

超宽带双脊喇叭天线的设计

翁呈祥,高玉良,许明,廖伟,蒯美青

(空军雷达学院 雷达对抗研究中心,湖北 武汉 430019)

摘要:该文基于喇叭天线的基本理论,研究了影响喇叭天线截止频率的因素,确定了双脊喇叭天线的基本尺寸,最后利用 HFSS 软件进行喇叭天线的建模仿真优化,确定了 6~18 GHz 超宽带双脊喇叭天线的最终尺寸。仿真数据和测试结果吻合的很好,在整个频率范围内增益大于 $G>10$ dB,驻波比小于 $VSWR<1.6$,它的主波束在整个频段几乎没有分裂,现已应用于电子对抗领域。

关键词:超宽带;双脊喇叭天线;方向图

中图分类号:TN95 **文献标识码:**A

Design of UWB Double-ridged Horn Antenna

WENG Chengxiang, GAO Yuliang, XU Ming, LIAO Wei, LING Meiqing

(Radar Countermeasures Research Center, Air Force Radar Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: The factors of influencing the cut-off frequency of the horn antenna have been studied based on the basic theory of the horn antenna in this paper. The size of the double-ridge antenna has been identified. The modeling and optimization of the horn antenna have been carried out by using the HFSS software, thus the final dimension of a UWB double-ridge horn antenna with 6~18 GHz frequency has been determined. The simulation results are in good agreement with the measured ones. The antenna has the features of the gain G of greater than 10 dB and the voltage standing wave ratio (VSWR) of less than 1.6 over the whole frequency range. It almost maintains a single main lobe over the full frequency range. The fabricated antenna now has been applied to the electronic countermeasures (ECM).

Key words: ultra-wide band (UWB); double-ridged horn antenna; radiation pattern

0 引言

普通喇叭天线具有结构简单,功率容量大和增益高的特点,在微波测量系统中被大量的用作标准测量天线。随着宽带射频技术、雷达技术的发展及电子对抗环境日益复杂,喇叭天线要求覆盖的频带范围达到更高的倍频程,而普通喇叭天线相对带宽较窄^[1]。本文根据宽带波导理论设计了宽带加脊喇叭天线,设计了频率为 6~18 GHz 的宽带双脊喇叭天线,在整个频段内驻波比 $VSWR<1.6$,波束宽度 $<60^\circ$,增益大于 10 dB,主波束从 6~18 GHz 没有出现大的凹陷,测试结果较理想,可满足更高的工程要求,现已将研制的喇叭天线应用于电子对抗领域,效果较好。

1 超宽带双脊喇叭天线设计

喇叭天线是由开口波导逐渐张开形成,其主模传输的频率范围受波导尺寸的限制。对于宽边尺寸为 a 的矩形波导主模式 TE_{10} 单模传输,其工作波长 λ 必须满足 $a < \lambda < 2a$ 。由此可见,上限频率和下限

频率 $f_u/f_l < 2^{[2]}$ 。本文采用波导段加脊、喇叭段以指数形式张开的方式展宽频带。图 1 为加脊喇叭天线的结构。由激励段、脊波导段、加脊喇叭段组成。

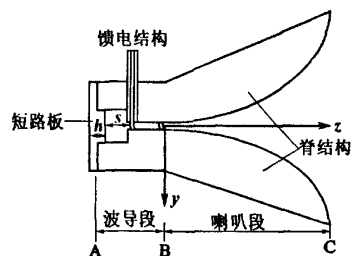


图 1 宽带双脊喇叭天线构成

1.1 馈电结构设计

激励段激励采用同轴-脊波导变换器,普通波导的阻抗远大于同轴线的阻抗,所以内导体必须深入波导内远离波导壁的地方,以防止失配;而脊波导的阻抗与同轴线的阻抗一致,要求同轴线的外导体连接在脊波导的宽边上,内导体延伸至相对的脊壁上,形成单极辐射器。设计时在直波导后端增加短路

收稿日期:2010-04-28

作者简介:翁呈祥(1983-),男,助教,硕士生,主要研究方向为微波 T-R 组件设计。

板,形成后腔,其馈电方式和截面图如图1所示。调节激励端与短路板的距离和短路段的脊高,对展宽变换的带宽起很大作用。从短路板到馈电处这一段是直波导,其作用是滤除波导内的 TE_{20} 模,因此脊波导的带宽为 $w = \lambda_{CTE10}/\lambda_{CTE30}, \lambda_{CTE10}$ 和 λ_{CTE30} 可从文献[3-4]中的曲线查得,脊波导的长度应小于最高工作频率波长的一半。

1.2 波导段设计

普通波导的频带不宽,文中使用脊波导结构展宽频带,由于脊边缘电容的作用,主模的截止频率比不加脊的波导要低,而次主模的截止频率却比不加脊的波导高,使得脊波导的单一模带宽可达几个倍频程。脊的高度越低,主模的截止频率越低,等效阻抗也越低。脊波导部分的横截面示意图如图2所示,波导的横截面尺寸为 $a \times b$,脊宽为 a_1 ,脊间距为 b_1 。根据 TE_{10} 主模分布的特点,可画出脊波导的集总参数等效电路如图3所示^[5-7]。

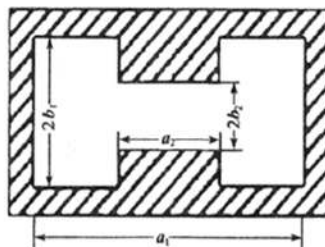


图2 脊波导横截面

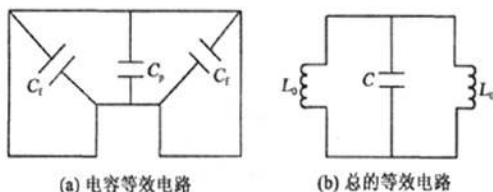


图3 脊波导的集总参数

由图3可看出,等效电容包括电场集中凸缘部分所形成的平板电容 C_p 和电场不均的棱角处所形成的边缘电容 C_l 两部分。在磁场集中的脊棱两侧,单位长度的电感均为 L_0 。由等效电路得 $C_p = \epsilon a_2/b_2$, ϵ 为脊波导中填充介质的介电常数。

棱角处的边缘电容为

$$C_l = \frac{\epsilon}{\pi} \left[\frac{x^2+1}{x} \ln \left(\frac{1+x}{1-x} \right) - 2 \ln \left(\frac{4x}{1-x^2} \right) \right] \quad (1)$$

单位长度的等效总电感

$$L = \frac{L_0}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu(a_1-a_2)b_1}{2} \quad (2)$$

式中: $x = b_2/b_1$; μ 为磁介电常数; $C = C_p + 2C_l$ 为单位长度的总电容。

由此可求出截止频率

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} = \frac{1}{\pi \sqrt{\mu \epsilon \left(\frac{a_2}{b_2} + \frac{2C_l}{\epsilon} \right) \cdot (a_1 - a_2) \cdot b_1}} \quad (3)$$

在设计时,首先确定 $b_2/a_2, b_1/b_2, a_1/a_2$ 的值,及频率为无穷大时 TE_{10} 模的特性阻抗 $z_{0\infty}$ 的值,则在给定工作频率 f 下的特性阻抗为^[7-10]

$$z_{0\infty} = \frac{240\pi}{\frac{a_2}{b_2} + \frac{2C_l}{\epsilon} + \frac{a_1}{2b_1} \cdot \left(1 - \frac{a_2}{a_1} \right)} \quad (4)$$

$$z_0 = z_{0\infty} \sqrt{1 - (f_c/f)^2} \quad (5)$$

1.3 喇叭段设计

喇叭张开的部分设计与常规喇叭相似,为使馈电点阻抗能平滑过渡到喇叭口自由空间阻抗,则喇叭段的阻抗为

$$z_0 = \begin{cases} z_{0\infty} e^{kz} & (0 \leq z \leq l/2) \\ 377 + z_{0\infty} (1 - e^{k(l-z)}) & (l/2 \leq z \leq l) \end{cases} \quad (6)$$

式中: l 为喇叭段的长度; k 是常数,它可由喇叭中点的阻抗为两端阻抗的平均值这一条件来确定,因此喇叭段脊体曲线一般为指数形式,但喇叭口径面上不是等相位面,要使边缘处场与中心处场的相位差不大,常将喇叭加长或加透镜校准,但都有局限性。本文采用在脊上附加一线性项,该法不但可拓宽频带,且缩短了喇叭段的轴长。喇叭段脊体曲线为

$$y(z) = A \cdot e^{kz} + c \cdot z \quad (7)$$

在求解脊曲线方程时,为了避免复杂的数学求解过程,可将喇叭口面看作为空气波阻抗,并把它当作负载,喇叭段作为馈源和负载之间的阻抗转换器,脊起到阻抗匹配的作用。喇叭的起点和终点坐标已知,可联立式(5)、(7)得2个关于未知系数的方程;且喇叭 $l/2$ 处的阻抗 $Z_{l/2} = 213.5 (\Omega)$,代入式(6)求出未知系数,最后确定喇叭段脊体的曲线方程。

本文使用金属材料为相对介电常数 $\epsilon_r = 1$, 相对磁导率 $\mu_r = 1.000021$ 的铝金属。通过上述分析、计算初步确定了一副工作于 6~18 GHz 双脊喇叭天线的几何尺寸,然后利用仿真软件 HFSS 建模仿真,模型如图4所示。

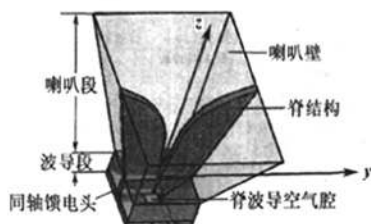


图4 仿真结构图

在仿真优化、实验测试的过程中发现,采用加脊的扩频方法在较宽频带范围的高频端会出现增益 G 下降、主波束出现分裂恶化的现象,且随着频率的升高,主瓣凹陷越厉害。这对方向性要求高的场合,将不能满足要求。所以本文除采用加脊法,还在 2 个窄壁面上加 2 个楔体,改善馈电段到喇叭段的匹配,让其横截面尺寸逐渐增大,使这部分整体结构设计成一个 E 面的扇形喇叭。另外还通过优化短路板的嵌入长度,改变金属套的伸出长度等方法对天线方向图进行优化,最后确定喇叭口面宽、高分别为 130 mm、69 mm;波导底面宽、高分别为 24 mm、14 mm;短路板嵌入波导内的截面宽、高分别为 22 mm、12 mm;短路板的嵌入长度为 3 mm;短路板到探针的距离为 11 mm;波导段长度为 57 mm;喇叭的轴向长度为 110 mm,用 50 Ω 同轴线馈电, N 型接头的探针半径为 0.6 mm,脊体内腔体半径为 1.5 mm;喇叭段脊体曲线方程为

$$Y = e^{0.03x} + 0.01x \quad (8)$$

喇叭天线实物如图 5 所示,其测试结果较理想,如图 6 所示,在整个频段驻波比 $VSWR < 1.6$ 。图 7~9 分别为 6 GHz、12 GHz、18 GHz 时的方向图。由图可看出,波束宽度 $< 60^\circ$,整个频段内的 $G > 10$ dB, 6~18 GHz 内主波束未出现大的凹陷。

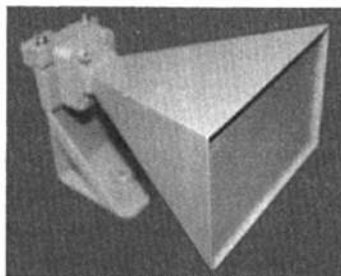


图 5 喇叭天线实物图

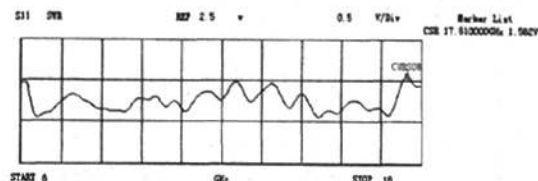


图 6 驻波比仿真图

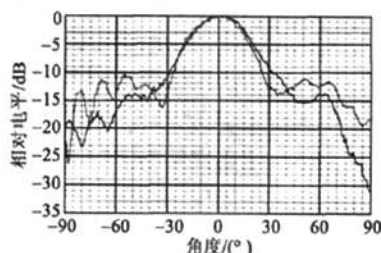


图 7 6 GHz 时的 E、H 面方向图

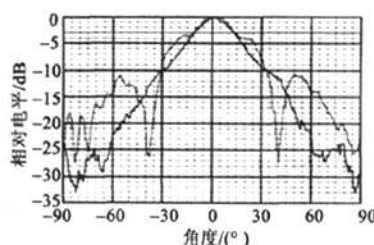


图 8 12 GHz 时的 E、H 面方向图

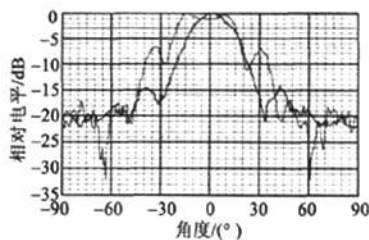


图 9 18 GHz 时的 E、H 面方向图

2 结束语

本文给出了一个宽带双脊喇叭天线的设计方法,并利用电磁仿真软件 HFSS 具体设计了一幅 6~18 GHz 宽带双脊喇叭天线,测量结果较为理想,现已将研制的喇叭天线应用于电子对抗领域,具有较好作战的效果。

参考文献:

- [1] 刘密歌. 超宽带双脊喇叭天线的研究与设计[D]. 西安:西北工业大学, 2007.
- [2] KERR JOHN L. Short axial length broadband horn [J]. IEEE Trans Antenna and Propagation, 1973, 21: 710-714.
- [3] WALTON K L, SUNDBERG V C. Broadband ridged horn design [J]. Microwave Journal, 1964: 96-101.
- [4] BRUNSC, LEUCHTMANN P, VAHLDECK R. Analysis and simulation of a 1~18 GHz broadband double-ridged horn antenna [J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2003, 45: 55-60.
- [5] 刘伟. 超宽带双脊喇叭天线的设计与分析[D]. 西安:西安理工大学, 2008.
- [6] 吴群. 内嵌异向介质平板透镜型喇叭天线特性研究[J]. 电波科学学报, 2008, 23(1): 49-54.
- [7] 周蔚红. 时域 TEM 喇叭天线的分析和设计[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(4): 59-62.
- [8] NGUYEN C, LEE J S, PARK J S. Ultra-wideband microstrip quasi-horn antenna [J]. Electronic Letters, 2001, 37(12): 731-732.
- [9] 李育红. 一种新颖的超宽带楔形微带准喇叭天线设计[J]. 电路与系统学报, 2007, 12(1): 645-651.
- [10] 刘密歌. 基于 HFSS 的双脊喇叭天线的设计与仿真[J]. 电子测量技术, 2007, 30(7): 142-145.

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，一直致力和专注于微波、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>