

矩形波导宽边四元斜缝天线的设计

陈凡 尹家贤
(国防科学技术大学电子科学与工程学院)

摘要: 介绍了一种矩形波导宽边四元中心斜缝天线的设计, 简要阐述了宽边斜缝阵列天线的理论依据和设计原则。利用算得的参数, 借助CST软件的参数扫描功能, 通过局部地调整设计参数就可以方便地得到天线的谐振参数, 并对天线进行了仿真分析。仿真结果表明, 该天线在切割四个缝的情况下即能够实现设计指标的要求, 且天线性能良好。

关键词: 矩形波导; 宽边; 斜缝; 谐振阵; CST

Design of an Antenna with Four Inclined Slots in the Broad Face of Rectangular Waveguide

Chen Fan Yin Jiaxian
(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology)

Abstract: The design of an antenna with four inclined slots in the broad face of rectangular waveguide and the theory of it are introduced in this paper. At the same time the principle of how to design a small antenna array of inclined slots in the broad face of rectangular waveguide is described briefly. The paper uses the determined parameters to found out the resonance parameters easily with the help of parametric analysis function in CST and adjusting locally the design parameters, and then simulation of the antenna is conducted in considering the coupling problem. The results of simulation indicate that this antenna can achieve the target request when the antenna is incised four slots, and it has a good performance.

Key words: rectangular waveguide; broad face; inclined slot; resonant array; CST

0 引言

波导缝隙天线自上世纪中叶以来有了很大的发展, 广泛用于地面、舰载、机载、导航等各个领域。由于缝隙阵列天线对天线口径面内的幅度分布容易控制, 口径面利用率高, 体积小, 易于实现低或极低副瓣等特点, 因而使其获得广泛使用。在波导缝隙天线的研究方面, 许多学者对缝隙天线理论和实验进行了大量基础性的研究工作, 因而波导缝隙天线的理论越来越成熟。本文所设计的就是基于车载雷达系统应用的一种小型波导缝隙天线。该天线要求在水平面内具有宽波束的特点, 能够覆盖比较宽的范围, 从而更有效地提高车辆的战场生存能力。天线需要满足的性能指标如下: a. 增益: 大于11dB; b. 3dB波束宽度: E面为 20° , H面为 110° ; c. 副瓣电平: 小于 -13dB ; d. 驻波比: 小于2。

为简化设计起见, 本设计采用波导宽壁斜缝谐振阵的方式, 切割的缝隙数为4个, 达到了指标要求的效果。

1 理论分析

1.1 串联缝隙阵的模型

由波导内的场分布情况可知: 当波导宽边中心开斜缝时, 窄缝在纵向不切割电流线; 在缝的横向由于对电场的扰动, 使得总电场在缝的两侧发生跳变, 即电压跳变, 故相当于在传输线上串联了一个阻抗。对中心馈电的谐振线阵模型来说, 假设波导壁上开有N个斜缝, 缝与缝中心间距 $\lambda_s/2$, 为取得同相激励, 相邻缝交叉倾斜放置, 波导末端短路板距终端缝隙 $\lambda_s/2$, 以使缝隙中心处于电压或电流最大值位置, 线阵模型如图1所示。

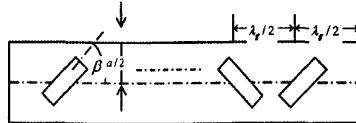


图1 线阵模型

其等效电路如图2所示。

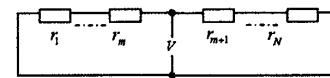


图2 等效电路

图中所示均为归一化的等效电阻。

1.2 缝隙特性参数的分析

在天线工作频率的选取上, 本雷达系统的工作频率为10.5GHz, 故该天线的工作频率为10.5GHz。对于阵列中各单元以等间距位于直线上的线阵, 其阵列因子可表示为:

$$S = \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{j(nkd \cos \theta + \phi_n)} \quad (1)$$

其中 A_n 为激励的幅度, θ 为观察方向与直线的夹角, d 为阵元间距。由于谐振阵各单元是同相的, 即 $\phi_n = 0$, 则上式可简化为:

$$S = \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{jnu} \quad (2)$$

$$u = kd \cos \theta \quad (3)$$

当 $u = 2m\pi, m = 0, \pm 1, \dots$ 时, S 取最大值, 且 $m=0$ 时为主瓣。为了实现低副瓣并使主瓣展宽, 采用中心馈电从阵中到边缘幅度递减, 按泰勒线源分布加权各缝隙, 两边呈对称分布, 其方向图零点位置由下式决定:

$$n_s = \begin{cases} \pm \sigma \sqrt{A^2 + (n-1/2)^2} & 1 \leq n \leq N \\ \pm n & n \leq n_s \end{cases} \quad (4)$$

σ 为展宽因子:

$$\sigma = \bar{n}/\sqrt{A^2 + (n-1/2)^2} \quad (5)$$

$$A = \frac{1}{\pi} \cosh^{-1} R$$

其中 $R=10^{-SLL/20}$, 副瓣电平 SLL 按指标要求选择; 其零点位置在谢坤诺夫单位圆上的对应根为 $Z_n = e^{j2\pi n_s/N}$, 令 $Z = e^{ju}$, 则阵因子可写为^[3]:

$$S = \sum_{n=1}^N A_n Z^n = A_N \prod_{n=2}^N (Z - Z_n) \quad (6)$$

将后一项按多项式展开, Z 的各次幂系数即为相对应的激励幅度。

由图2, 当波导采用中心馈电并处于谐振的时候(其阻抗虚部为零), 对泰勒分布而言, 则有:

$$\sum_{n=1}^N r_n = 2 \quad (7)$$

$$r_n = KA_n^2 \quad (8)$$

K 为归一化常数, 由以上两式可得到每个串联缝隙的归一化电阻:

$$r_n = (A_n)^2 / 2 \sum_{n=1}^N (A_n)^2 \quad (9)$$

将之前得到的每个缝隙的激励幅度代入即可求得相应的归一化电阻值, 在本设计中 N 取4。

A.F.Stevenson利用洛伦兹互易定理及波导中功率的平衡方程^[1], 得到了串联缝隙的归一化等效电阻表示式为^[2]:

$$\begin{aligned} r_n &= (\lambda/\lambda_g)(\chi^2/ab)[I(\beta)\sin\beta + (\lambda_g/2a)J(\beta)\cos\beta]^2 \\ &\quad \left[\frac{I(\beta)}{J(\beta)} = \left[\frac{\cos(\pi\zeta/2)}{1-\zeta^2} \right] \right] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \zeta \\ \chi \end{cases} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_g} \right) \cos\beta \mp \left(\frac{\lambda}{2a} \right) \sin\beta$$

其中 β 表示缝隙中心线与波导宽边中心线之间的夹角, a 为宽壁的长度, b 为窄壁的长度。将之前求得的 r_n 代入并求解方程可得到对应的缝隙偏角。

1.3 影响天线性能的因素

应用以上所计算出来的结果来进行天线的设计, 还必须考虑缝隙间的互耦问题^[4,5]; 若不考虑互耦, 将使天线口径面的幅度分布和相位分布变坏, 同时也将恶化天线的输入端匹配。近年来随着计算机辅助技术的飞速发展, 在设计比较小的缝隙阵列时, 通过仿真得到近场数据的近场诊断法越来越受到重视。在缝隙数为4的情况下, 根据上面得出的参数, 结合CST软件中参数扫描的功能, 能够快速地找到准确的电参数, 大大提高了设计的效率。

串联缝隙与纵向缝隙相比, 由于其角度偏转的原因, 其交叉极化辐射要比纵向缝隙高, 这会带来副瓣电平的升高和增益的降低, 仿真结果也证实了这一点, 而这是我们在设计中所不希望看到的, 需要采取措施抑制交叉极化辐射。在本设计中, 采用在每个缝隙上方加一个小波导口的办法, 小波导的传播方向垂直于缝隙所在的平面。在不增加其传播方向长度的情况下, 通过控制小波导的宽边尺寸, 使其截止波长小于缝隙在交叉极化方向上传播模的截止波长, 来抑制交叉极化电平。为进一步降低交叉极化电平, 同时也对主瓣波形进行调整, 参照仿真结果, 可在小波导口中间插入金属片来进一步减小其宽边尺寸, 仿真结果表明, 该方法能有效地降低交叉极化所带来的影响。

2 建模与仿真

本文在设计波导缝隙天线的过程中, 设计中的数值仿真都是在CST时域求解器的环境中完成的。

2.1 天线模型的建立

辐射波导选用的尺寸是 $22.86 \times 10.16 \text{ mm}$, 缝一侧的波导壁厚 1 mm , 缝宽为 2 mm , 波导两端为理想短路面;

截止波导 $16 \times 8 \text{ mm}$ 。建立模型, 其框架图如图3所示:

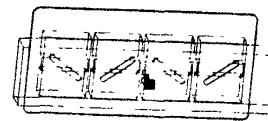


图3 天线模型框架图

其中黑色标记处为同轴线中心馈电点; 辐射口上方的方形材料为天线罩; 从左到右缝隙的编号依次为1~4。

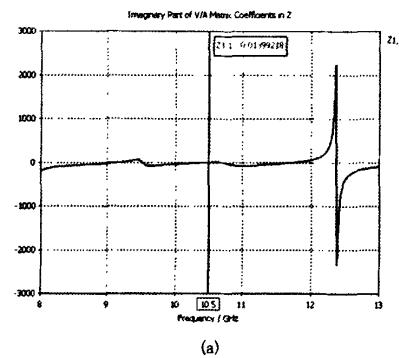
2.2 仿真结果分析

仿真中将缝隙 l 和倾角 β 设置成变量, l 的初始值取 $\lambda/2$, 利用CST的参数扫描功能, 对缝隙长度和倾角进行扫描。通过设置合理的步长, 能够加快扫描进度, 减少计算时间。由于本设计采用的是同轴线中心馈电, 需要考虑阻抗匹配的问题, 否则会在与波导的连接处产生反射, 影响天线的性能。根据 $\lambda/4$ 阻抗变换的原理, 在仿真中通过改变同轴线内导体探针的长度来进行匹配, 观察端口模式当同轴线输入阻抗为 50Ω 时即认为达到了所需的效果, 经过仿真得到同轴线内导体探针长度为 8.5 mm 。并在此基础上仿真得到缝隙的参数如下:

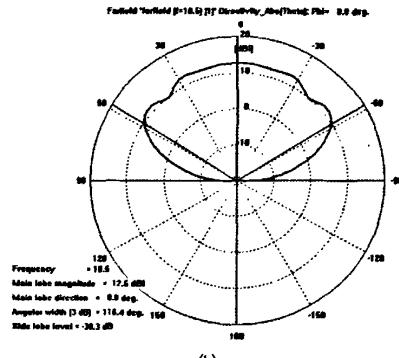
表1

缝隙编号	缝隙长度 (mm)	偏转角度 (°)
1	12.27	37
2	12.3	38
3	12.3	38
4	12.27	37

最终仿真结果如下:



(a)



(b)

从仿真结果中可以很明显看出, 中心频率处驻波比达到了非常理想的效果, 在驻波比为2以下的带宽大约为 400 MHz , 其结果符合设计要求; 其H面方向图(即天线架装后的水平方向图)波束宽度达到了宽角度探测的要求;

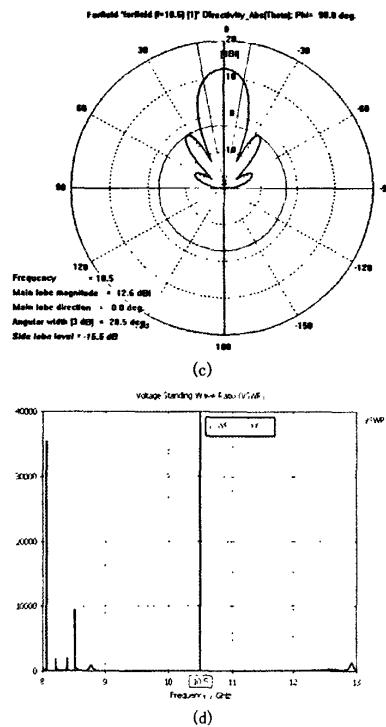


图4 仿真结果

E面方向图也达到了指标要求，不足之处在于其副瓣电平还不是非常理想，这主要是由于为了满足波束宽度的需要而采用缝隙数较少的缘故，但其损失在可接受的范围内。总体来说，各项指标达到了设计之初的目标。

3 结语

本文从应用目标的实际情况出发，利用波导宽边中心斜缝的形式设计了一款小型四元线阵天线，通过仿真分析，其各项性能参数都达到了规定的指标要求。并且由于体积小、稳定性好、能够满足实际应用的需要，在实际制作由于加工工艺等方面的原因会造成一定的误差，需要严格控制加工误差。

参考文献：

- [1] 刘克成, 宋学成. 天线原理[M]. 长沙: 国防科技大学出版社. 1989. 5: 137-147.
- [2] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京: 电子工业出版社. 2002. 6: 271-302.
- [3] 隋立山, 柴舜连, 毛钧杰. 矩形波导窄边倾斜缝隙天线阵的设计[J]. 现代电子技术, 2008, 31(3): 14-16, 20.
- [4] Elliott R S, Kurtz L A. The design of small slot arrays[J]. IEEE Trans. Antennas Propaga. 1978, AP-26(2): 214-219.
- [5] Rengarajan S R. Compound radiating slots in a broad wall of a rectangular waveguide[J]. IEEE Trans. Antennas and Propaga. 1989, 37(9): 1116-1123.

作者简介：

陈凡, 男, 1982年出生, 山东邹城人, 2005年毕业于国防科学技术大学电子科学与工程学院电子工程专业, 现为该院电子科学与技术专业硕士研究生, 主要研究

方向为毫米波与微波技术。

尹家贤, 男, 1964年出生, 浙江杭州人, 国防科学技术大学电子科学与工程学院副教授, 主要研究方向为天线理论, 毫米波与微波技术。

(上接29页)

- [1] 涂晓东, 李乐民. ATMSAR处理器发送数据业务的信元调度算法[J]. 通信学报, 2000, 27(7): 2-5.
- [2] 姚聪, 方勇, 汪敏, 潘志浩. 基于ARM7的远程机器人控制系统的研制[J]. 电子技术, 2003(11): 25-28.
- [3] 杜春雷. ARM体系结构与编程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [4] 侯建华. 基于ARM7的远程智能住宅控制装置的研制[J]. 电子技术, 2009(12): 52-54.
- [5] 张营. ARM嵌入式系统的LCD驱动设计[J]. 电子技术, 2008(7): 25-27.

作者简介：

谷朝勇(1975.10-), 男, 山东成武人, 菏泽学院, 讲师, 研究方向为畜牧养殖
电话: 13605306398
联系地址: 菏泽学院教务处(274000)

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>