

# 波导缝隙阵行波线阵天线的设计和仿真

徐琰

(上海航天技术研究院 802 研究所, 上海 200090)

**摘要:** 本文介绍了缝隙单元在波导宽边中心线一侧排列的线阵的设计过程, 然后应用有限元法来求解缝隙间存在互耦、阵列终端接匹配负载时的缝隙阵天线的方向图, 并与实际测量结果进行比较, 仿真结果与实验结果吻合。

**关键词:** 波导缝隙阵 泰勒线源 有限元法

## 一 引言

波导缝隙阵天线具有口面场分布容易控制, 没有能量漏失, 具有天线口径效率高、性能稳定、结构简单紧凑、强度高、安装方便、抗风力强等结构优点, 而且容易实现低副瓣乃至超低副瓣, 由于具有这些优点, 波导缝隙天线已经成为新型雷达中天线的优选形式, 被广泛应用于雷达和通讯领域。

波导缝隙天线 E 面方向图宽, H 面方向图主峰倾角有特殊取向, 可控制。副瓣电平可以控制在-20dB 甚至-30dB 以下。两根天线就可以形成漏斗状的方向图, 非常适用于引信系统的要求。这种天线馈电方式灵活, 可以直接使用波导接口, 也可用电缆接口。选择适当的缝隙阵形式, 即可以从天线的前端馈电, 也可以从后端馈电, 给结构设计带来极大方便。

本文设计的波导缝隙天线是由以宽边上纵缝为辐射单元的线阵天线, 通过精确控制口径分布, 就能在给定频带范围内得到所要求的天线方向图, 增益和阻抗等性能。

## 二 波导缝隙阵引信天线的设计

该天线实际采用了主波束倾向负载端的单排缝隙阵形式。副瓣考虑加工精度及其它因素的影响, 留出一定的设计余量, 选用副瓣为-35dB 的 Taylor 分布。

### 2.1 波导尺寸的确定

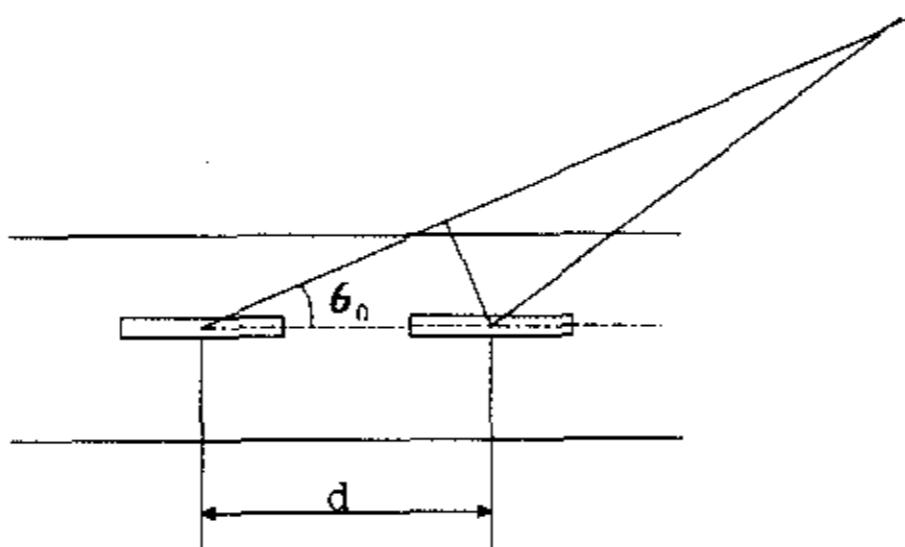


图 1 天线主波束指向示意图

采用波导宽边单排缝隙阵, 要求使天线主波束指向负载端  $\theta_0$  方向 (如图 1), 由天线阵的波束指向  $\theta_0$  确定波导宽边尺寸  $a$ 。由于

$$d \cos \theta_0 \frac{2\pi}{\lambda_0} = d \frac{2\pi}{\lambda_s} \quad (1)$$

$$\lambda_s = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可得:  $a = \frac{\lambda_0}{2 \sin \theta_0}$

式中:  $\lambda_0$  是自由空间波长,  $\lambda_s$  是波导波长,  $a$  是波导的宽边。

## 2.2 缝隙间距的选择

这里缝隙全部开在波导中心线的一边, 根据天线的安装位置, 能量由波导一端输入, 主波束要倾向终端负载方向, 同时又要保证只有一个主瓣, 不出现栅瓣, 则根据:

$$d < \frac{\lambda_0 \lambda_s}{\lambda_0 + \lambda_s}$$

来确定辐射缝隙的间距<sup>[1]</sup>。

## 2.3 缝隙尺寸的确定

由  $10 \leq \frac{\lambda_0}{W} \leq 200$ , 缝隙宽度  $W$  可选择一合适的值, 缝长  $L = 0.96 \times \frac{\lambda_0}{2}$ 。

## 2.4 缝隙阵长及缝隙数目的确定

由波瓣宽度及增益要求确定缝隙阵的长度:  $L = \sigma \cdot \beta_0 \frac{\lambda_0}{2 \theta_{0.5H} \cos \theta_0}$ 。式中:  $2\theta_{0.5H}$

为半功率波瓣宽度,  $\theta_0$  为主波束倾角,  $\beta_0$  为波束展宽因子 (与副瓣电平有关, 可查表得到具体参数值),  $\sigma$  为泰勒线源展宽因子 (在泰勒线源近似中将详细讨论)。

已知缝隙间距可得缝隙总数:  $N = (L/d) + 1$ 。

## 2.5 泰勒线源近似

虽然契比雪夫阵列的辐射特性很好, 但它的等副瓣特性会造成能量的损耗较多, 而且其两端单元的激励电流的幅度往往比其相邻单元电流幅度变化大得多, 这对阵列的馈电造成了很大困难, 而且激励电流的微小误差对副瓣电平的影响相当大。这里采用泰勒分布, 泰勒阵列天线的方向图只有靠近主瓣的前几个副瓣的电平接近相等, 随后的各副瓣电平则单调递减。

由主瓣与副瓣电平之比  $R_0$  可以确定参数  $A$

$$A = \frac{1}{\pi} \cosh^{-1} \left( 10^{\frac{R_0}{20}} \right)$$

展宽因子  $\sigma$ , 由下式确定:  $\sigma = \frac{\bar{n}}{u_{\bar{n}}} = \frac{\bar{n}}{\sqrt{A^2 + \left( \bar{n} - \frac{1}{2} \right)^2}}$

泰勒阵列各单元的激励幅度:

$$f(p) = 1 + 2 \sum_{m=1}^{\bar{n}-1} S(m) \cos(mp)$$

$$\text{式中 } p = \frac{2\pi}{L} \xi = \begin{cases} \frac{2\pi dn}{L}, n = 0, 1, 2, \dots, N & (\text{单元总数 } n = 2N + 1) \\ \frac{\pi d(2n+1)}{L}, n = 0, 1, 2, \dots, (n-1) & (\text{单元总数 } n = 2N) \end{cases}$$

最后对激励幅度进行归一。

## 2.6 辐射缝隙的电导值的确定

本文设计的是非谐振式波导缝隙阵，也称行波缝隙阵，缝隙的间距不是半个波导波长，波导的一端用匹配负载端接。在这种情况下，每个缝隙只辐射出总功率的很少部分。由于缝隙在波导中呈现小的不连续性，因此对入射波产生一个小的反射，幸好缝隙的间距不是  $\lambda_g/2$ ，因而对不同缝隙的反射场不会同相迭加。因此在阵的输入端总的反射系数也是小的。

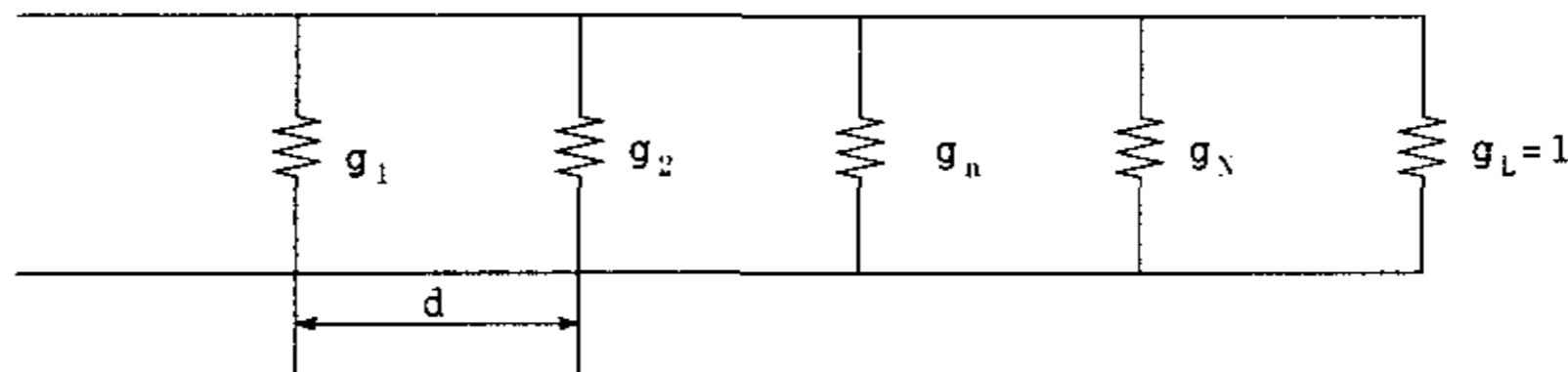


图 2 波导缝隙阵的等效电路图

如图 2 所示，如果第  $n$  个缝隙的相对激励场的电平为  $a_n$ ，则此缝隙的辐射功率  $P_n$  将正比于  $a_n^2$ 。幅度分布  $a_n$  已由泰勒线源近似给出，若令  $r$  是在负载匹配的情况下所消耗的部分入射功率，则通过

$$g_n = \frac{P_n}{r + \sum_{i=1}^n P_i} = \frac{P_n}{1 - \sum_{i=1}^{n-1} P_i}$$

可得到每个缝隙的电导值<sup>[2]</sup>。这里假定输入功率为 1， $P_n$  为第  $n$  个缝隙的辐射功率， $\sum_{i=1}^{n-1} P_i$  为第 1 个缝隙到第  $n-1$  个缝隙的辐射功率总和。

## 2.7 缝隙偏移波导宽面中心线距离 $Y_n$ 的确定

宽边上纵向并联缝隙的电导为：  $g_n = g_1 \sin^2(\pi Y_n / a)$

$$\text{其中: } g_1 = (2.09a\lambda_g/b\lambda_0) \cos^2(\lambda_0\pi/2\lambda_g)$$

式中：  $Y_n$  是缝隙距波导中心线的距离， $a$  和  $b$  分别是波导的宽和高。

## 三 仿真结果

HFSS 仿真结果如下，仿真结果与实验结果的比较如图 3 所示，从比较可知，仿真结果与实验测量结果非常的吻合。

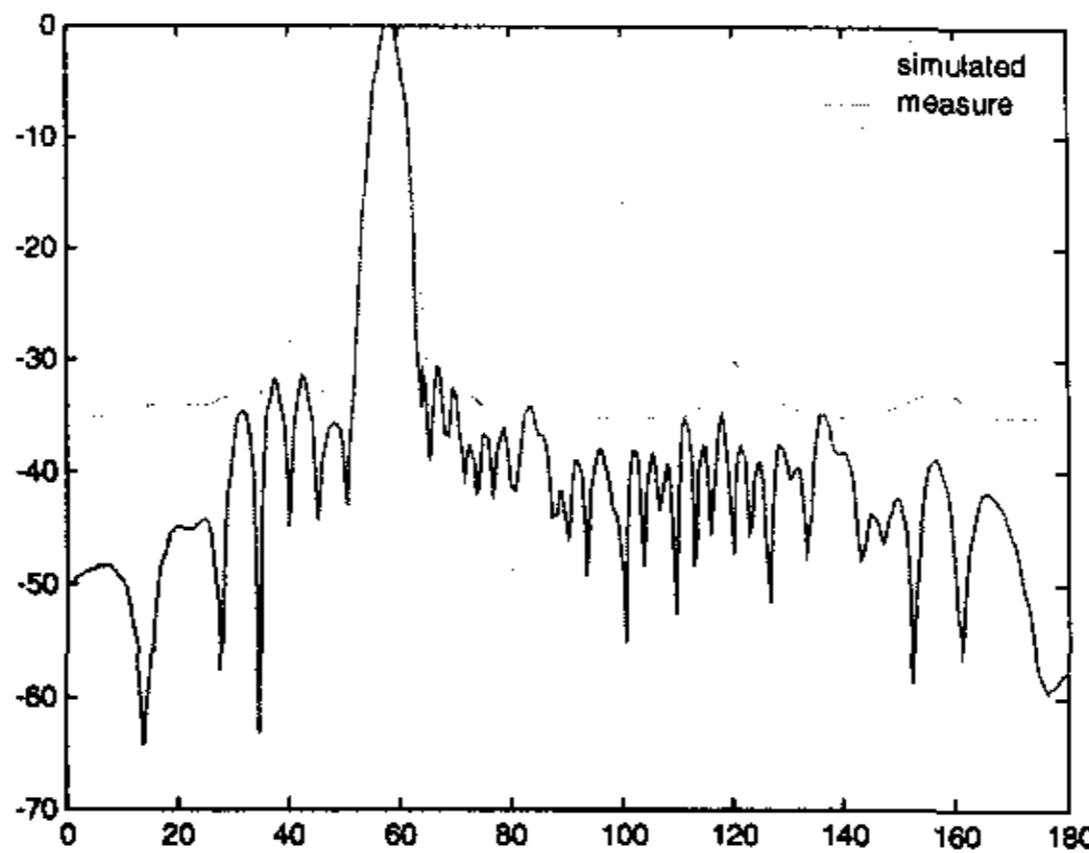


图 3 仿真和测量方向图的比较

#### 四 结论

本文应用有限元法对设计出的缝隙阵天线进行仿真，仿真时已经考虑了各个缝隙之间的耦合，计算结果已经很接近实际值。由于仿真时定义波导为理想导体，终端匹配，所以反射很小，仿真出的方向图副瓣很低（都在  $-30\text{dB}$  以下），驻波很小，增益也比较高。工程中必然存在加工误差，副瓣会抬高几个  $\text{dB}$ ，所以设计时要留出一定余量，才能满足工程要求。

#### 参考文献

- [1] 何振勇 《低旁瓣毫米波波导裂缝阵天线的研究与设计》 上海：中国宇航学会特种装备专业委员会第八次学术交流会论文集，1996
- [2] 林昌禄主编 《近代天线设计》 北京：人民邮电出版社，1990
- [3] 金建铭 《电磁场有限元方法》 西安：西安电子科技大学出版社，2001
- [4] 丁海强 《PML 及其使用方法》 Ansoft 2000 中国用户通讯，2000
- [5] Ansoft Corporation 《Lumped RLC Elements in HFSS Version 8》 Ansoft HFSS Engineering Note, 2001

## 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](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>