

文章编号:1671-0576(2003)01-0037-05

波导缝隙阵引信天线的设计和仿真

徐琰，刘元云

(上海航天技术研究院802所, 上海 200090)

摘要: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

中图分类号: TN 823.24 **文献标识码:**A

The Design and Simulation of Slot Array Fuze Antenna

XU Yan, LIU Yuan-yun

(No. 802 Institute of SAST, Shanghai 200090, China)

Abstract: This paper introduces the design procedure of a linear array whose slot units arrange on one side of the center line of waveguide broad wall. Then with the application of the finite element method, its radiation patterns including the mutual coupling and the terminated matching load are calculated. Finally, this paper compares the simulated results with measured data, and finds excellent agreement between them.

Key words: slot array; taylor distribution; the finite element method

领域。

0 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

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。

收稿日期:2002-11-28

作者简介:徐琰(1977-),女,工程师,从事天线技术的研究。

1 波导缝隙阵简介

波导缝隙构成的天线阵列主要有两种形式，即波导宽边开缝而构成的缝隙天线阵和波导窄边开缝而构成的缝隙天线阵。波导宽边辐射纵缝单元示意图见图1，按照一定方式排列的若干纵缝就形成波导宽边纵缝阵列天线。波导宽边纵缝阵列天线，不但电气性能优良，而且还有厚度小，功率容量大等特点，在机载火控雷达、导弹等方面有着其它天线无法替代的优势。

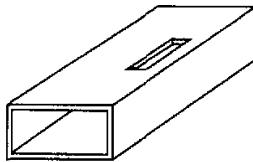


图1 波导宽边辐射纵缝

Fig. 1 Longitudinal slot in broad wall of waveguide

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。在缝隙阵面的设计中，单个缝隙的特性将对整个天线阵列的性能产生直接影响。因此，单缝的设计（缝长、缝宽、偏置）是设计整个天线阵列的基础。

2 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

采用波导宽边单排缝隙阵，要求使天线主波束指向负载端 θ_0 方向如图2所示。

由天线阵的波束指向 θ_0 确定波导宽边尺寸 a ，由于

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

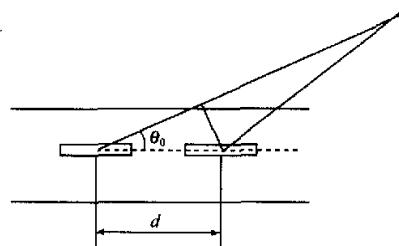


图2 天线主波束指向示意图

Fig. 2 The antenna beam direction

又

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

将式(2)代入式(1)可得

$$a = \frac{\lambda_0}{2 \sin \theta_0} \quad (3)$$

式中， λ_0 为自由空间波长； λ_g 为波导波长； a 为波导的宽边。

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

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

来确定辐射缝隙的间距^[1]。

2.3 缝隙尺寸的确定

由 $10 \leq (\lambda/W) \leq 200$ ，缝隙宽度 W 可选择一个合适的值，缝长 $L = 0.96 \times (\lambda_0/2)$ 。

上面的工作都是针对波导方头缝隙。实际上，从便于加工考虑，阵面波导采用两端半圆辐射缝隙。于是需要将方头缝隙转换成圆头缝隙。工程上圆头缝隙与方头缝隙换算的两种等效方案，一种是根据圆头缝隙和方头缝隙的周长相等来折算加工时圆头缝隙的参数，另外一种等效方案是根据圆头缝隙和方头缝隙的面积相等来折算出圆头缝隙的参数。

现采用等面积等效将其转换为圆头缝尺寸，

即

$$\begin{aligned} L_{\text{圆}} &= L_{\text{方}} + \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) W \\ &= L_{\text{方}} + 0.2146 W \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $L_{\text{圆}}$ 表示圆头缝隙长度; $L_{\text{方}}$ 表示方头缝隙长度; W 为缝隙宽度。

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:

$$L = \sigma \cdot \beta_0 \frac{\lambda_0}{2\theta_{0.5H} \cos \theta_0} \quad (5)$$

式中, $2\theta_{0.5H}$ 为半功率波瓣宽度; θ_0 为主波束倾角; β_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); σ 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:

$$N = (L/d) + 1 \quad (6)$$

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

$$A = \frac{1}{\pi} \cosh^{-1}(10^{R_0/20}) \quad (7)$$

展宽因子 σ , 由下式确定:

$$\sigma = \frac{\bar{n}}{u_{\bar{n}}} = \frac{\bar{n}}{\sqrt{A^2 + \left(\bar{n} - \frac{1}{2}\right)^2}} \quad (8)$$

泰勒阵列各单元的激励幅度:

$$f(p) = 1 + 2 \sum_{m=1}^{\bar{n}-1} S(m) \cos(mp) \quad (9)$$

其中:

$$p = \frac{2\pi}{L} \xi = \begin{cases} \frac{2\pi d n}{L} & n = 0, 1, 2, \dots, N \\ \frac{\pi d (2n+1)}{L} & n = 0, 1, 2, \dots, (N-1) \\ \frac{\pi d (2N+1)}{L} & (单元总数 n = 2N+1) \end{cases} \quad (10)$$

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 $\lambda_s/2$, 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。

波导缝隙阵的等效电路图如图 3 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

$$g_n = \frac{P_n}{r + \sum_{i=n}^N P_i} = \frac{P_n}{1 - \sum_{i=1}^{n-1} P_i} \quad (11)$$

可得到每个缝隙的电导值^[2]。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。

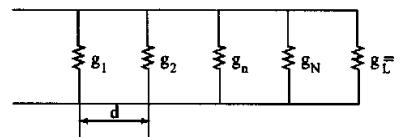


图 3 波导缝隙阵的等效电路图

Fig. 3 The equivalent circuit of the slot array

2.7 缝隙偏移波导中心线距离 Y_n 的确定

宽边上纵向并联缝隙的电导为

$$g_n = g_1 \sin^2(\pi Y_n/a) \quad (12)$$

其中:

$$g_1 = (2.09a\lambda_g/b\lambda_0)\cos^2(\lambda_0\pi/2\lambda_g) \quad (13)$$

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。

3 有限元法

本文应用有限元法来分析求解波导缝隙阵引信天线。有限元方法的原理是用许多子域来代表整个连续区域, 在子域中, 未知数用带有未知系数的简单插值函数来表示。因此无限个自由度的问题被转化成了有限个自由度的问题, 换句话说, 整个系统的解用有限数目的未知数近似。然后, 用里兹变分或伽辽金方法得到一组代数方程。最后, 通过求解方程组得到边值问题的解。所以, 边值问题的有限元算法包含四个基本步骤: 区域的离散或子域的划分、插值函数的选择、方程组的建立及方程组的求解^[3]。在这里推荐使用 Ansoft HFSS 软件来实现有限元算法, 完成波导缝隙阵引信天线的仿真。

Ansoft HFSS 是计算任意三维无源结构的高频电磁场仿真软件。HFSS 应用切向矢量有限元法求解射频、微波器件的电磁场分布, 计算由于材料和辐射带来的损耗, 可直接得到特征阻抗、传播系数、S 参数及电磁场、辐射场、天线方向图等结果。阵面缝隙之间的相互耦合必须精确计算, 互耦作用直接影响方向图特性。用有限元法分析波导缝隙阵天线已经考虑了缝隙间互耦的影响。

4 仿真模型及仿真结果

有限元法必须在一个封闭的区间内才能求

解, 在处理天线这样的开放场问题时, HFSS 采用辐射边界条件(ABC)来表示开放空间。但是, ABC 某些情况下并不能完全吸收电磁波, 有一部分能量会从吸收边界上反射回去, 影响求解精度, 尤其是在求解窄波束低副瓣的阵列天线时, 影响更大。于是, 选择采用理想匹配层面(PML), PML 是由一系列虚拟的材料组成, 利用这些材料将电磁波完全吸收实现了电磁波的零反射, 因而可以放置在离辐射体更近的地方, 既提高了求解的精度, 又减少了求解的规模^[4]。仿真模型如图 4 所示。

定义波导壁为 Perfect E, 这类边界强制电场垂直表面, 模拟理想导体表面。定义缝隙表面为 Perfect H, 这类边界强制了在边界两边的切向分量相等, 对于内部平面, 它产生了场传播通过的自然边界, 对外表面的平面, 它产生了一个模拟理想磁导体(磁场的切向分量为 0)的边界, 使电场可以通过它向外辐射。

定义波导一端为端口, 而另一端连接集总 RLC 元件来实现匹配^[5]。矩形表面场阻抗和集总阻抗的关系分析如下, 图 5 是将要定义集总阻抗边界条件的薄矩形板的示意图。

图中 l 和 w 分别是矩形板的长和宽;

E_t 是阻抗边界表面电场的切向分量;

H_t 是阻抗边界表面磁场的切向分量;

I 是板上的电流;

U 是板上的电压降;

c 是包围板的闭合曲线。

集总阻抗和场阻抗的定义分别为

$$Z_{lumped} = \frac{U}{I} \quad Z_{field} = \frac{E_t}{H_t}$$



图 4 有限元仿真模型

Fig. 4 The model of the FEM simulation

电路量 U 和 I 可以由场量来表示:

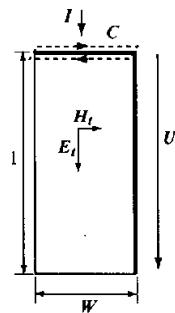


图 5 薄矩形板

Fig. 5 Thin rectangular sheet

$$U = \int_l E_t dl = E_t l$$

$$\oint H_t d\ell = H_t w = I$$

于是:

$$Z_{lumped} = \frac{U}{I} = \frac{E_t l}{H_t w} = Z_{field} \frac{l}{w}$$

$$Z_{field} = Z_{lumped} \frac{w}{l}$$

波导内的场阻抗可以由软件求出, 借助矩形表面场阻抗和集总阻抗的关系, 得到连接在波导终端的集总元件值, 最终完成仿真, 仿真结果如下。

图 6 为波导缝隙阵列天线在中心频率 f_0 的 E 面、H 面方向图。

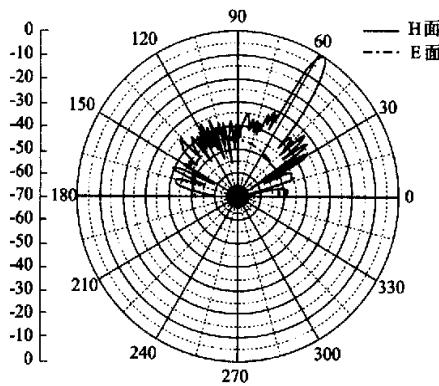


图 6 E 面和 H 面方向图

Fig. 6 The patterns of E-plane and H-plane

仿真结果与实验结果的比较如图 7 所示, 从比较可知, 仿真结果与实验测量结果非常的吻合。

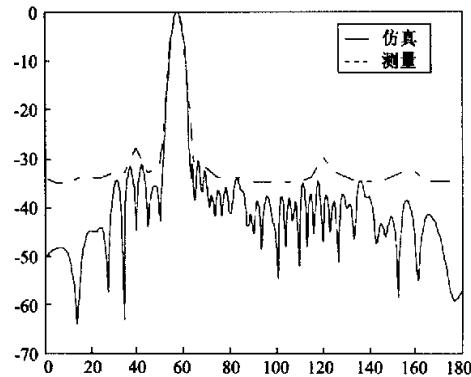


图 7 仿真和测量方向图的比较

Fig. 7 Comparison between simulated and measured patterns

5 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 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 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[A]. 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[C]. 上海, 中国宇航学会特装委员会, 1996.
- [2] 林昌禄. 近代天线设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1990.
- [3] 金建铭. 电磁场有限元方法[M]. 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[M]. 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)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>