.8dB, 满足设计要求。



a) 功率分配器结构图

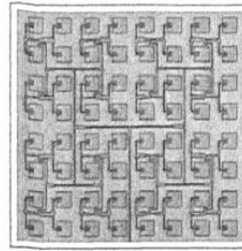


b) 仿真 S 参数

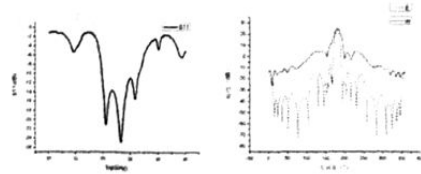
图 4 幅度比为 1: 1.7: 2.6: 3.1 四支路功率分配器

在设计过程中发现要达到 1: 1.7: 2.6: 3.1 的幅度比会出现非常细的馈线, 这在工程是不能加工的。通过改变基板介电常数和基本厚度都未能达到较好的效果。所以为了满足工程可行性, 只能牺牲部分低副瓣特

性。仿真和优化了一个低副瓣天线阵列。



a)  $8 \times 8$  平面阵列结构图



b)  $S_{11}$  参数      c) 远场方向图

图 5  $8 \times 8$  低副瓣平面阵列

如图 5 所示, 35GHz 时  $S_{11}$  参数为 -18.2dB, -10dB 带宽达 6.8%。天线的远场参数: 天线的增益为 24.9dB, H 面副瓣电平为-20.0dB, -3dB 波束宽度为 13.8°; E 面副瓣电平为-30.8dB, -3dB 波束宽度为 8.0°。与设计的等幅平面阵列相比, 天线的低副瓣指标有了较为明显的降低, H 面的副瓣电平降低了 8dB, E 面的副瓣电平降低了 20.7dB。E 面 H 面副瓣降低水平不同是因为: 1) 阵列单元方向图在 E 面 H 面不对称; 2) 馈电网络的辐射在 E 面 H 面不一致; 3) 不等功分加权引起互偶的改变导致加权比在 E 面 H 面发生变化。

#### 5 共形天线仿真与优化

同天线单元共形一样, 综合考虑共形天线单元和平面线阵的参数。利用 CST 微波工作室中关于共形设计的方法对线阵平面阵进行共形设计。设计思路是将平面天线阵列于圆柱面相交取其相交面, 然后构建天线辐射的介质基板以及背板。这样设计共形阵之后, 由于每个天线单元与圆柱面的交角不尽相同, 如果使用等距变换的话非常复杂, 可行性不高。故而此处只对天线进行等角变

换，而后优化天线中的相关参数，选择合适的阵元间距，最终实现天线的匹配和低副瓣性能。通过 CST 共形天线设计的功能将设计好的平面共形天线阵列共形于半径为 100mm 的圆柱面上。经过仿真和优化最终选择的阵元间距为  $0.6\lambda$ ，阵列的整体加权保持平面阵列的馈电分布。但由于有些馈线及天线没有完全的按照等距变换处理，天线的性能发生了一定程度的变换。利用已经讨论过的阵列理论和馈线技术，调整阵列的某些变量，尽量减弱由于不等距变换带来的天线性能恶化。

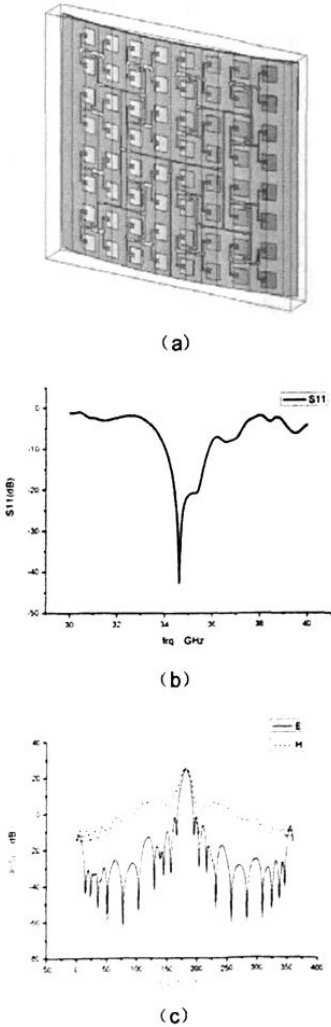


图 6 共形开线阵列

天线阵列在 35GHz 谐振，其  $S_{11}$  参数为 -23dB，带宽达 5.1%；天线的增益为 25.3dB，H 面副瓣电平为 -17.6dB，-3dB 波

束宽度为  $13.5^\circ$ ，这个方向的副瓣电平降低了 2.4dB，这是由于共形之后天线的方向图向外圆柱方向散开，而且天线的互耦及馈电网络的加权随着不等距变换发生了复杂的变化，这些都会使 H 面的方向图改变；E 面副瓣电平为 -26.9dB，-3dB 波束宽度为  $8.8^\circ$ 。这一面的副瓣电平比平面阵列高了 3.9dB，理论上此面的副瓣电平应该保持与平面阵相同的水平，但由于一些传输线因共形而发生线宽的改变，这样就会导致特性阻抗的不同，最终导致功率分配比不是按照平面阵列的分配比分配，这是 E 面方向图恶化的主要原因。

## 6 总结

本文设计仿真了一种工作在 Ka 波段（35GHz）的  $8 \times 8$  共形低副瓣阵列。通过对平面阵列低副瓣实现方法的讨论，先后设计了用于组阵的微带辐射单元，用于 Chebyshev 加权的功率分配器，最终完成了整个阵列的设计，阵列共形之后天线的性能出现了一定程度的恶化，但实现了较好的低副瓣效果，达到了预期的目标。

## 参考文献

- 1 Carles Puente-Baliarda, Rafael Pous. Fractal Design of Multiband and Low Side-Lobe Arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation 1996.5.
- 2 齐拴虎，何志权. 毫米波相控阵天线研究[J]. 船舶电子对抗. 2004, 27(3).
- 3 钟顺时；朱春辉；刘俊；许国庆. 一种低旁瓣微带天线阵的分析与设计，上海大学学报(自然科学版), 1995, 12
- 4 段文涛；魏宏亮；李思敏. 低旁瓣十六元缝隙微带天线阵的设计，桂林电子科技大学学报, 2007, 12
- 5 L.J.Ricardi. Radiation Properties of the Binomial Array[J]. Microwave Journal, 1972: 15(20).
- 6 张德斌，周志鹏，朱兆麒. 雷达馈线技术[M]. 电子工业出版社 2004: 12 364-368

## 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>