

波导柱面共形缝隙阵天线方向图优化设计

张 阔 李秀梅

(中国电子科技集团公司第十研究所, 四川 610036)

摘要: 本文提出了波导柱面共形缝隙阵天线的方向图优化问题。针对波导缝隙的具体结构, 采用 HFSS 软件仿真得到辐射单元的有源方向图, 以此为基础综合波导缝隙共形面阵的方向图。探讨了交叉极化分量的抑制方法, 并以 Ku 频段某一天线为例, 给出其方向图综合、仿真、测试结果的对比, 证明了方向图优化设计的有效性与正确性。

关键词: 共形, 波导缝隙, 方向图

Optimization Design of the Cylindrical Conformal Waveguide Slots Array

Zhang Kuo¹ Li Xiumei

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Sichuan 610036)

Abstract: The theory of pattern optimization design of the cylindrical conformal waveguide slots array is presented in this paper. According to the practical structure of the waveguide slots, the active radiation pattern is obtained by simulation software HFSS, and the pattern of the conformal plane is obtained. The method of the restraining crossing polarization is discussing, and an antenna which is at Ku band is taken for example, the pattern data of synthesis, simulation and testing are comparing and the result proves the validity of the pattern design theory.

Keywords: conformal, waveguide slots, pattern

1 引言

平板缝隙阵天线以其辐射效率高、功率容量大、口径分布容易实现、易于实现超低副瓣、可靠性高等优良的电气与结构性能, 在机载预警雷达、气象雷达、导引头雷达以及各种雷达中得到广泛的应用。但同时, 平板缝隙阵天线也是强散射源之一, 特别是战斗机前端的火控雷达天线, 其隐身性能必须给予高度重视。因此, 阵列天线与载体共形、以波导柱面共形缝隙阵代替平板缝隙阵是减小 RCS 值得考虑的途径之一^[1]。

2 圆柱共形面方向图分析方法

由于共形阵列天线的共形面为曲面, 其上的各个辐射线源不在空间的同一平面上, 这就导致了空间相位差出现。如果不对空间相位差进行补偿, 仍

然按照平面阵的方向图综合方法设计, 那么其将导致共形面的方向图顶端出现凹陷。如下图所示:

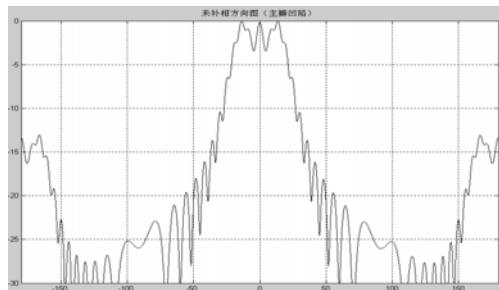


图 1 未补相方向图 (辐射单元数目为 20)

在参考文献[2]中, 作者已经对空间相位补偿法进行了深入的研究, 提出了三种相位补偿方案, 探讨了各种方案的应用场合与优缺点。在此, 我们不再讨论天线的相位补偿方式, 仅仅对补相后的的方向图优化进行研究。

一般情况下方向性乘积定理中, 假设阵列为无

限大阵列，各单元上的电流或场与所加的激励成正比，不考虑各单元之间的互耦，且各单元都是全向点源（即无方向性点源），各单元的方向图相同。在波导缝隙平面阵的情况下，各单元的方向图与自由空间的方向图基本相同，其上半平面近似为正弦曲线，最大指向一致。因此，可以直接使用一般情况下的方向图综合方法。工程上，按照该方法设计，综合结果、仿真结果与测试结果相对比，比较吻合一致。

在共形面的方向图设计中，由于各辐射线源中的各单元已经处于非同一平面上，各单元的方向图已不同于自由空间的方向图，方向图的最大指向已经完全不同；同时，共形面也将导致空间某一方向各单元辐射场的极化方向不相同从而形成较大的交叉极化分量。因此，一般情况下方向性乘积定理在共形阵列方向图综合中不再适用。

因此，在共形波导缝隙阵列的方向图综合中，考虑到单个缝隙的电场方向及其方向图特点，以及整个阵列天线的旁瓣要求、天线的效率、加工件的不可调试性等特点，我们对其方向图综合技术做了如下研究：

① 辐射单元有源方向图的分析。

在阵列中，每个缝隙的有源导纳直接影响决定与影响每个单元的方向图特性，其波束指向、半功率波束宽度等特性都与孤立缝隙产生的方向图不同。所以，我们研究辐射单元的有源方向图特性，提取仿真软件仿真得到的有源单元方向图结果并拟合，应用等效原理、借助数学模型达到正确的阵列方向图综合图。

② 阵列期望方向图的分析与综合。

设计中，共形阵列的幅度加权形式对方向图的交叉电平大小、位置与后瓣电平起着直接和至关重要的作用，故在不同的阵元分布设计中，综合的方向图与平面阵的方向图相比，会有较大的差异。必须分析设计合适的分布，对交叉极化电平、后瓣电平等参数权衡取舍，得到符合设计指标的设计参数。

③ 阵列与馈电网络的互耦效应。

由于在设计中采用了子阵技术，这就必然涉及到馈电网络的设计。在波导柱面共形缝隙阵天线的方向图综合设计中，不仅要考虑曲面波导与直波导的等效关系，达到精确的功率分配目的，更要考虑功分网络对交叉极化电平的影响。

下面，我们将对方向图设计进行具体讨论。

3 辐射单元方向图对阵列方向图的影响

首先给出圆柱共形阵列的示意图。

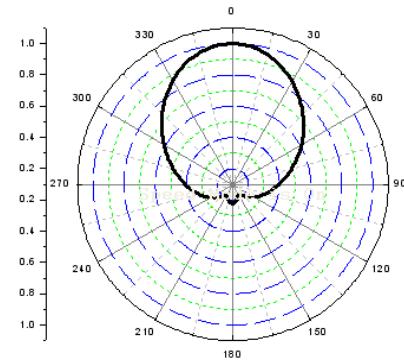


图 2 圆柱共形点源分布示意图

如图所示，小圆圈代表辐射单元，箭头所指方向为辐射单元的最大辐射方向， R 为圆柱的半径， ϕ 是相临两个辐射单元之间的夹角，其值受辐射波导的窄边尺寸与波导腔厚度限制。

其方向图表达式为如下式所示：

$$E(\phi) = \sum_n V_n EL(\phi - n\Delta\phi) \exp(jkR(\phi - n\Delta\phi)) \quad (1)$$

其中， $EL(\phi - n\Delta\phi)$ 给出各单元的辐射方向图与极化信息， V_n 为激励幅度。 $n\Delta\phi$ 为辐射单元与参考点之间的相位差，相位参考点为阵列中心。可以看到，与平面阵列不一样， $EL(\phi - n\Delta\phi)$ 不能从求和符号中提取出来，因为它是关于单元位置的方程^[3]。

下面，我们给出两种综合方法得到的方向图，即把辐射单元分别作为全向点源与方向性点源，综合得到天线方向图并对结果进行对比分析。假定辐射源数目为 20 个，工作频率为 15GHz，共形圆柱体半径为 300mm，考虑均匀分布与旁瓣为-25dB 的泰勒分布两种分布。

首先，采用全向点源，即 $EL(\phi - n\Delta\phi) = 1$ ，则公式 (1) 可以写为：

$$E(\phi) = \sum_n V_n \exp(jkR(\phi - n\Delta\phi)) \quad (2)$$

从图 3、4 所示的方向图可以看出，在 $\theta = \pm 60^\circ$ 的范围内，方向图与平面阵的方向图一致，符合设计需求。但是在超过 $\pm 60^\circ$ 的范围，副瓣电平、后瓣电平持续拉高，同时，全向点源综合的方向图不能反应出极化方向对交叉极化分量的影响。

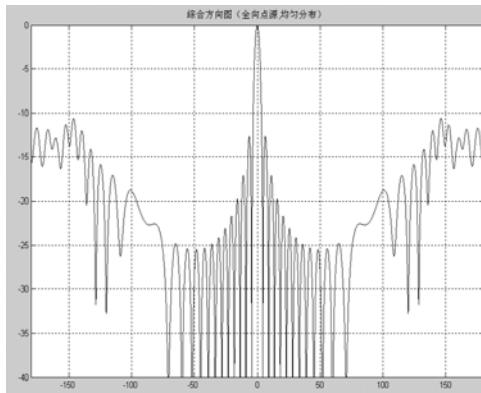


图 3 均匀分布 (20 单元, 全向点源)

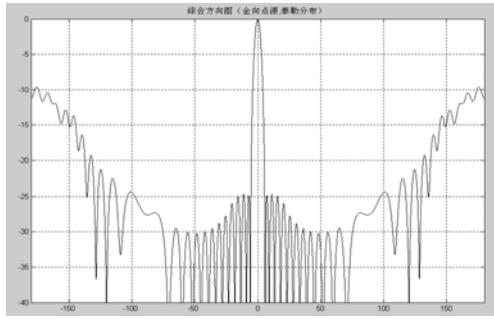


图 4 泰勒分布 (20 单元, -25dB, 全向点源)

所以, 必须考虑单个缝隙的辐射方向图特性。根据波导尺寸与工作频率, 利用电磁仿真软件 HFSS 仿真出单个缝隙的归一化辐射方向图, 以此作为拟合数据得到 $EL(\phi - n\Delta\phi)$, 代入公式 (1) 中, 得到拟合的方向图如下所示。

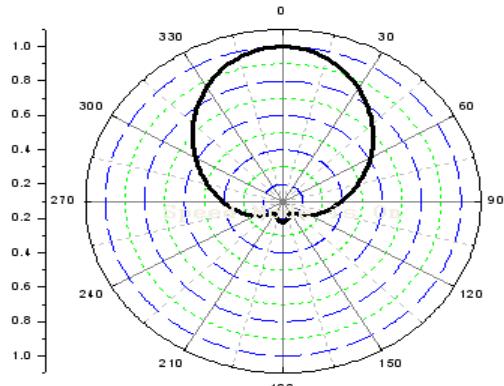


图 5 缝隙单元仿真方向图

从图 6、7 可以看出, 交叉极化分量将在某个角度消除方向图的零深、引起旁瓣电平抬高, 同时, 后瓣电平较高。

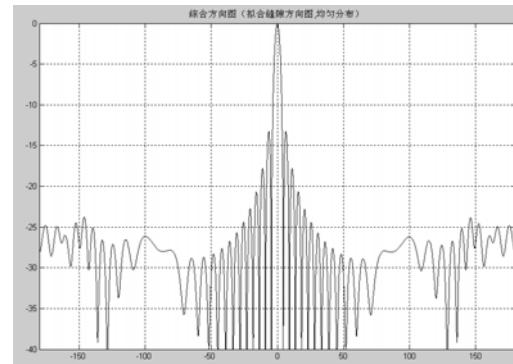


图 6 均匀分布 (20 单元, 方向性点源)

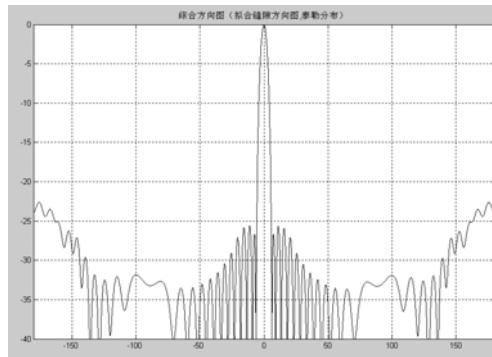


图 7 泰勒分布 (20 单元, -25dB, 方向性点源)

下面, 我们将以 Ku 波段的某一型号天线为例, 把方向图综合设计结果与仿真结果、测试结果进行对比分析。

4 Ku 频段天线方向图的综合设计、仿真与测试

Ku 频段某一个波导柱面共形缝隙阵列天线, 由辐射层、馈电层两层构成, 其参数如下所示:

单元数目 (辐射层) : 34*12;
中心工作频率: 15GHz;
辐射波导尺寸: 14mm*6.4mm;
耦合波导尺寸: 12.631mm*6.4mm;

只考虑共形面的方形图, 且不给出夹角 Φ 的推导过程直接给出其值。这样, 辐射波导的波导波长为 28.5774mm, 耦合波导的波导波长为 32.7382mm。那么, 其对应的夹角 Φ 为 3.2031° 。根据前面的结果, 代入单个缝隙的辐射方向图, 得到综合方向图如图 10 所示。同时, 给出 HFSS 仿真的方向图与天线实测的方向图, 如图 11、图 12 所示。

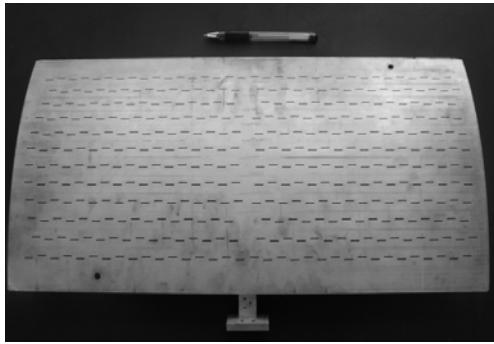


图 8 共形波导缝隙阵列主视图

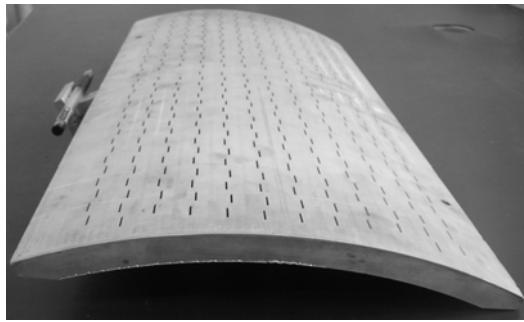


图 9 共形波导缝隙阵列侧视图

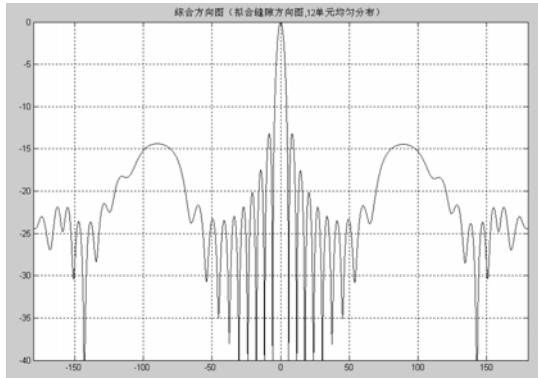


图 10 综合方向图 (共形面)

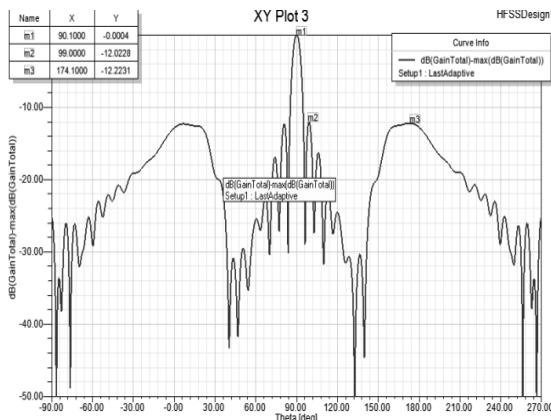


图 11 HFSS 仿真方向图 (共形面)

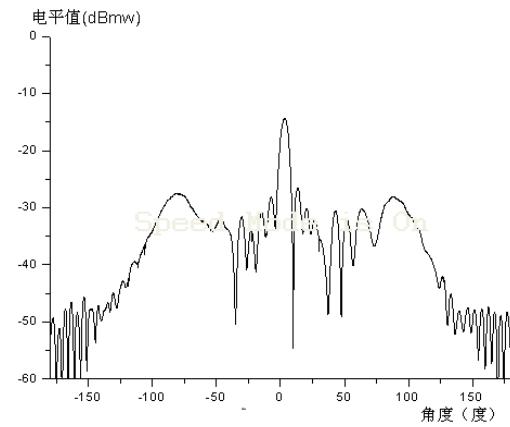


图 12 天线样件测试方向图 (共形面)

从上三图可见，方向图综合设计、仿真与测试结果比较一致。交叉极化电平都在 80° 左右。交叉极化电平与副瓣电平相当，这是由于辐射波导与耦合波导的尺寸所致。高的交叉极化电平，不仅会使增益降低、造成不必要的能量浪费，也不利于实现低旁瓣，这在共形面天线设计中，特别是在低旁瓣要求中必须避免。

重新研究公式(1)可以看出，可以通过两种方法可以降低交叉极化分量：

① 相位加权方法。其优点是交叉极化分量不受辐射波导、耦合波导窄边与波导壁厚的限制，但是这样必须设计优化理论，比较困难。

② 减小角度 Φ 的方法。角度 Φ 越小，交叉电平分量越低。其优点是不用复杂的优化设计理论，但同时其受辐射波导、耦合波导窄边与波导壁厚的限制，后瓣电平较高。

给出选择不同的辐射波导、耦合波导的尺寸相对应的夹角关系，同时给出其对应的方向图。

表 1 辐射波导、耦合波导与夹角对应关系

编号	辐射波导尺寸 (mm)	耦合波导尺寸 (mm)	对应的角度 Φ ($^{\circ}$)
a	14*6.4	12.631*6.4	3.2031
b	13*6.4	13*6.4	3.0625
c	12*6.4	14*6.4	2.7960
d	12*6.4	15*6.4	2.6254
e	12*6.4	16*6.4	2.5067

图 13 中，a、b、c、d、e 五条曲线代表着表 1 所示的波导尺寸对应形成的方向图。

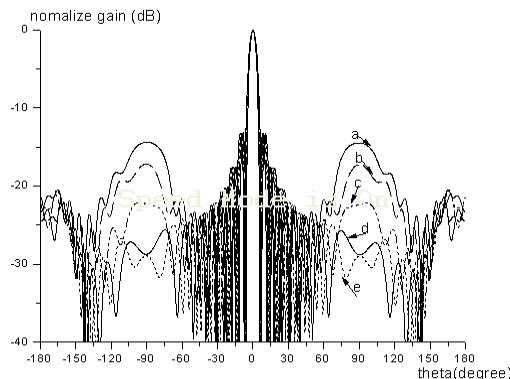


图 13 不同辐射波导、耦合波导尺寸对应的辐射方向图

可见, 小的角度 Φ 将抑制交叉极化电平, 大的角度 Φ 将导致严重的交叉极化分量。而角度 Φ 由辐射波导、耦合波导、功分网络层波导的尺寸的选择确定,

故波导尺寸的选择, 是形成良好方向图的前提。

5 结论

本文针对波导柱面共形缝隙阵天线的方向图优化问题, 提出了针对波导缝隙阵列的具体结构形式, 通过仿真提取得到单个缝隙的有源方向图, 最终综合得到共形面的方向图。探讨了共形面方向图的交叉极化电平的抑制方法, 并以 Ku 频段的波导柱面共形缝隙阵天线为例, 通过对比方向图的综合设计、仿真与测试数据, 证明了本文提出的方形图优化设计的有效性, 在工程设计中有重要的指导作用。

参 考 文 献

- [1] 杨弃疾, 范国新; 圆柱共形缝隙阵, 电波科学学报, 1997;
- [2] 李秀梅. 柱面共形裂缝阵天线的设计与仿真, 2007 年电磁场与微波技术学术会议, 中国电子科技集团公司第十研究所, 2007;
- [3] Lars Josefsson and Patrik Persson, Conformal Array Antenna Theory And Design, The IEEE Press Series on Electromagnetic Wave Theory, 2005, pp: 19-23

作者简介:

张阔, 男, 助理工程师, 主要研究领域为毫米波波导缝隙阵列天线、毫米波微带阵列天线; 李秀梅, 女, 工程师, 主要研究领域为毫米波波导缝隙阵天线、阵列天线、反射面天线等。

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,一直致力于专注于微波、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>