

文章编号:1001-893X(2009)05-0067-04

## 毫米波波导缝隙线阵天线随机误差分析\*

张 阔, 罗 凡, 李秀梅, 何海丹

(中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

**摘要:**以孤立缝隙的理论为基础, 应用仿真技术与数据处理方法综合分析了缝隙和波导参数的误差对缝隙导纳特性的影响。在线阵中根据随机误差分析相关理论, 综合考虑包括缝隙和波导参数在内的多个结构参数的误差对阵列幅相分布影响的不同作用率, 对误差进行了合理的分配。最后以某毫米波频段波导缝隙线阵天线为例进行分析, 并以软件仿真进行验证。

**关键词:**雷达天线; 毫米波频段; 缝隙波导线阵; 随机误差

中图分类号:TN957.2 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2009.05.016

## Random Errors Analysis of Millimeter Wave Band Waveguide Slot Linear Arrays

ZHANG Kuo, LUO Fan, LI Xiu - mei, HE Hai - dan

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** Based on isolated slot theory, simulation technique and data processing method are applied to analyze the effects of slots and waveguide parameter errors on admittance characteristics. According to the related theory of random error analysis in the linear array, the different effect ratios are considered, including the effect of errors of slots and waveguide multi-structural parameters on the amplitude and phase distributions. And the reasonable tolerance distribution is performed. Finally, an example of waveguide slot linear arrays at millimeter wave band is analyzed and validated by the electromagnetic software.

**Key words:** radar antenna; millimeter wave band; waveguide slot line array; random error

### 1 引言

随着雷达、导航与通信的飞速发展, 人们对天线系统提出了更高的要求。具有辐射效率高、功率容量大、口径分布易于控制、易实现超低副瓣、可靠性高、超轻、超薄等电气与结构性能的天线的研究受到了前所未有的重视。而波导缝隙天线正是具有这种性能的天线的首选, 在机载预警雷达、气象雷达、导弹导引头雷达以及各种成像雷达中得到广泛的应用<sup>[1]</sup>。

对于波导缝隙天线来说, 它完全是靠一定精度

的结构尺寸来达到特定的电气性能的结构, 其显著特点在于其试验调整性差, 加工以后, 基本无法更改任何尺寸。尤其在毫米波段, 因为频率高、波长短, 且为了结构紧凑, 不仅无法更改设计尺寸, 甚至没有调试的余地。所以, 我们需要一个较为准确的各部分参数设计方法, 考虑加工、调试各个环节引入的误差, 在设计阶段应用公差分析技术, 结合加工工艺水平, 参考相关数据, 根据设计要求合理分配公差, 对天线的性能有一个正确的估计, 以保证设计质量并节约成本。因此, 对缝隙阵列天线各部分误差进行较为正确的分析是必要的。

\* 收稿日期:2008-12-30; 修回日期:2009-03-25

## 2 误差概述

波导缝隙天线的误差包括系统误差与随机误差两部分<sup>[2]</sup>。系统误差容易在某些角度上形成大副瓣,与天线的性质有关,是有规则的,可以适当校正。随机误差没有规则,由随机因素引起,特别是辐射层的电气、机械的各种随机因素,它使宽角副瓣或平均副瓣抬高。因此,进行天线的结构设计时必须合理地规定天线的系统误差与随机误差,使其控制在一定的范围内。

就目前而言,公开发表的关于毫米波波导缝隙线阵天线公差分析的论文中,其分析方法都是基于概率统计理论,其应用必须满足以下假设条件<sup>[3]</sup>:

- (1)忽略缝隙与波导对幅相的影响作用率;
- (2)各误差满足均值为零,同类误差的分布密度与方差相同,并近似地符合某种分布;
- (3)分析方法不适用于主瓣、栅瓣区域及副瓣区域的零点。

这样,按此分析方法得出的结果与实际结果有较大的误差,且分析结果将对波导缝隙天线的各部件尺寸都将提出同一公差要求。这就带来一些麻烦:如果对所有的尺寸都提出较为严格的公差要求;虽然天线性能能得以保证,但制造就会变得麻烦,成本提高;反之,天线性能又不能得以保证,难于满足应用需要。

因此,针对经典方法的不足,基于概率统计理论,我们研究波导缝隙阵列天线各尺寸参数对阵列性能的影响,探讨各尺寸的临界尺寸参数与公差的关系,根据各尺寸参数对天线性能影响的作用率,对各个参数提出各自合理的公差要求。

## 3 单缝误差分析

波导缝隙阵列天线的设计都是基于孤立缝隙的特性为基础的,孤立缝隙各参数的幅相特性最终影响天线性能方向图。由于单元电流的平方与孤立缝隙的电导成正比,故我们利用电导来等效单元电流以此来分析孤立缝隙的电气特性。

因此,首先必须得到孤立缝隙的散射特性,以此来提取孤立缝隙的归一化导纳特性。宽边纵向缝隙因为其厚度尺寸小、交叉极化小等特性而用作天线辐射层的辐射单元。考虑到阵列天线辐射层最终对天线方向图的影响,本文仅研究宽边纵向缝隙的性能。

工程上经常采用矩量法或传统公式来求得缝隙的导纳。矩量法比较复杂,且如果缝隙形状不规则(例如,考虑加工因素而缝隙两头导圆头),矩量法求解十分困难。常用传统公式如斯蒂文生(A. F. Stevenson)公式,通过它仅仅能够得偏置距离(缝隙中心偏移中心线的距离)、波导宽边、波导窄边与电导之间的近似关系,而不能得到与缝隙宽度、波导壁厚、谐振长度与规一化电导的关系,同时也不能得到所有参数与归一化电纳的关系<sup>[4]</sup>。在毫米波频段,为获得更紧凑的结构,往往采用非标准波导,此时,波导壁厚与波导窄边长度相比拟,这时,波导厚度也成为制约缝隙电性能的主要因素。故传统公式已经不实用了,因此,我们研究一种孤立缝隙的导纳提取技术,通过理论计算与仿真软件相结合的方法提取孤立缝隙的谐振电导。

以工作在毫米波频段的某缝隙为例,我们通过等效电路的理论推断,得出孤立缝隙的归一化导纳理论公式。然后,通过行业标准软件 Ansoft HFSS 软件进行大量仿真,提取单缝导纳参数,并对纵向缝隙的各个参数对性能的影响进行数据统计与分析处理,得到缝隙的谐振长度、电导与偏置距离的拟合曲线,如图 1 和图 2 所示。

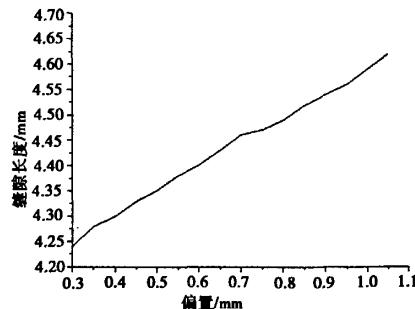


图 1 缝隙长度与偏置关系曲线

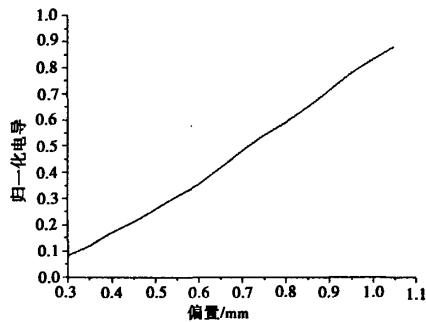


图 2 缝隙归一化电导与偏置关系曲线

通过仿真与数据分析处理,得到波导宽边尺寸  $a$ 、窄边尺寸  $b$ 、缝隙长度  $l_s$ 、宽度  $w_s$ 、偏置  $x_s$ 、波导壁厚  $t$  的误差对单缝导纳的影响如表 1 所示。

表 1 某毫米波频段单缝误差影响

$\Delta l = 0.0012 \lambda$ ( $\lambda$ 为空间波长)	缝隙参数			波导参数		
	长度 $l_s$	宽度 $w_s$	偏置 $x_s$	宽边尺寸 $a$	窄边尺寸 $b$	壁厚 $t$
$\Delta l / \text{mm}$	$\Delta l$					
幅度变化/%	1.9	2.0	3.9	5.8	0.47	0.25
相位变化/(°)	4	17	2.5	7.6	6.2	0.5

对此,设计一正交试验表,得到结构尺寸参数对缝隙电导幅相的作用率,如图 3 所示。从图 3 中可以看到:波导宽边  $a$ 、缝隙偏置  $x_s$ 、缝隙长度  $l_s$  对缝隙电导的幅相影响占主要成分。缝隙偏置距离与波导宽边尺寸主要是影响缝隙导纳幅度的因素,而波导宽边尺寸与缝隙长度则主要是影响缝隙导纳相位的因素。这 3 个参数所占权重比例较大,故其应该有最严格的公差要求。而波导宽边  $b$ 、缝隙宽度  $w_s$ 、波导厚度  $t$  相应的公差要求较为宽松。

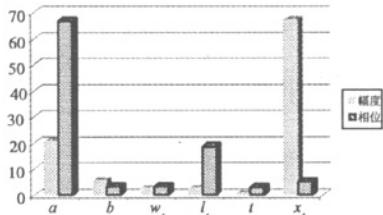


图 3 结构尺寸参数对缝隙电导幅相的作用率

#### 4 线阵随机误差分析和仿真结果

由于毫米波缝隙阵天线的电性能对结构的加工误差特别敏感,尤其加工误差对副瓣电平的影响特别大,本文中,我们只考虑辐射层公差对天线方向图副瓣电平的影响情况,其它参数的影响我们将在今后的研究中进一步分析。

现有的阵列天线随机误差分析方法大多是运用统计理论,从无误差的理想方向图出发,根据公差的统计特性找到误差方向图的统计规律<sup>[5]</sup>。它的缺点是只能对整个天线提出同一公差要求,不能分别对不同重要程度的参数提出不同的公差。这种方法提出的公差假设激励电流的振幅与相位的均方差相等,具有一定的局限性。

在此,我们提出,根据缝隙和波导结构尺寸不同参数对孤立缝隙导纳幅相影响的不同规律和作用率,对结构参数的误差进行合理的分配,对影响天线性能较大的参数提出严格的公差要求,而对影响天线性能较小的参数的公差要求可以适当放宽。在保证天线电性能的同时,也部分降低了天线对结构加工要求的难度。

以某毫米波频段 36 元线阵为例,采用 Taylor 分布,设计的最大旁瓣电平为 -28 dB,等线源抽样。仿真得到的最大旁瓣电平为 -27.6 dB。

假设误差在线阵上满足随机分布,且其抬高副瓣电平最大不超过 3 dB。根据图 2 所示的结构尺寸参数对缝隙电导幅相的作用率与表 1 所示的结构尺寸参数对缝隙电导幅相影响的程度,推导出天线单元上电流幅相分布的均方根误差。最终,我们推导出如表 2 所示的加工误差。

表 2 某毫米波频段线阵天线加工误差

$\Delta l = 0.0012 \lambda$ ( $\lambda$ 为空间波长)	缝隙参数			波导参数		
	长度 $l_s$	宽度 $w_s$	偏置 $x_s$	宽边尺寸 $a$	窄边尺寸 $b$	壁厚 $t$
$\Delta l / \text{mm}$	$\pm 1.5 \Delta l$	$\pm 1.5 \Delta l$	$\pm \Delta l$	$\Delta l$	$\pm 2 \Delta l$	$\pm 2 \Delta l$

这与运用现有随机误差分析方法的计算结果(假设允许的最大副瓣抬高不超过 3 dB 的概率为 90%,幅度分布误差均方根值  $\sigma_i = 0.0091$ ,相位分布误差均方根值  $\sigma_\phi = 5.2^\circ$ )较为一致。

同时,我们应用 HFSS11.0 软件进行仿真,天线有误差、无误差的方向图如图 4~6 所示。其中,图 5 所示的缝隙偏置误差,是指缝隙偏置误差为  $\Delta l$  之间的随机数。波导宽边误差 + 缝隙偏置误差,是指

缝隙偏置误差为 $\pm \Delta l$ 之间的随机数与波导宽边误差为 $\Delta l$ 。图6所示的最大误差,是指波导尺寸与缝隙参数为公差最大值,即波导宽边与偏置误差为 $\Delta l$ 、缝隙长度与宽度误差为 $1.5\Delta l$ ,波导窄边与壁厚误差为 $2\Delta l$ ;随机误差是指波导宽边与偏置为 $\pm \Delta l$ 的随机数、缝隙长度与宽度为 $\pm 1.5\Delta l$ 的随机数,波导窄边与壁厚为 $\pm 2\Delta l$ 的随机数。

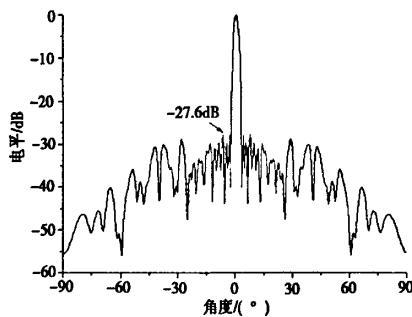


图4 无误差方向图

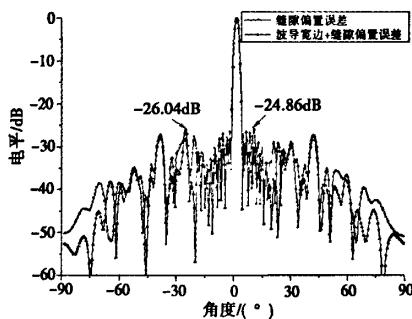


图5 缝隙偏置误差

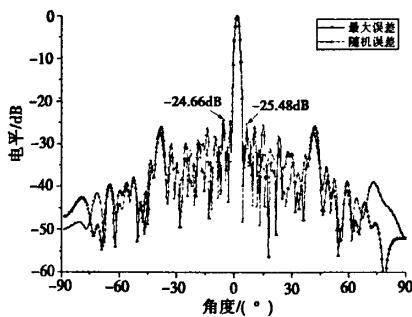


图6 最大误差与随机误差方向图

由图可见,仿真结果与理论结果分析较一致,旁瓣电平不超过3 dB,证明这种公差分析技术有效可行。

## 5 结论

本文由孤立缝隙的导纳特性入手,分析孤立缝隙的各参数对天线性能的影响,得出各参数对缝隙电导的作用率关系模型,再由天线阵列原理推导出公差对波导缝隙线阵天线的方向图的影响。根据波导尺寸与缝隙各个参数对天线性能的作用率不同,对各个参数提出不同的公差要求,在保证天线性能的前提下,降低公差要求。该分析方法与经典分析方法相比,不需要随机误差满足几个假设条件,且应用区域不再仅仅限于排除零点的副瓣区域。给出HFSS验证的仿真结果表明,这种公差分析技术对于线阵辐射层分析是行之有效的。在今后的工作中,我们将进行耦合层、馈电网络与面阵的公差分析研究。

## 参考文献:

- [1] Josefsson L G. Analysis of longitudinal slots in rectangular waveguides[J]. IEEE Trans. Antennas and propagation, 1987, 35:1351-1357.
- [2] 向广志. 超低副瓣阵列天线的公差分析[J]. 现代雷达, 1996(12):39-48.
- [3] Jahagirdar D R. Effects of tolerances on sidelobe levels in slotted waveguide arrays[J]. IEEE Trans. Antennas and propagation, 2004, 28:1351-1357.
- [4] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京:电子工业出版社, 2002:273-278.
- [5] 钟顺时. 随机误差对线阵天线性能的影响[J]. 西北电讯工程学院学报, 1975(1):77-98.

## 作者简介:

张 阔(1981-) ,男,四川德阳人,助理工程师,主要研究方向为毫米波波导缝隙阵列天线;

Email: scuzk@yahoo.com.cn

罗 凡(1978-) ,女,重庆人,工程师,主要研究方向为毫米波波导缝隙阵列天线;

Email: lf\_1228@163.com

李秀梅(1976-) ,女,湖北潜江人,工程师,主要研究方向为毫米波波导缝隙阵列天线、阵列天线、反射面天线;

Email: xichub@163.com

何海丹(1970-) ,男,四川泸州人,高级工程师,主要研究方向为阵列天线、共形天线。

Email: hehd@swiet.com.cn

## 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>