

文章编号: 1672-2892(2011)02-0180-05

## 宽带双极化四脊圆喇叭天线的分析与设计

李彬<sup>1</sup>, 杨勇<sup>2</sup>

(1.海军驻宜宾地区航空军事代表室, 四川 宜宾 644007; 2.中航工业雷达与电子设备研究院, 四川 内江 641000)

**摘要:** 基于航空电子系统射频综合实验室的需求, 应用圆锥喇叭天线的传输原理和宽频带波导的匹配特性, 研制了一种宽带双极化四脊圆喇叭天线。对其工作原理、性能及电气结构进行了分析与设计, 实际制作了一批宽带双极化四脊圆喇叭天线并对其进行了调试, 电性能参数优良, 实测结果与设计基本一致: 此天线在 C, X, Ku 波段内具有大于 3 倍频程的宽带匹配特性, 相当高的交叉极化隔离度( $B > 22$  dB)和高的增益(10 dB~20 dB)。结果表明该方法是正确和有效的。

**关键词:** 宽频带匹配; 四脊圆喇叭天线; 隔离度; 驻波

**中图分类号:** TN821<sup>+</sup>.1

**文献标识码:** A

## Analysis and design of broadband dual-polarized quadruple-ridged circular horn antenna

LI Bin<sup>1</sup>, YANG Yong<sup>2</sup>

(1. Aviation Military Representative Room of the Navy in Yibin area, Yibin Sichuan 644007, China;

2. China Aviation Industry Institute of Radar and Electronic Equipment, Neijiang Sichuan 641000, China)

**Abstract:** Based on the needs of the RF integrated laboratory in avionics system, one kind of broadband dual-polarized quadruple-ridged circular horn antenna was developed according to the transmission principle of conical horn antenna and the matching characteristics of broadband waveguide. Its working principle, performance and electrical structure were analyzed and designed. Through actual fabricating and testing of the antenna, excellent electric performance parameters were obtained. The measured results were basically consistent with the design. The antenna possessed more than 3 octave broadband matching characteristics in C, X, Ku band, also a very high cross-polarization isolation ( $B > 22$  dB) and a high gain (10 dB~20 dB). It is demonstrated that the proposed method is correct and effective.

**Key words:** broadband matching; quadruple-ridged circular horn antenna; isolation; standing wave

航空电子系统射频综合实验室是由 1 个微波暗室和 1 个系列的天线微波电子仪器设备装备而成的实验中心。其中仿真目标模拟天线阵是由上千个具有宽带和双极化特性的喇叭天线组成。这些喇叭天线是组成仿真阵的基本单元, 它的性能好坏, 直接影响整个仿真的精确度。通常矩形喇叭天线<sup>[1]</sup>阻抗变换范围小, 带宽窄, 且为了截止高次模, 喇叭开口波导的尺寸有一定的限度。为了确保射频仿真的精确度, 本文研制了 1 种宽带双极化四脊圆喇叭天线, 这种喇叭天线满足在 C, X 及 Ku 波段上工作的宽频带和双极化要求, 具有较高的隔离度和增益, 而且体积小, 重量轻, 装配调试方便, 批生产一致性良好。国内外对宽带双极化四脊圆喇叭天线的极化和传输特性进行了分析和设计<sup>[2]</sup>, 但对天线的脊片和输入连接器未做详细介绍。本文采用理论分析和实验调试相结合的方法, 详细描述了宽带双极化四脊圆喇叭天线的实现过程。

### 1 宽带双极化四脊圆喇叭天线的工作原理

当微波信号从喇叭天线的 SMA 输入端口 A 和 B 输入后, 经过探针激励起互相正交的  $TE_{11}$  最低工作模式, 其中一部份向喇叭口方向传播, 一部份向锥形短路器 4 传送, 经短路反射回来再与激励波叠加向口面传送, 形成口面正交的辐射场向空间辐射。在激励口, 信号经过相移器后形成左旋及右旋的圆极化波。反之, 此天线也可接

收圆极化波,然后分解成水平极化和垂直极化波从相应端口输出。由于此天线能在很宽的频带范围内(6 GHz~18 GHz)同时激励并传输2个互相正交的线极化波,并快速改变极化状态(即从水平极化变为垂直极化),2种极化不互相干扰,隔离度高,故称双极化天线,如图1所示。图中:1表示锥体喇叭;2表示激励圆波导;3表示脊片;4表示锥形短路器和固定法兰盘;5表示激励探针;6表示SMA座;7表示SMA座;8表示输入端口A;9表示输入端口B;10表示连接脊片与锥体喇叭的固定螺钉。

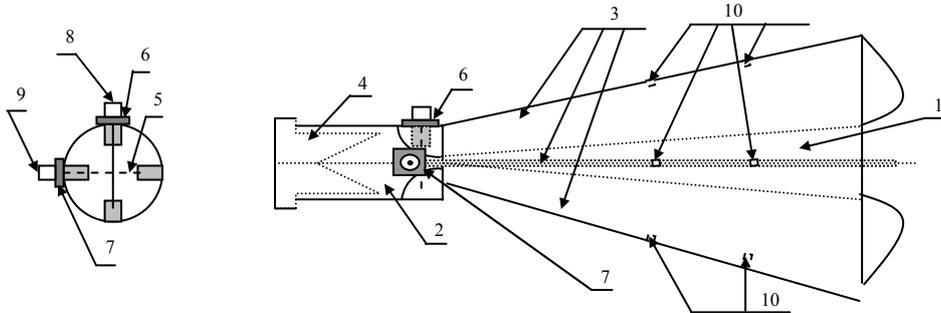


Fig.1 Broadband dual-polarized quadruple-ridged circular horn antenna  
图1 宽带双极化四脊圆喇叭天线

可使用和矩形喇叭相同的口径场法来分析圆锥喇叭天线的口径场<sup>[3-5]</sup>。波导中的传播波型决定了口径上的振幅分布,因此首先应研究圆波导内应建立什么样的传播工作模式,当选取以最低主模 TE<sub>11</sub> 来激励圆锥喇叭时,则应根据该模式的临界波长来选取适合的波导尺寸,对 TE<sub>11</sub> 波型,它的临界波长为:

$$\lambda_c = \frac{2\pi r}{\mu_{11}} = 3.41r \tag{1}$$

式中:λ<sub>c</sub>为截止波长;r是圆波导半径;μ<sub>11</sub>是m=1,n=1时贝塞尔函数导数的根,μ<sub>11</sub>=1.841。

当工作波长λ<3.41r时,TE<sub>11</sub>波能在圆波导内传播,否则会截止。

由于圆锥喇叭的母线馈电波导汇集在一点(如图2所示),且设这一点是向口径辐射的点源,它发出的波是1个球面波,口径面上的相位分布近似为平方相差,可用1个参变量S表示。

$$S = \frac{A}{\lambda} = \frac{a^2}{2\lambda R} \tag{2}$$

式中:a是喇叭口径半径;R是喇叭斜径;λ是工作波长;A是喇叭口面边缘与中心的相位滞后弧度。

式(2)表示平方相差与喇叭的几何尺寸及工作频率间的关系。不同的S决定喇叭面上不同的辐射场方向图,当给出口径半径a,通过参变量给出辐射方向图曲线,则可得出相应的E面和H面的各种参数,如增益、主瓣宽度等。

由此看出,当R不变时,张角增大,口径尺寸增大,此时方向系数增加,但增至最大值后,又开始减小,这是因为口径尺寸增大时,平方相差也在增大,使方向系数降低。当喇叭口径不变而喇叭长度L增加时,方向系数将增加,使主瓣宽度变窄。

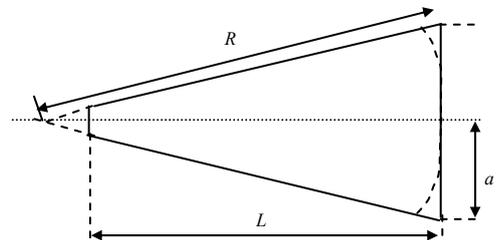


Fig.2 Conical horn antenna  
图2 圆锥喇叭天线

## 2 宽带双极化四脊圆喇叭天线的设计分析

### 2.1 圆波导激励口径尺寸的设计

由于双极化圆锥喇叭天线工作在6 GHz~18 GHz频率范围内,且有足够的增益及主瓣宽度,因此对应频率的工作波长λ<sub>L</sub>=50 mm,λ<sub>H</sub>=16.7 mm,k=λ<sub>L</sub>/λ<sub>H</sub>=3倍频程。

当选用TE<sub>11</sub>模为圆波导内传播工作最低模式时,电磁波在圆波导内传播时既不被截止,又不产生高次模的条件是:

$$2.62r < \lambda < 3.41r \tag{3}$$

设计时选用中心频率来计算:f<sub>0</sub>=12 GHz,λ<sub>0</sub>=25 mm。

由式(3)得:r>7.3 mm。

为保证低频能工作, 只有使用脊波导理论来展宽频带, 降低截止频率。由脊波导曲线<sup>[6]</sup>得知  $S/2r$  和  $d/2r$  决定倍频率大小, 当  $k=3$  时, 可取  $S/2r=0.3, d/2r=0.1$ , 在中心频率  $\lambda_0=25$  mm,  $r>7.3 \times \sqrt{3}=12.64$  mm, 取  $r=13$  mm, 圆波导直径  $D=26$  mm。

## 2.2 圆锥喇叭天线辐射口径尺寸的设计

通过圆锥喇叭在  $TE_{11}$  波下的口径辐射方向图, 便可求得它的主瓣宽度  $2\theta_{0.5}$  及增益等参数。反之也可通过已给出的  $2\theta_{0.5}$  及增益指标要求来确定喇叭的有关尺寸。

$$G = 20 \log \left( \frac{\pi H}{\lambda} \right) - GF \quad (4)$$

式中:  $G$  是喇叭增益;  $H$  是喇叭口径直径;  $GF$  是天线损耗。

对于  $f_0=12$  GHz,  $\lambda_0=25$  mm, 当  $2\theta_{0.5}=27^\circ$ , 从微波工程手册<sup>[7]</sup>查得  $S=0.58, GF=5.63$  dB,

由式(4)得:  $H = \frac{\lambda}{\pi} 10^{(G+GF)/20}$ 。当  $G=16$  dB 时, 计算出  $H=96$  mm, 取  $H=100$  mm。

## 2.3 喇叭天线长度尺寸的设计

由于圆锥喇叭天线可视为一个顶点向口面辐射的点源, 则在口径面上向外辐射的是球面波, 口径边缘的场强相位比中心场强相位滞后, 存在最大相差为:

$$\phi_{\Delta \max} = \pi H^2 / 4\lambda R \quad (5)$$

为保证在中心频率能具有最佳的口面辐射方向图, 要求  $\phi_{\Delta \max}$  在  $(1/2 \sim 3/4)\pi$  内, 当  $\phi_{\Delta \max} = \pi/2$ , 且激励探针与激励波导的短路板距离为  $\lambda/2$  时, 可近似取  $L \approx R = 2H^2 / 4\lambda = 200$  mm。

## 2.4 正交极化器的设计分析

正交极化器是 2 个 SMA 型接头、2 个激励探针、四脊片、锥形短路器和固定法兰盘组合而成, 其被装入激励圆波导和锥形喇叭中的结构如图 1 所示。

2 个 SMA 型接头 6,7 正交地被安装在激励圆波导上, 其内导体与 2 个互相垂直的激励探针 5 相连接, 而探针又相互垂直插入对应的 4 个脊片中。在激励波导中, 加上锥形短路器构成正交极化器。

由 2 个互相垂直的激励探针在圆波导内激励出 2 个互相垂直的正交极化波, 它们的场分布如图 3 所示。这种极化方式的特点是频带宽, 交叉极化低, 隔离度高, 且体积小, 重量轻。

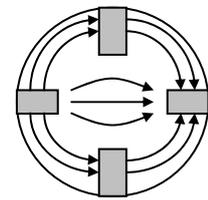


Fig.3 Field distribution of incentive  $TE_{11}$   
图 3 激励  $TE_{11}$  场分布

## 2.5 SMA 型输入连接器的分析

喇叭天线上使用了 2 个 SMA 型同轴接头及激励探针作正交输入连接器, SMA 接头采用国际标准, 具有良好的宽频带匹配特性, 损耗低, 体积小。

2 个 SMA 座是相互垂直地安装在圆波导的  $H$  面和  $E$  面输入口上, 它的内导体与直接插入到 2 对脊片内部的激励探针相连接, 构成互相垂直的正交极化器的一部份, 通过 2 个 SMA 输入信号, 在正交探针上对圆锥喇叭激励产生  $H$  面及  $E$  面的双极化电磁场波向喇叭口面传输, 并向空间辐射。SMA 探针的性能好坏直接影响匹配效果及激励信号的大小。本文对探针的大小、长短及与 SMA 座连接匹配特性均作了专门研究, 进行了适当设计, 使之性能最佳。

## 2.6 脊片形状尺寸设计

脊片是构成正交极化器及脊锥喇叭的关键部件, 为了展宽频带<sup>[8]</sup>, 保证在整个频段内具有良好的匹配特性, 并在较低的频率也能得以传输, 脊片将起到匹配和扩展波导有效内径的作用。喇叭的输入阻抗较低, 而自由空间的阻抗较高, 从喇叭激励到向空间辐射是一个低阻到高阻的变化过程, 脊片的渐变形状就起到信号传输时的阻抗匹配过渡作用, 使得喇叭在有很小反射的同时, 就能向空间辐射足够的能量。2 对脊片除了保证互相垂直安装外, 脊片的渐变对匹配特性影响也很大, 它可以是直线与圆弧、指数曲线、切比雪夫曲线等连接形式, 如图 4 所示。

从微波工程手册中给出脊线方程如下:

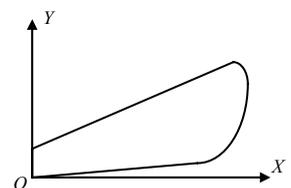


Fig.4 Ridge piece  
图 4 脊片

$$y = F10^{Kx} + mx + n \tag{6}$$

式中:  $F, K, m, n$  均是常数;  $m$  由试验确定取值范围在 0.005~0.05 之间;  $y$  是喇叭中心线到脊线面的距离;  $x$  是轴向距离。

### 3 宽带双极化四脊圆喇叭天线的电调实验

#### 3.1 SMA 型输入连接器同轴接头及探针结构尺寸的选择实验

同轴接头选用国际标准的 SMA-50KFD 型输入接头。探针则选用由弹性铜合金材料组成的金属杆, 探针与同轴接头内导体连成整体, 根据阻抗匹配原理<sup>[9]</sup>, 在过渡段采用了特殊匹配介质, 如图 5 所示。图中:  $J$  表示探针长度;  $d$  表示探针直径;  $M$  表示介质匹配段大小;  $\delta$  表示介质匹配段厚度;  $C$  表示同轴内导体直径。

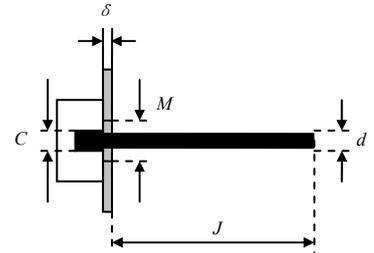


Fig.5 SMA input connector  
图5 SMA 输入连接器

在选定标准 SMA 同轴接头后, 采用不同长短、大小的探针尺寸及匹配段介质尺寸, 经过多次实验, 其实验结果如表 1 所示。

根据实验结果, 本文选用如下尺寸范围来实现输入连接器的要求:  $C=0.8\text{ mm}\sim 1.3\text{ mm}$ ;  $M=1\text{ mm}\sim 1.6\text{ mm}$ ;  $\delta=0.5\text{ mm}\sim 0.9\text{ mm}$ ;  $J=30\text{ mm}\sim 33\text{ mm}$ ;  $d=0.2\text{ mm}\sim 0.7\text{ mm}$ 。

表1 SMA 输入连接器尺寸选择

	$C/\text{mm}$	$M/\text{mm}$	$\delta/\text{mm}$	$J/\text{mm}$	$d/\text{mm}$	bandwidth
1	1.0	1.0	0.5	30	0.2	83%
2	1.2	1.5	0.8	32	0.5	98%
3	1.5	2.0	1.0	34	0.7	73%
4	2.0	2.5	1.2	36	0.8	52%

#### 3.2 对脊片的形状选择调试

脊片的厚度  $P$  从 3 mm, 3.5 mm, 4 mm, 4.5 mm 等尺寸中选择, 脊片的曲线形状由脊锥曲线方程(6)确定。当曲线方程中的常数  $m, n, F, K$  取不同的值时, 将得到不同曲线形状, 对不同曲线形状<sup>[10]</sup>的脊片, 调试喇叭天线的电气性能, 实验结果如表 2 所示。

表2 脊片形状尺寸选择

	$P/\text{mm}$	$m/\text{mm}$	$n/\text{mm}$	$F/\text{mm}$	$K/\text{mm}$	bandwidth
1	4.0	0.005	0.5	0.01	0.01	71%
2	3.5	0.010	0.6	0.02	0.02	96%
3	3.0	0.050	0.8	0.03	0.03	62%

根据实验结果, 选第 2 组为脊片形状尺寸, 进行批量加工。

#### 3.3 宽带匹配特性调试结果

通过对喇叭脊片位置微调及选择 SMA 探针, 从  $n$  个喇叭中抽取编号为 4-32 的喇叭天线在网络分析仪上进行调试, 测出喇叭天线两正交输入口 A, B 的驻波及 A, B 口之间的隔离度, 如表 3 所示。

表3 驻波及隔离特性

	$f/\text{GHz}$				
	6	9	12	15	18
standing wave $\rho_A$	1.3	2.0	1.1	1.3	1.4
standing wave $\rho_B$	1.20	1.20	1.50	1.05	2.00
A-B isolation/dB	31	32	35	35	40

#### 3.4 天线方向图参数测试结果

在微波暗室, 将被测喇叭固定在转台上, 接收发射信号, 测出方向图后, 得交叉极化、主瓣宽度、增益测试结果如表 4 所示, 表中:  $2\theta_{0.5H}$  为喇叭天线  $H$  面主瓣宽度;  $2\theta_{0.5E}$  为喇叭天线  $E$  面主瓣宽度。

表4 天线方向图参数测试结果

		$f/\text{GHz}$				
		6	9	12	15	18
cross-polarization isolation	A/dB	23.7	29.5	38.8	33.7	22.3
	B/dB	37.7	25.5	35.6	33.3	28.8
3dB mainlobe width	$2\theta_{0.5H}/(^{\circ})$	30.8	32.0	28.4	19.6	14.4
	$2\theta_{0.5E}/(^{\circ})$	47.4	32.3	27.2	30.7	19.2
G/dB		10.4	13.9	17.1	17.7	20.6

## 4 结论

本文基于圆锥喇叭天线的传输原理和宽带波导的匹配特性, 介绍了一种宽带双极化四脊圆喇叭天线设计方法, 从实验结果可以看出, 全部性能指标均满足设计要求, 证明这种方法是可行的, 同样也证明, 脊片的渐变过渡及输入连接器的阻抗匹配可有效提高天线的增益、驻波等电气性能。为了进一步拓展天线带宽特性和提高天线的电气性能, 下一步可采用优化设计和仿真实验, 来完善天线设计。

### 参考文献:

[1] 殷际杰. 微波技术与天线[M]. 北京:电子工业出版社, 2009. (YIN Jijie. Microwave Technology and Antenna[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.)

- [ 2 ] Constantine A Balanis. Antenna Theory:Analysis and Design[M]. 3<sup>rd</sup> ed. USA:Wiley-Interscience, 2005.
- [ 3 ] 林昌禄,陈海,吴为公. 近代天线设计[M]. 北京:人民邮电出版社, 1990. (LIN Changlu,CHEN Hai,WU Weigong. Modern Antenna Design[M]. Beijing:Posts & Telecommunications Press, 1990.)
- [ 4 ] 康行健. 天线原理与设计[M]. 北京:国防工业出版社, 1995. (KANG Xingjian. Antenna Principle and Design[M]. Beijing:National Defence Industry Press, 1995.)
- [ 5 ] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京:电子工业出版社, 2002. (LIN Changlu. The Handbook of Antenna Engineering[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2002.)
- [ 6 ] 姚若元. 脊波导喇叭天线的分析[D]. 内江:中航雷达与电子设备研究院, 2003. (YAO Ruoyuan. Analysis of Ridged Waveguide Horn Antenna[D]. Neijiang,Sichuan:China Aviation Industry Institute of Radar And Electronic Equipment, 2003.)
- [ 7 ] 微波工程手册编译组. 微波工程手册[M]. 北京:微波工程手册编译组出版社, 1972. (*Microwave Engineering Handbook* Compilation Group. *Microwave Engineering Handbook*[M]. Beijing:*Microwave Engineering Handbook* Compilation Group Press, 1972.)
- [ 8 ] 徐锐敏,唐璞. 微波技术基础[M]. 北京:科学出版社, 2009. (XU Ruimin,TANG Pu. Microwave Technology Foundation[M]. Beijing:Science Press, 2009.)
- [ 9 ] Mike Golio. 射频与微波手册[M]. 北京:国防工业出版社, 2006. (Mike Golio. Radio Frequency and Microwave Handbook[M]. Beijing:National Defence Industry Press, 2006.)
- [10] 张文涛,杨向华,周邦华. FDTD 分析准八木天线的算法实现[J]. 信息与电子工程, 2010,8(3):273-275. (ZHANG Wentao,YANG Xianghua,ZHOU Banghua. Programming Analysis of the Quasi-Yagi Antenna by Using FDTD Method[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(3):273-275.)

#### 作者简介:



李 彬(1983-), 男, 四川省崇州市人, 助理工程师, 主要从事航空雷达技术研究.email: leebin02-1111@163.com.

杨 勇(1969-), 男, 四川省内江市人, 高级工程师, 主要从事航空雷达天线微波技术研究.