

# 机载多模相控阵天线

鲁加国

(华东电子工程研究所, 合肥 230031)

## 摘要

机载多模相控阵天线为一  $96 \times 16$  单元, 口径尺寸  $1.56\text{m} \times 0.4\text{m}$  平面阵列天线, 该天线在水平面作  $\pm 60^\circ$  一维电子扫描, SAR 和 GMTD 两种工作模式。天线由非对称单脊波导裂缝天线、行波馈电网络、铁氧体移相器、双模馈电网络、波控等主要设备组成。天线具有较宽的工作频带, 极低交叉极化, 宽角扫描, 主平面低副瓣, 非主平面超低副瓣等特点; 双模馈电网络(DMF), 实现了 SAR/GMTD 两种工作模式; 在频带内有效地实现了宽角扫描阻抗匹配, 使波束宽角扫描范围内具有低副瓣特性; 基于内外场相结合的通道相位校准技术具有设备量少, 校准精度高的特点, 它可以校准由于设计、制造、组装、老化、热变形及元件更换等引起各通道的相位误差。

## 一 天线概述

机载多模相控阵天线是一个安装在 Y-7 飞机上雷达天线(如图 1), 该雷达具有 SAR/GMTD 两种工作模式。在 SAR 工作模式下, 天线能提供高增益、低副瓣波束保证雷达对地面静止目标合成孔径成像; 在 MTD 工作模式下, 将天线孔径一分为二, 分别接收回波信号, 利用天线相位中心分置(DPCA)来抑制地面背景干扰, 提取出动目标。雷达性能取决于多种因素, 而天线性能对于机载监视雷达, 将更具有决定性的影响。天线在宽频带, 宽角( $\pm 60^\circ$ )扫描, 低副瓣, 可切换的 SAR/GMTD 双模工作, 实时通道相位校准等方面关键技术都是必需解决的难题。同时, 相控阵天线的低副瓣和超低副瓣是近年来提出来的新问题, 实现起来更困难, 遇到的技术关键更多。本文介绍的天线系统分为两部分: 辐射部分与馈电部分。辐射部分(即天线阵面)由多条线阵组成

(如图 2, 3), 和线阵相连的依次是铁氧体移相器、时间补偿延迟线、波导双模馈电(DMF)网络。各垂直线阵均由 16 单元谐振式非对称单脊波导裂缝阵和双脊波导到半高波导变换组成的。馈电部分是长方体框架, 馈电系统中所有的设备都放在框架里面, 包括 4 个 DMF 网络, 1:4 功分网络, 96 只铁氧体移相器及其驱动控制设备, 96 根半软电缆、双模馈电网络、波控、稳压电源、驱动及控制电缆等。该框架结构总体布置如图 4 所示, 在结构设计时, 考虑到了体积小、重量轻、有利于安装、换接、维护、有利于通风散热, 保持温度分布均匀等因素。

## 二 主要部件简述

### 1 非对称单脊波导裂缝平面阵天线<sup>[1~4]</sup>

非对称单脊波导裂缝平面阵天线由 100 根非对称单脊波导共线裂缝天线线阵垂直放置组成, 中间 96 根线阵是有源线阵, 和有源线阵相连的是移相器等, 两边各有 2 根线阵是无源线阵, 线阵后接匹配负载。非对称单脊波导共线裂缝线阵是由 16 单元非对称单脊波导交错排列而成, 在两段非对称单脊波导交错相接时, 两边波导上较深的腔体向较浅的腔体延伸, 使两个交错的非对称单脊波导中间形成一个低阻抗的单脊波导, 来匹配由于非对称单脊波导交错而引入的感性电纳。16 单元非对称单脊波导共线裂缝阵两端为短路板, 纵向裂缝间距为二分之一波导波长。裂缝线阵采用中间馈电结构, 每边有 8 个裂缝, 馈电口为双脊波导的形式。

### 2 行波馈电网络<sup>[5]</sup>

行波馈电网络是施加于阵面背后的一排串馈弱耦合( $-50\text{dB}$ )正交波导耦合器,

实现对天线辐射单元进行近似等幅度和线性相位锥度激励，模拟远场发射信号。基于行波馈电网络的通道相位校准技术具有设备量少、校准精度高的特点，它可以校准由于设计、制造、组装、老化、热变形及元件更换的影响造成天线各通道的相位误差，确保天线具有最大增益和最小副瓣。采用这种校准技术后，可以大大地降低对馈电系统元器件的公差要求，有利于系统工程化实现和降低加工成本。行波馈源方法具有设备量小，校准精度高的特点。96 单元平面相控阵天线系统的实际相位校准精度均方根值优于  $2.6^\circ$ 。

### 3 铁氧体移相器

铁氧体移相器和 PIN 二极管移相器是相控阵天线中最常用的两种移相器，与 PIN 二极管移相器相比，铁氧体移相器的品质因素较高、功率容量大、频带宽、驻波系数与插损不受相移态调制的影响，使得它在相控阵技术中得到越来越广泛的应用。虽然其开关时间长，差相移随温度而变化，但这些缺点正随着集成电路技术的发展得到克服。本系统铁氧体移相器的技术指标是：频率为 X 波段，1GHz 工作带宽；输入 VSWR  $\leq 1.3$ ；差相移与标准值误差  $\leq 5^\circ$ ；收发相移一致性  $\leq \pm 5^\circ$ ；插入相移离散性  $\leq \pm 10^\circ$ ；承受功率：峰值  $\geq 1\text{ kW}$ ，平均  $\geq 5\text{ W}$ ；插入损耗  $\leq 0.9\text{ dB}$ ；波束转换时间  $\leq 10\mu\text{s}$ ；工作环境  $-40^\circ \sim 60^\circ$ ；失效率  $\leq 1 \times 10^{-5}\text{ hr}$ 。在本系统中，铁氧体移相器除了波束扫描作用外，它还完成 SAR/GMTD 模式转换、收发信号转换、天线通道实时相位校准、天线波束展宽等作用。

### 4 双模馈电网络

在机载多模相控阵天线中，采用双模馈电网络来实现 SAR / GMTD 两种工作模式。在 96 单元的机载多模相控阵天线系统中，利用四个 24 单元的双模馈电网络的级联，在前馈实现全口径波束和在后馈实现两个 1/2 口径波束。两种状态可通过系统中的铁氧体移相器进行切换。双模馈电网络的设计就是依据不同孔径照射及相位函数，以获得构成双模馈电网络的耦合器和相位延迟的电讯及结构参数。系统中采用了四个 24 单元的双模馈电网络，其中各有两个分别为同侧激励和异侧激励结构。由于口径分布关于阵面中心的对称性，因而四个网络中有两个网络与另两个网络也是关于中心对称的。每个网络由两排串馈耦合结构组成，其中包含 48 个正交波导定向耦合器、24 个同轴波导变换器、24 个扁波导负载和 24 个介质加载波导移相器。双模馈电网络的主要特点有：精确的幅度分布，幅度分布均方根误差小于  $0.3\text{ dB rms}$ ；能形成两独立波束所需的精确的照射函数；具有很高的前后馈通道隔离，约大于  $40\text{ dB}$ ；极紧凑的层叠设计结构。

### 5 天线罩

机载天线罩的设计是机载雷达天线系统设计的一个重要问题，由于天线罩的存在会引起波束偏转，波瓣畸变，同时天线罩要承受环境的热应力和结构上的空气负荷，因此天线罩的形状设计、材料选择等都是非常重要的。本系统采用的天线罩形状为圆柱形 C 夹层天线罩。

## 三 系统主要结果

### 1 宽频带技术

在 X 波段带宽内，样机的谐振式非对称单脊波导裂缝线阵天线和整个系统的 VSWR 优于 1.5。

### 2 SAR/GMTD 双模特性

在样机天线中，四个 24 单元的双模馈电网络的级联，在前馈实现全口径波束，供 SAR 模式使用；在后馈实现两个 1/2 口径波束，供 GMTD 模式使用。两种模式可通过铁氧体移相器进行切换。双模馈电网络主要特点有：可形成前馈和后馈各自独立的幅

度和相位分布；幅度分布的均方根误差小；前、后馈间有很高的去耦结构非常紧凑、小巧。

### 3 低副瓣特性

在 X 波段带宽内，水平面和垂直面所有方向图的副瓣电平实测结果达到了低副瓣水平，天线垂直面典型实测波瓣结果如图 5 所示；斜平面所有方向图平均副瓣电平的实测结果优于-55dB。实现了低副瓣性能。

#### 4 宽角扫描特性

在 $\pm 60^\circ$  的扫描范围内和 X 波段带宽内，实现了相控阵天线在 SAR/GMTD 双模工作条件下波束扫描，所有扫描的方向图副瓣电平的实测结果优于低副瓣水平，天线水平面典型实测扫描波瓣图如图 6 所示。

#### 四 结论

机载多模相控阵天线是升空战场侦察雷达系统的最关键技术之一，它的研制成功和关键技术的突破，必将极大地推动升空战场侦察雷达技术的发展，机载多模相控阵天线本身也将有着广阔的应用前景。该成果达到了工程实用阶段，可以直接运用到直升机载战场侦察雷达系统中；只要将本天线在结构上进行扩充，可以用到机载远程战场侦察雷达上；只要将本天线在结构上进行缩小，可以用到无人机载战场侦察雷达系统中。

鸣谢：参加本天线研究的科技人员有 30 多位，在此一并致以谢意！

参考文献

- [1] 鲁加国, 樊德森. 非对称单脊波导的积分方程法分析. 微波学报, 1998, 14(2): 108—115.
  - [2] 鲁加国, 吴双桂, 张祖稷. 非对称单脊波导孤立缝导纳. 无线电通信技术, 1998, 24(4): 56-59.
  - [3] 鲁加国, 吴双桂, 陈嗣乔. 非对称单脊波导裂缝阵天线分析. 电波科学学报, 1998, 13(4): 388-392.
  - [4] 鲁加国, 适于一维相控阵宽角扫描的非对称单脊波导裂缝线源. 电子与信息学报, 2001, 23(2):175-180.
  - [5] 鲁加国, 吴曼青, 陈嗣乔, 方正新. 基于 FFT 的相控阵雷达校准方法. 电波科学学报, 2000, 15(2): 388-392.

图1 装载在Y7飞机上的天线吊仓

图2 装载在吊仓里的天线

图 3 远场测试状态下的天线

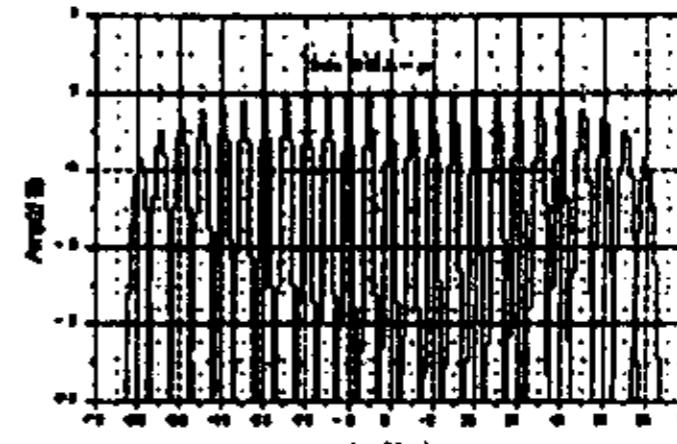
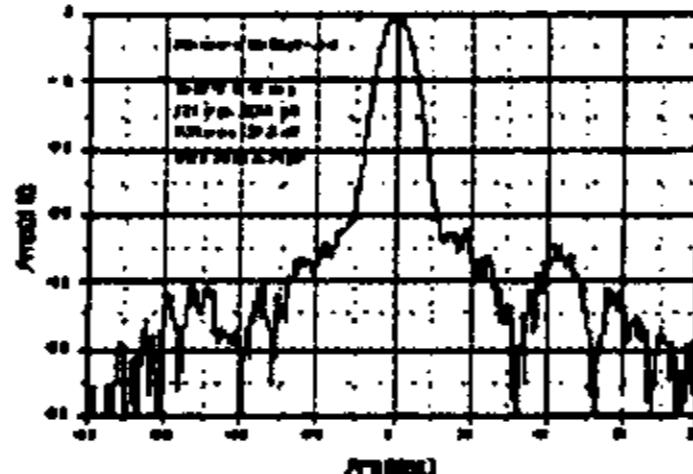
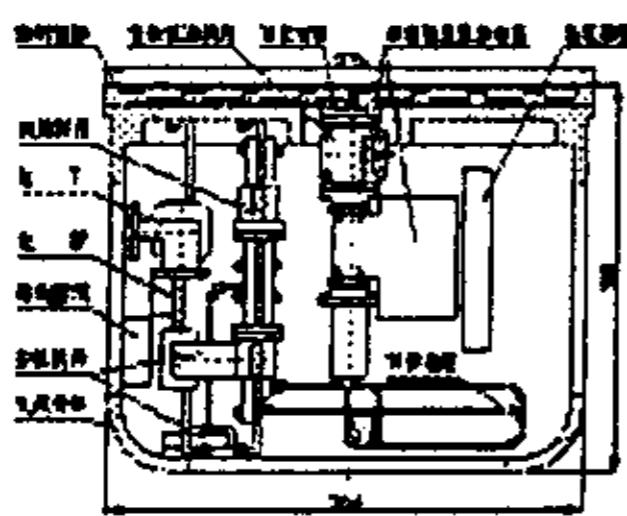


图 4 天线系统截面结构示意图

图 5 天线垂直面典型实测波瓣

图 6 天线水平面典型实测扫描波瓣

## 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>