

因此,采用本文方法设计毫米波低副瓣波导窄边缝隙行波阵是切实可行的。

#### 参考文献

- [1] 钟顺时, 费桐秋, 孙玉林, 波导窄边缝隙天线的设计[J], 西北电讯工程学院学报, 1976, (1):165-184

## 毫米波机载宽带 RCS 测量天线研究

刘兴贵, 郑雪飞, 何炳发, 陈 虎

(南京电子技术研究所, 南京 210013)

**摘 要** 本文介绍了一种电尺寸小、结构紧凑、重量轻的高性能毫米波机载宽带RCS测量天线,探讨了实现天线低交叉极化、低旁瓣、高增益等性能的分析 and 设计方法。研制了天线实验件,测试结果与分析计算结果较为一致。

**关键词** 毫米波, 环焦天线, 双极化, 波纹喇叭

## Study on millimeter-wave antenna for wide-band airborne RCS measurement

LIU Xing-gui, ZHENG Xue-fei, HE Bing-fa, CHEN Hu

(Nanjing Research Institute of Electronic Technology, Nanjing 210013, China)

**Abstract** In this paper, a small electric size, compact structure and light weight high performance millimeter-wave airborne RCS measurement antenna were introduced. The technique of analyze and design to obtain low-cross polarization, low-sidelobe and high-gain were discussed. A experiment antenna was made, Test results were consistent with the theoretical analysis.

**Key words** millimeter-wave; ring-focus antenna; dual polarization; corrugated horn

### 1 引言

毫米波机载 RCS 测量系统主要利用 SAR 技术和宽带技术, 实现高分辨测量地、海面电磁散射特性和地、海面上人造目标的电磁散射特性, 进行二维高分辨成像。通常采用多极化组合测量方式来获取更多关于测量对象的极化信息。常用的四种极化组合方式是 HH、HV、VH、VV。工作时, 先发射一种极化电磁波, 如 H 极化, 同时接收 H、V 极化, 到下一个周期, 切换到另一种极

化发射, 如 V 极化, 同时接收 H、V 极化。因此毫米波 RCS 测量天线对交叉极化隔离度指标要求比较苛刻, 同时要求具有高增益、低旁瓣特性。由于毫米波机载 RCS 测量天线安装在特定的位置, 其体积和重量受到严格的限制。本文选取了一种结构紧凑的圆锥波纹喇叭馈源和优化配置的环焦天线, 采用模式匹配法和球面波展开法分析并计算了波纹圆锥喇叭的传输及辐射特性<sup>[1-5]</sup>, 并用 HFSS 对其进行了仿真和结构参数的

优化;采用物理光学法和表面电流法分析并计算了天线的辐射特性<sup>[1,2]</sup>。

## 2 圆锥波纹喇叭馈源

### 2.1 分析方法

结构紧凑的圆锥波纹喇叭馈源是实现高性能双极化天线的一个关键部件。这是一个没有传统形式意义上明确的输入锥段、模转换段、过渡段和喇叭段划分的波纹结构,其口径和长度可显著减少。波纹喇叭当槽深为 $\lambda/4$ 的奇数倍时,TE<sub>11</sub>和TM<sub>11</sub>模达到平衡混合状态,精心设计可具有宽频带、低旁瓣、低交叉极化电平、相位中心稳定和幅度相位方向图等化度良好等优良电性能。

分析波纹喇叭辐射问题的基本思路是,在喇叭内部采用TE和TM模求出基本结构单元的散射矩阵[S],然后求出整个波纹喇叭的组合散射矩阵,由此可求出波纹喇叭的传播特性。用平面角谱函数表示波纹喇叭辐射半空间的横向电场分量,由此而求出口面场的模式系数;根据模式系数再求出喇叭口面的辐射场<sup>[5]</sup>。也可借助于商用的微波EDA软件, HFSS可以计算任意形状三维无源结构的S参数和全波电磁场,本文同时用HFSS对其进行了仿真和结构参数的优化。

### 2.2 有害模的抑制

为了实现天线低交叉极化隔离度的要求,就必须精心设计馈源的交叉极化电平,抑制EH<sub>11</sub>有害模由口面辐射出去。经过仿真分析,发现波纹喇叭的内壁形状对喇叭的主极化方向图、交叉极化和输入电压驻波比均有较大影响;波纹槽深可大幅度地改善交叉极化和输入电压驻波比特性。因此合理控制喇叭内壁形状和槽深是设计性能优良的紧凑式波纹喇叭的关键。另外还要精心设

计波纹喇叭激励段,使光壁波导和波纹喇叭良好匹配,且光壁波导中的TE<sub>11</sub>模全部转化为HE<sub>11</sub>模,抑制其它有害模,也可极大地改善输入电压驻波比特性和适当改善交叉极化电平。

### 2.3 设计、加工

在HFSS下根据所需要的主极化方向图、交叉极化电平和输入电压驻波比特性,分别以波纹槽深、波纹槽宽、喇叭半张角等参数进行优化。并以最终的模型数据进行理论分析和设计。设计的喇叭主要参数如下:喇叭输出端口径为30mm,共22个槽,槽周期为2mm,槽宽与槽周期之比为0.75。喇叭输入端半径为3.175mm,喇叭的相位中心离喇叭的口面距离为8mm。

### 2.4 辐射、传播性能

用HFSS仿真分析波纹喇叭的模型如图1。采用HFSS、理论分析计算波纹喇叭的VSWR如图2所示,可以看出,两种手段得到的结果非常吻合,其实际测试结果是在喇叭连接圆方变换及波导同轴变换测后测试的,扣除它们的影响,与理论分析结果比较一致的。

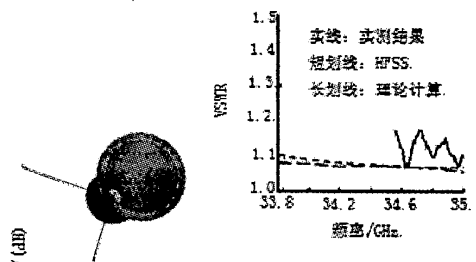


图1 馈源分析模型

图2 馈源 VSWR 特性

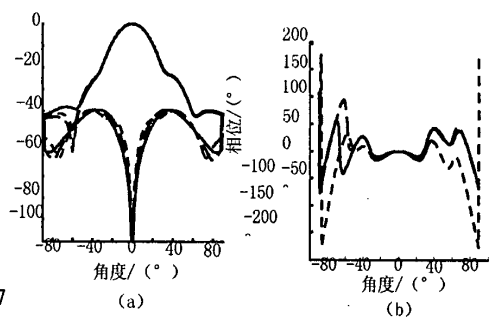


图3(a) 馈源的主极化与交叉极化方向图

图3(b) 馈源的相位方向图 (中心频率点)

采用HFSS、理论分析计算波纹喇叭交叉极化电平、主极化相位方向图及实测结果分别如图3(a)、图3(b)所示。由图2和图3可以看出,所设计的馈源具有极佳的匹配特性 ( $VSWR < 1.1$ )、极低的交叉极化峰值电平 ( $\leq -40\text{dB}$ )、很好的辐射特性 (两个主平面幅度方向图一致性好,相位方向图平坦,在照射角内幅度控制在  $\pm 0.1\text{dB}$  之内,相位控制在  $\pm 10^\circ$  之内)。实测结果和理论分析、HFSS仿真结果均非常吻合。

### 3 天线设计

天线的横向尺寸、纵向尺寸受到严格限制,电小口径天线要实现机载RCS测量系统的要求,通过理论分析,采用短焦距形式的环焦天线。

#### 3.1 设计、分析思路

本文采用的设计方法,基于由馈源的外部几何参数的设计入手,设计性能优良的馈源后,再来设计天线系统,这样来保证整个天线性能的实现。

计算天线性能主要分三部,第一步由馈源的辐射方向图计算副反射面和馈源的散射场;第二步计算主反射面的辐射场;第三步是计算整个天线系统的辐射场。

#### 3.2 副反射面和馈源散射场的计算

在图4中馈源的相位中心位于点 $O_s$ ,假定其照射到副反射面的电、磁场可分别为  $\bar{E}_f$  和  $\bar{H}_f$ ,则在点 $M$ 处副反射面的散射磁场的可表示为:

$$\bar{H}_{sc}(M) = \frac{1}{4\pi} \iint_{r_m} \frac{e^{-jk r_m}}{r_m} (\bar{J}_s \times \hat{r}_m) (jk + \frac{1}{r_m}) ds \quad (1)$$

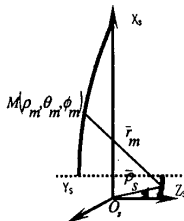


图4

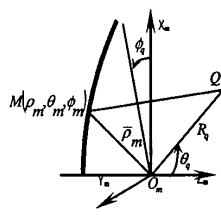


图5

图4 计算副反射面散射场图

图5 计算主反射面辐射场图

式(1)中  $\bar{J}_s$  为副反射面上的表面电流,由物理光学法可获得  $\bar{J}_s = 2\hat{n}_s \times \bar{H}_f$ ,  $\hat{n}_s$  为副反射面的法向矢量,由式(1)便可得到副反射面散射场。联合馈源的散射磁场,我们便可得到副反射面和馈源的总散射磁场  $\bar{H}_{sc\_T}(M)$ 。

#### 3.3 主反射面辐射场的计算

如图5,照射到主反射面的是副反射面和馈源的总散射磁场的总场  $\bar{H}_{sc\_T}(M)$ ,再一次由物理光学法可获得主反射面上的表面电流为:  
 $\bar{J}_m = 2\hat{n}_m \times \bar{H}_{sc\_T}$ ,  $\hat{n}_m$  为主反射面的法向矢量。

由此可得到主面在点Q处的辐射的电场为:

$$\bar{E}(\theta) = \frac{k}{j4\pi\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}} \iint \Delta_m [\bar{J}_m - (\bar{J}_m \cdot \hat{R}_q) \hat{R}_q] \frac{e^{-jkr}}{R_q} \rho_m \sin(\theta_m) d\varphi_m d\theta_m \quad (2)$$

式(2)中

$$\Delta_m = \sqrt{(F_\theta(\theta_m))^2 + (F(\theta_m))^2}$$

$$F(\theta_m) = \rho_m, \quad F_\theta(\theta_m) = \frac{\partial F(\theta_m)}{\partial \theta_m}$$

#### 3.4 天线系统辐射场的计算

由前面计算得到的副反射面和馈源的总散射磁场  $\bar{H}_{sc\_T}(M)$ ,通过叉乘便可得到副反射面和馈源的总散射电场,结合式(2)计算得到

的主面在点Q处的辐射电场,便可得到整个天线系统的总电场。

假定为垂直极化馈源照射副反射面,总电场

$\bar{E}_{ver}^T$  可表示为:

$$\bar{E}_{ver}^T = \left\{ w_{\theta}(\theta_q) \cos(\varphi_q) \hat{\theta}_q - w_{\varphi}(\theta_q) \sin(\varphi_q) \hat{\varphi}_q \right\} \frac{e^{-jkR_q}}{R_q} \quad (3)$$

最终得到垂直极化馈源照射副反射面时天线的主极化分量和交叉极化分量分别为:

$$\bar{E}_{ver\_copol}^T = \left\{ w_{\theta}(\theta_q) \cos(\varphi_q) + w_{\varphi}(\theta_q) \sin(\varphi_q) \right\} \frac{e^{-jkR_q}}{R_q}$$

$$\bar{E}_{ver\_xpol}^T =$$

$$\left\{ w_{\theta}(\theta_q) - w_{\varphi}(\theta_q) \right\} \sin(\varphi_q) \cos(\varphi_q) \frac{e^{-jkR_q}}{R_q} \quad (4)$$

## 4 实验

主反射面采用铝棒数控加工成形,并进行去应力处理,可保证在毫米波段使用所要求的均方根误差。副反射面和馈源系统的安装采用了特殊的工艺,可保证副反射面和馈源系统与主反射面的轴线重合。图6为实验天线照片,主反射面直径约为 $30\lambda$ ,副反射面直径约为 $4\lambda$ 。

在微波暗室对实验天线进行了测试,测试的主极化和交叉极化归一化方向图如图7(a, b, c)所示,在频带内交叉极化峰值电平 $\leq -38\text{dB}$ ,最大副瓣电平 $\leq -18\text{dB}$ 。频带内各项指标与理论值均较为一致。

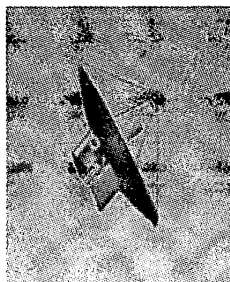


图6 实验天线

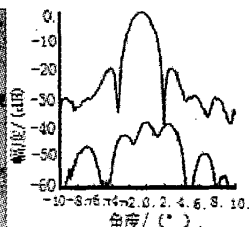


图7(a) 低频端

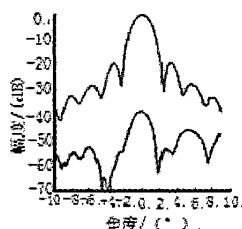


图7(b) 中频端

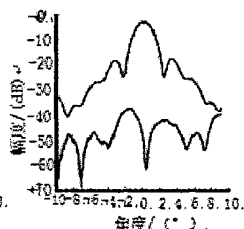


图7(c) 高频端

## 5 结论

在毫米机载宽带RCS测量天线设计中,优化设计了结构紧凑的圆锥波纹喇叭馈源和纵向尺寸紧凑的环焦天线,理论分析结果和实际测试结果均非常吻合。性能指标能完全满足机载宽带RCS测量系统的要求。验证了分析方法、仿真软件在毫米波段的准确性,加工安装等工艺的可行性。

## 参考文献

- [1] 杨可忠等,“现代面天线新技术”,人民邮电出版社,1993年1月,第一版。
- [2] 章日荣等人编著,“反射镜天线及高效率馈源”,人民邮电出版社,1977年10月
- [3] 章日荣,杨可忠,陈木华,“波纹喇叭”,人民邮电出版社,1998年。
- [4] G.L.James, “Design of Wide-band compact Corrugated horns”, IEEE Trans. Antenna and

Propagat, Vol. AP-32, pp. 1134-1139. Oct. 1984.

pp. 31-43. 1987年, 6月。

[5] 杨可忠, “波纹圆波导和波纹圆锥喇叭的新分析方法”, 《无线电通信技术》, 第13卷第6期,

[6] 阮颖铮, “毫米波系统中的天线技术”, 电子科技大学学报, 第20卷, 增刊1, 1991年6

## 应用于毫米波雷达前端的小型微带阵列双天线技术

崔斌 喻筱静 钱蓉 孙晓玮

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海, 200050)

**摘要:** 本文介绍了一种用于收发分离体制毫米波雷达前端的小型微带阵列双天线。双天线由两个四阵微带阵列天线组成, 共置于直径为 18.6 毫米的圆形衬底上, 分别作为雷达的发射和接收天线。通过对天线的结构和参数的优化调整, 使得双天线在有限的空间内获得了较高的增益, 并保证了收发之间足够的隔离。天线与电路采用背对背连接, 通过小孔耦合技术进行场耦合。经过对天线和整个前端的测试, 收发天线提供了 10.5dB 的增益, 两天线间的隔离度优于-34dB, 雷达前端具备良好的收发性能。

**关键词:** 小型微带阵列双天线, 雷达前端, 毫米波, 隔离度

**中图分类号:** TN 82

### Compact microstrip array double-antenna technology applied to millimeter wave radar front-end

Bin Cui, Xiao-Jing Yu, Rong Qian, Xiao-Wei Sun

Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200050

**Abstract:** This paper introduces a kind of microstrip array double-antenna used for millimeter wave radar front-end with transmitter and receiver separately. Double-antenna is composed of two 4-patch microstrip arrays which place on circular substrate with 18.6mm diameter and act as transmitter antenna and receiver antenna respectively. By optimizing the structure and parameters, the double-antenna achieves high gain in limited area and supports isolation between transmitter and receiver enough. The antenna connects the circuit from back to back, and the energy is coupled through holes coupling. Experiments results show that the double-antenna provides gain 10.5dB and isolation between two antennas better than -34dB. The radar front-end has perfect performance.

**Key words:** compact microstrip array double antenna, radar front-end, millimeter wave, isolation

## 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](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>