

超宽带脊喇叭天线的设计与研制

刘濂 伍捍东

(西安恒达微波技术开发公司 西安 710061)

[摘要] 超宽频带天线是电磁干扰、电磁兼容测量和无源测向、侦察与干扰必需的重要设备，各种不同技术要求的加脊喇叭天线因其极宽的频带、相对平坦的增益、较小的体积和使用安装方便等优点，被广泛使用。本文就超宽频带加脊喇叭天线的设计方法进行探讨和讨论，并给出了恒达公司研制的1~18GHz超宽频带加脊喇叭天线的设计实例和测试数据。

一、引言

在电磁兼容、电磁干扰以及天线增益、方向图测量等方面都需要极宽频带的而且体积尽量小的天线，通常的喇叭天线体积可作得较小，但它频带较窄，一般在 $\Delta F/F_0 \leq 50\%$ 。为了拓宽使用频率范围，在角锥喇叭中加脊并在其馈电波导中加脊就会展宽频带。但有关加脊喇叭天线设计方面的文献较少，本文试图就超宽频带加脊喇叭天线提出简单易行的设计方法，来解决实现工程需要的超宽带天线的设计。

二、设计方法探讨

通常的喇叭天线是在已知矩形波导内场的分布情况下求出喇叭内场的分布和口面上的场分布，再用惠更斯—非涅尔原理求出辐射场。然而脊波导内的场分布非常复杂，虽然已经有人用麦克斯韦尔方程结合脊波导的边界条件求出了脊波导内场的分布表达式，但它非常复杂，难以在工程中使用。至今仍用横向谐振法或者扰动理论，求解脊波导的电气参数，故加脊喇叭的设计也就不能用设计普通喇叭天线的方法来设计了。

我们认为双脊喇叭天线是要把脊波导中的电磁能量顺利地辐射到自由空间（或相反），所以加脊喇叭入口端必须与脊波导匹配，而喇叭的开口端必须与自由空间的波阻抗匹配。这样加脊喇叭的设计就变成了脊波导阻抗变换器的设计了。

经验证明，指数阻抗变换器的频带极宽，设 Z 为变换器轴向 X 处的特性阻抗， Z_L 为开口端的特性阻抗，过渡段全长为 L ，则 $Z = e^{(x/L) \ln Z_L}$ (1)

如果将过渡段全长 L 分为两段，使它成为双指数变换为，即

$$Z = e^{z(x/l)2\ln z} \quad 0 \leq x \leq l/2 \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

$$Z = e^{[4x/l - 2(x/l) - 1]\ln z} \quad l/2 \leq x \leq L \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

则匹配效果更好[5]。把双脊喇叭沿轴向分成几段，每段看作是均匀的双脊波导，根据已知的 Z 值及设定的其它值用文献[3]给出的 $Z_{0\infty}$ 公式可求出脊的尺寸。

仅从匹配观点出发，喇叭的长度应为最低工作频率上的半波长以上。喇叭内的波长是随其长度 X 变化的，最长的导内波长是喇叭口处最低工作频率上的波长，所以：

$$L = 1/2 \frac{\lambda_{max}}{\sqrt{1 - (\frac{\lambda_{max}}{2A})^2}} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

其中 A 为喇叭口面与脊垂直边的长度。

喇叭必须保证在使用频率范围内能传输 H_{10} 模和 H_{30} 模，防止或减小 H_{20} 等偶次模，因此要求馈电双脊波导中的波型必须较纯，喇叭颈部以及喇叭口与自由空间的匹配良好，喇叭本身不产生高次模。如果双脊波导是以同轴线馈电，馈电的探针必须垂直贯穿于双脊面中央，以使脊间中央电场最强，使出现 H_{20} 模的可能性较小，但可能出现 H_{30} 模。因此，双脊喇叭天线的带宽是在 H_{10} 模截止波长 λ_{c10} 和 H_{30} 模工作波长 λ_{30} 之间，所以双脊喇叭天线的工作频带极宽。

喇叭中的脊终止于喇叭口面，选用脊的变化规律不同则口面上场的幅度和相位变化也不同，由于频带极宽，又为使 Gain 在整个工作频带内尽量平坦，以及波束宽度在高频段尽量展宽，垂直于磁场平面的两边侧板设计成栅板，并使双脊的指数过渡变化率提高，缩短天线纵向长度，增大高频时的口径相差，在高频时形成散相场。

三、HD-10180DRHA 双脊喇叭的研制

恒达公司根据用户要求研制了 HD-10180DRHA 双脊喇叭天线，并参照美国同类产品介绍，设计使用频率范围为：1~18GHz，最大连续波功率：300W，平均增益：19dB。平均波束宽度：50 度左右，VSWR≤2.0。

喇叭设计分为馈电部分和喇叭两部分进行。

馈电部分的设计难度较大，我们设计馈电脊波导 H_{10} 模的截止频率是 1.7GHz， H_{30} 模的截止频率 18.1GHz。 H_{30} 模的工作频率≈30GHz。为使波型纯度高，馈电探针在两脊中穿过并形成 50 欧姆的同轴线，下脊中的同轴线短路位置可调节。馈电的接头采用 50 欧姆精密 N 型同轴接头。N 型接头与探针同轴线之间采用了内导体锥型过渡段。为了展宽馈电部分频带，把双脊波导短路段之双脊降低而形成高阻腔。实验证明高阻腔对于展宽馈电频带降低 VSWR 是有效的。实测 VSWR 的频带下限≤1GHz。频带上限受到几个问题的制约：一是馈电同轴接头 N-50K 在频率>15GHz 可能会产生高次模；二是喇叭的尺寸限制使高频时口径散相严重，波束中心出现凹限而形成分裂；三是 VSWR 的宽带调配困难。

喇叭部分设计主要考虑张角，脊变化规律对 VSWR 和天线波束的影响。为使高频段波束展宽，增益降低，两侧壁设计为介质印刷栅。显然，当使用频率很低时，印刷栅相当于一整体金属板，当使用频率很高时，印刷栅相当于不存在，借以展宽高频时的波束宽度。电磁波垂直照射到栅平面时，印刷栅的透射率比较容易计算或试验确定。实际使用时 E 场与栅线平行，入射角随频率和位置不同而不同。当频率在 4GHz 以下时栅面可以视为是金属板。

四、HD-10180DRHA 的外形图及技术指标

HD-10180 超宽频带双脊喇叭天线的外形如图 1 示，其技术指标：

1. 工作频率：1~18 GHz

2. VSWR：≤2

3. 平均 Gain : ≈ 10 dB

5. 输入接头: N-50K

五、实测数据

1—N型接头入口处的 VSWR (图 3);

3—增益的频率特性 (图 4);

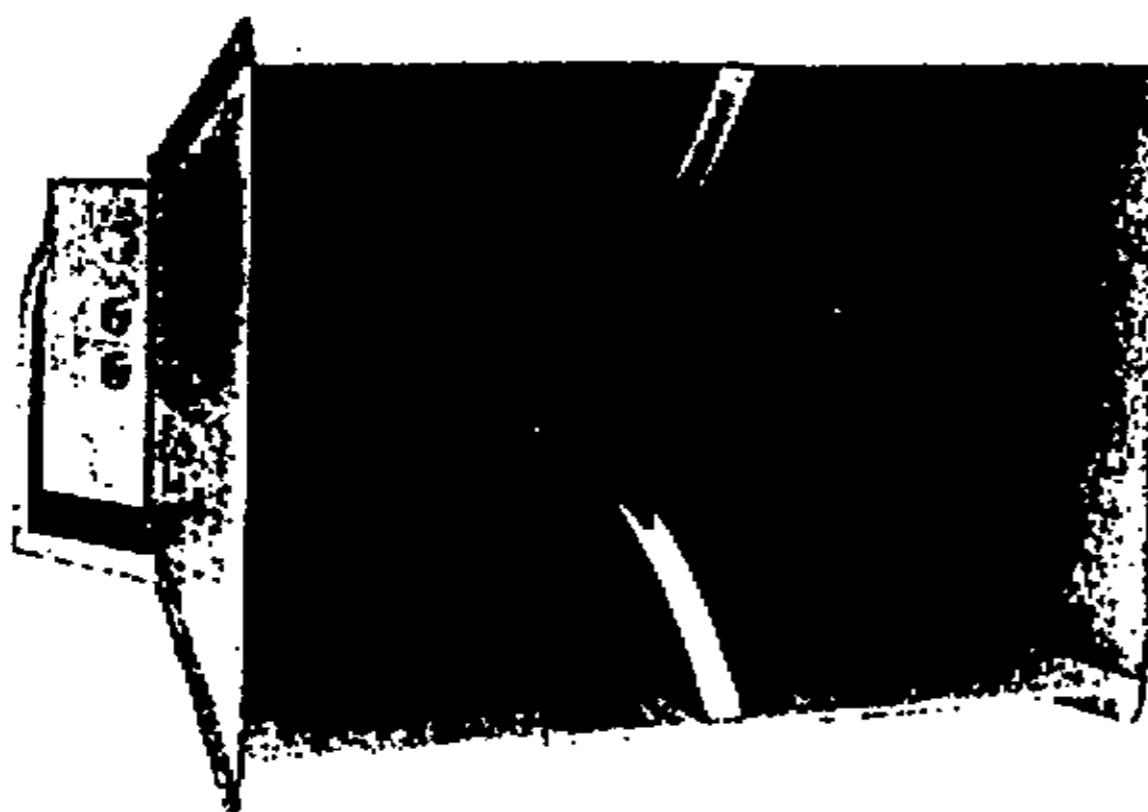
4. 平均波束宽度: E 面 $\approx 54^\circ$ H 面 $\approx 49^\circ$

6. 外形尺寸: $284 \times 250 \times 164$

2—波束半功率点宽度的频率特性 (图 2);

4—方向图 (图 5)。

测试结果表明设计是成功的, 其中驻波特性, 增益特性稍优于进口同类产品指标。方向图在 $F > 15$ GHz 时, 主波束开始出现凹坑, 这是高频区口径散相所致。这一特点在用作大抛物面天线馈源形成高增益超宽频带天线是有益的。



波束半功率点宽度 (参考值) 图 2

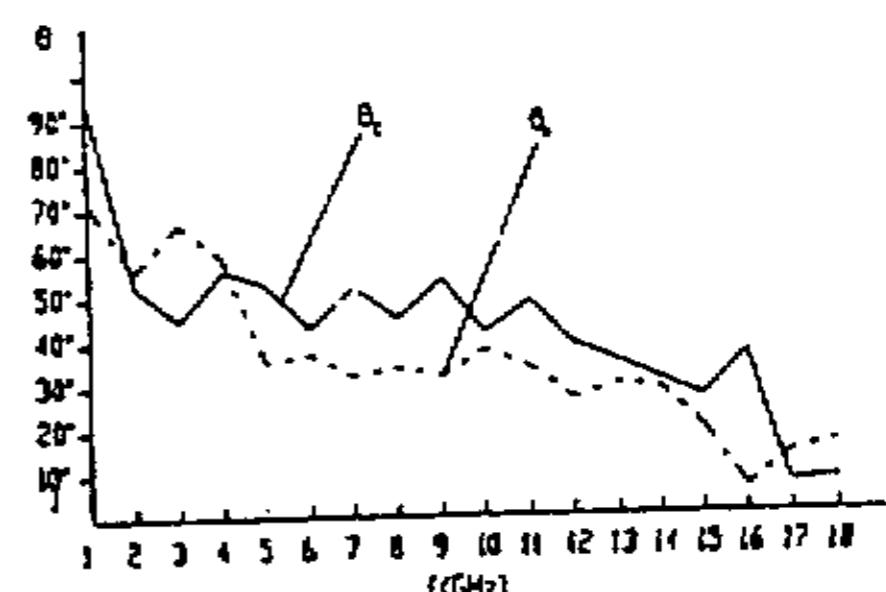
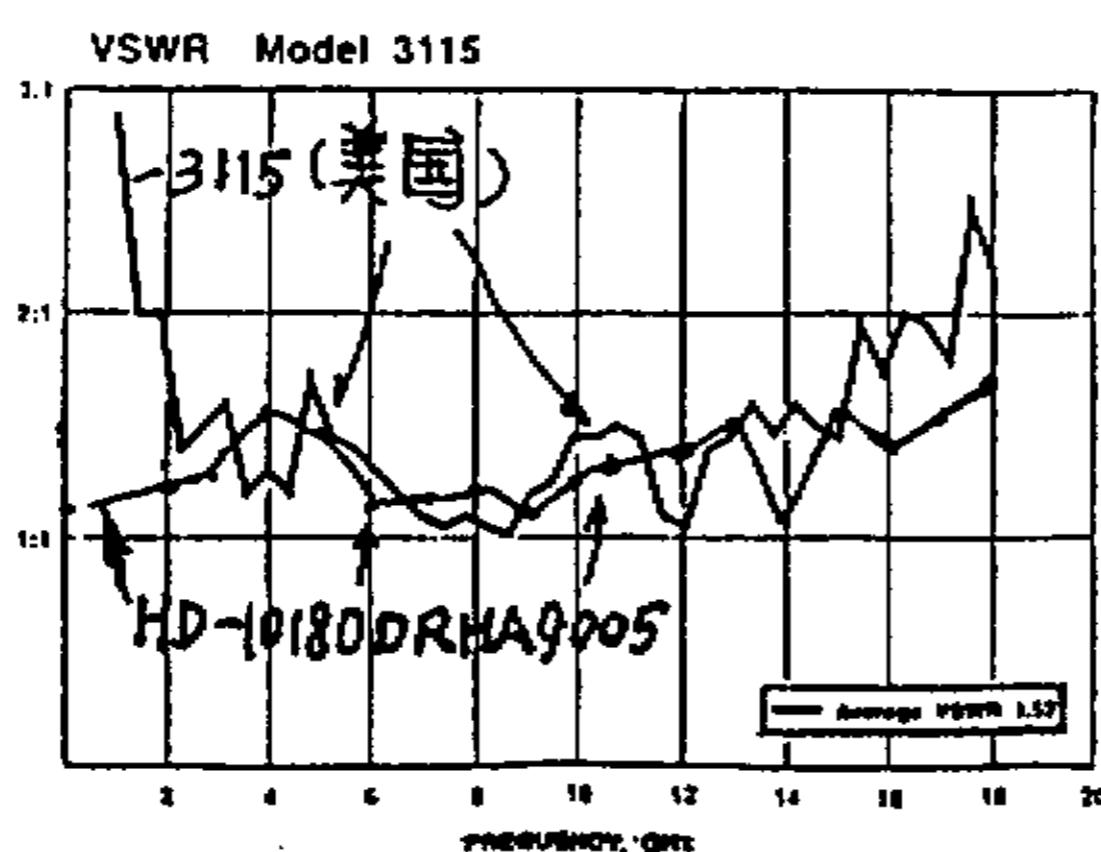


图 1 Double-Ridged Waveguide Horn Antenna



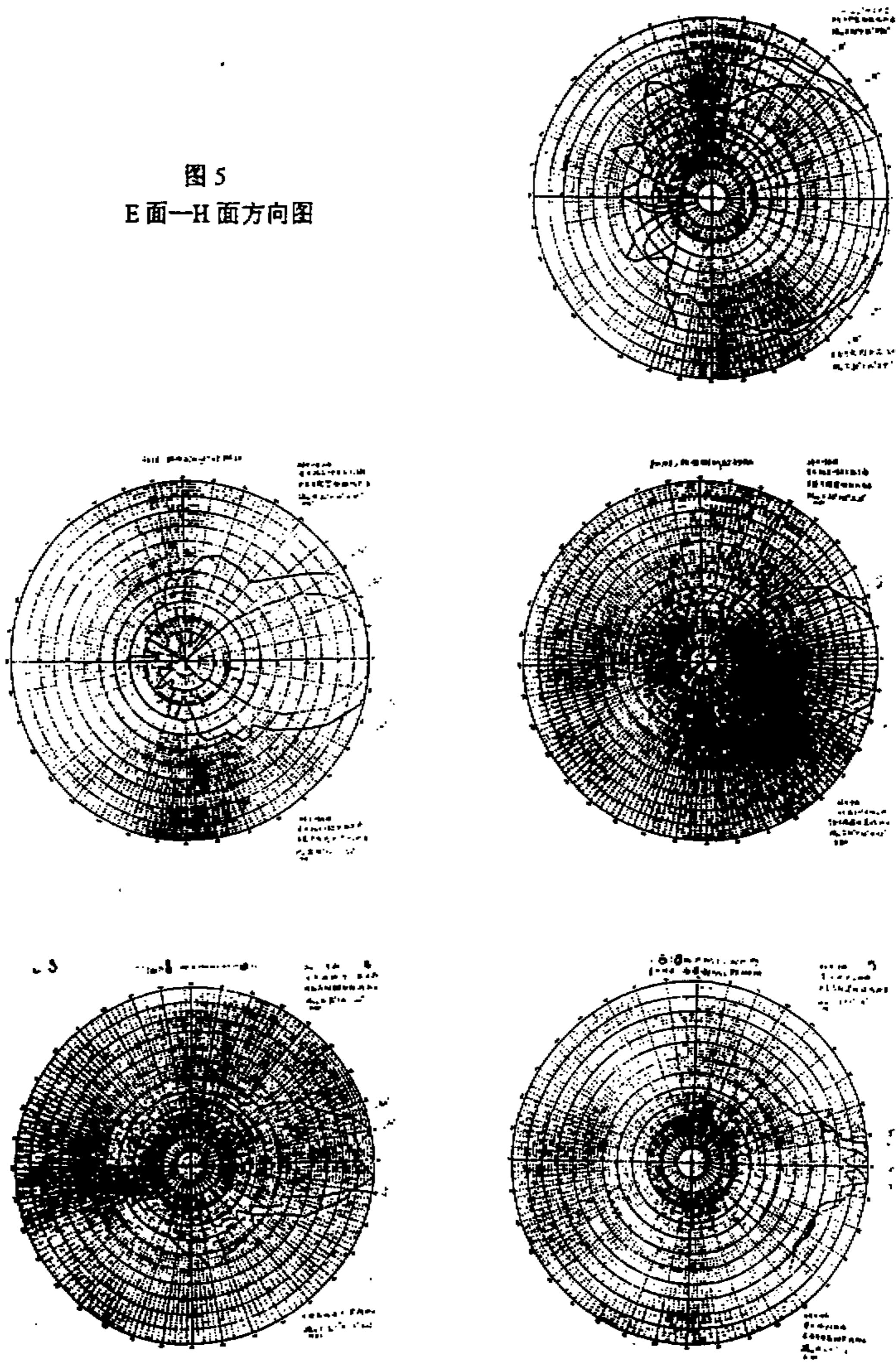
增益 G (参考值)



图 3

图 4

图 5
E 面—H 面方向图



六、讨 论

1. 该天线的频带极宽，理论分析频带应在 1.7~18.1GHz 内，但实测表明直到 1GHz 的 VSWR 也不大，在我们第一批试制的 5 个喇叭中，有一个喇叭在 1GHz 以下，VSWR 小于 2，远超出理论上的频带下限，这一事实在理论上尚无法解释。

2. 实测增益 Gain 随频率的变化比较平坦，而且大多数频率点上的 Gain 比同类进口产品的 Gain 值大。

3. 在 4GHz 以下，设口面上的电场为余弦和余弦平方分布两种情况来计算波束宽度，计算结果表明以余弦平方分布的计算结果与测试值较接近。在 4GHz 以上，波束半功率点宽度的计算值小于测试值，而且频率越高差别越大。这说明了喇叭侧壁的印刷栅线在 4GHz 以下看作金属板是正确的。也说明角锥形喇叭加了双脊之后其口面场分布已经有了变化，不能再用无脊喇叭的分布方法计算方向图。

4. 事实上，由于迅速张开的喇叭口面场不是同相场，而是散相场，其边缘与口径中心的相差 Φ_m 随 f 的变化而变化。f 低时， Φ_m 较小，波束宽度因 f 低而较宽；f 升高时， Φ_m 增大，波束宽度因 Φ_m 增大而展宽。但当 $\Phi_m \geq \pi$ 时，波束宽度呈现了随 f 基本不变化的特性，也就是说，对宽频带要求 $\Phi_m \geq \pi$ 是有利的。 Φ_m 增大时，相心位置逐渐由口径中心向喇叭顶点方向移动。

七、结束语

双脊喇叭天线的频带极宽。设计双脊喇叭天线涉及方向图、增益、VSWR 等主要电气指标的计算，这些电气指标与馈电设计、口面场幅度相位分布和双脊喇叭的物理尺寸有关，目前所见到的文献大多用电磁场的数值法进行分析计算，至今未见到完善的适合工程设计用的简单设计方法，这有待于从事双脊喇叭天线研究的工程技术人员共同努力。

感谢恒达微波公司胡长富、魏茂华高工和徐玉华、刘迎喜同志在论文及实验工作中的大力协助。

八、参考文献

- [1] “毫米波及厘米波段中双脊波导的参数”，国外电子器件 62.10.PP 498
- [2] SHOPFER “The design of ridged waveguides I.R. E MTT-3 PP20-29” October 1955
- [3] T-S chen “calculation of the paramenters of ridge wavegiudes” IRE MTT-5 PP12- 17 Jan.1957
- [4] W.J.R. Hopfer and M.N.burton “Closed –Form Expressions for the paramenters of Finned and Ridged Waveguides” TEEE, MTT-30 PP2190-2194 December 1982
- [5] 柯林“微波工程基础” pp269-271 人民邮电出版社
- [6] 爱金堡“超高频天线” PP540-554 人民邮电出版社
- [7] Paul J.Muenjer “Broadbanding Coax –To-Ridged –Wavegiude Trasition” Microwaves Vols NO.8 August 1964 PP92-97
- [8] 伍捍东“用于电磁兼容和天线测量的宽带微波天线”，《92空间电子学会议论文集》下册。

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>