

L/S 双频段圆形阵列单脉冲抛物面天线

张凤林^{①②} 刘玉杰^② 丁晓磊^② 陈剑^②

^①(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

^②(航天科技集团第 704 研究所 北京 100076)

摘要: 该文研究了一种以六单元圆形阵列作为照射器的单脉冲抛物面天线, 这种天线具有实现宽频带跟踪的独特优点, 其输出信号类似于圆波导单口径多模馈源, 具有一个和波束, 一个锥形差波束, 并给出了没有接收机参与的情况下, 将宽频带的和差两个通道变成单通道的途径。研制了一套 L(1-2GHz), S(2.2-2.3GHz)宽频带双圆极化单通道单脉冲天线, 对该天线的照射器、分波器、波束形成网络、单通道变换器等组件和馈源结构集成化设计进行比较详细的介绍。该馈源安装到一个 3.2m 的抛物面上, 频率为 1.1GHz, 2.2GHz 时, 和波束增益分别为 22.9dB, 30.1dB; 差波束零深为 35dB, 40dB。在 L/S 两个频段内跟踪稳定。

关键词: 单脉冲天线; 单脉冲馈源; 单通道调制器; 照射器

中图分类号: TN823

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)11-2743-04

L/S Dual Bands Monopulse Paraboloid Antenna

Zhang Feng-lin^{①②} Liu Yu-jie^② Ding Xiao-lei^② Chen-Jian^②

^①(College of Electronic Engineering, BUAA, Beijing 100083, China)

^②(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: A monopulse reflector antenna with an illuminator of six elements circular array is studied. The antenna has features of broadband and dual circular polarization performance. The output signals of the antenna are similar to multimode circular waveguide feed with one sum pattern and one difference pattern. The method for converting the two channel signals to one channel signal is provided. The six log-periodic monopole antennas (LPMA) illuminator, diplexer, beam form network (BFN), single channel modulator (SCM) of a L/S dual band tracking antenna are introduced. The gain of sum pattern of 22.9dB, 30.1dB, zero-depth of difference pattern of 35dB, 40dB at 1.1GHz, 2.2GHz respectively are achieved with a 3.2m reflector. The antenna can auto-tracking beacon stably in the L/S bands.

Key words: Monopulse antenna; Monopulse feed; Single channel modulator; Illuminator

1 引言

在测控天线领域, 单脉冲抛物面天线是一种应用非常广泛的天线, 用来对目标测角、测距、跟踪, 接收目标遥测信号、发射遥控信号、与目标通信等。单脉冲抛物面天线分为多口径单脉冲天线和单口径多模单脉冲天线两种。多口径单脉冲天线^[1]又有四单元、五单元、七单元等多种形式, 单口径多模单脉冲天线^[2]也有二模、三模、七模等多种。采用频率选择副反射面(FSS), 可以设计双频段单脉冲反射面天线。但是, 这些传统的跟踪天线都无法实现宽频带工作, 频带宽度约 10%, 能达到一个倍频程的单脉冲抛物面天线很少。

本文介绍一种单脉冲跟踪馈源-圆形阵列馈源^[3], 能实现宽频带跟踪, 并能同时实现左右旋圆极化。六单元圆形阵列单脉冲天线从表面上看, 与常见的四单元、五单元等多口径单脉冲天线只是单元数量上的差别, 实际上其工作原理与传统的多口径馈源有本质差别。

首先, 传统的多口径馈源的极化与每个单元的极化相同, 如都是水平极化或右旋圆极化等, 其单元可称为相似元。而六单元圆形阵列照射器的单元极化方向不同, 单元为线极化, 极化方向绕照射器轴向轴对称分布, 各不相同, 称为非相似元, 而照射器的极化可以是垂直、水平, 或左旋、右旋。

其次, 传统的多口径单脉冲照射器的方向图有方位方向的左右、俯仰方向的上下、轴向五个针状波束, 输出信号分为方位差、俯仰差、和信号 3 个信号; 而六单元圆形阵列单脉冲天线只有一个锥状的差波束、一个轴向的和波束两个波束, 输出一个差信号、一个和信号, 差信号中包含了方位和俯仰误差信息。

为了减少接收系统的成本和复杂程度, 在测控领域广泛采用单通道技术, 典型的三通道单脉冲变成单通道单脉冲的技术非常成熟^[1,4], 在分析六单元圆形阵列单脉冲天线工作原理的基础上, 借用单口径多模馈源的双通道变成单通道技术, 首次研究了这种新型圆形阵列单脉冲双通道系统实现单通道的技术途径。对于复杂的单脉冲网络^[2]常常是要利用

七~八位数字移相器,在不同频率下,由接收机实现和差通道相位补偿,本文研制的单通道单脉冲天线是在馈源内部完成一个倍频程的单通道变换,无需接收机补偿相位。

2 天馈系统的组成和工作原理

本圆形阵列单脉冲抛物面天线系统由一个 L/S 双波段单脉冲馈源和一个 3.2m 的抛物面天线组成,其中 L/S 双波段单脉冲馈源由六单元圆形阵列照射器、分波器、波束形成网络、单通道形成网络等部分组成,系统组成框图如图 1 所示。馈源采用六单元宽带单极对数周期天线作为照射器单元,如图 2,照射器单元接收到电磁波信号后,由分波器将电磁波信号分为 L 频段和 S 频段两个频段,分别连接两套独立的馈电网络。在波束形成网络中形成左、右旋圆极化的和、差信号,再经过单通道形成网络调制成单路输出的调制信号。

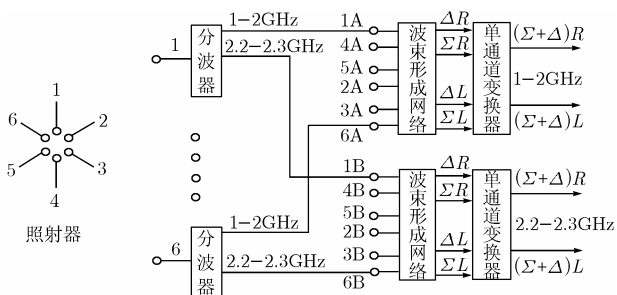


图 1 L/S 双波段单脉冲馈源组成框图

2.1 照射器

L/S双波段单脉冲馈源采用六单元圆形阵列单极对数周期照射器,如图 2 所示。六个单元天线关于 z 轴旋转对称分布,相邻的两个单元之间的空间角度为 60°。设天线单元收到的信号为 $E_i(i=1,2,3,4,5,6)$, E_i 既包括接收信号的幅度信息、相位信息,又包括空间矢量信息。单极对数周期天线^[5-7]是一种超宽带天线,为满足在 L, S 频段内照射器圆极化信号的和波束-10dB 宽度为 110°~130°,差波束零深 30dB 的设计要求,六个单元组成锥形阵列。照射器各单元的驻波测试值在工作频带内均小于 2.5,和波束-10dB 宽度在工作频带内为 120°左右。通过后端网络不同的馈电形式分别形成和波束、锥形差波束。

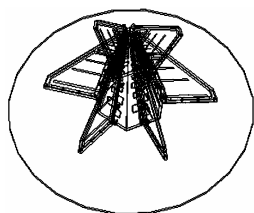


图 2 六单元照射器仿真模型

2.2 分波器

微波分波器就是微波多工器,是用来把覆盖一个频带的射频信号分成几个频带较窄的射频信号的微波器件。一般有定向滤波器级联;多个带通滤波器并联或串联并加入消纳电路调谐;两个互补滤波器组成一个单元,将信号分为两路等方法来实现。这里采用的是近似全互补双滤波器的方法,电路采用悬置微带线形式,如图 3。材料选用 Rogers 公司的 6010 基片,厚度 0.635mm,空气间隔 0.8mm,基片尺寸为 76mm×76mm。分波器的具体测试数据如图 4,图 5 所示。

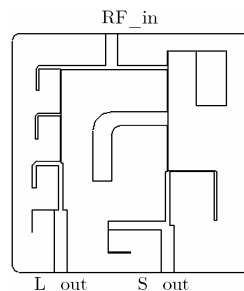


图 3 L/S 分波器电路图

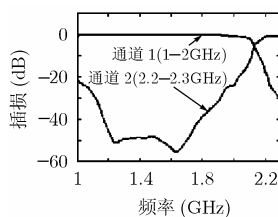


图 4 L/S 分波器传输特性

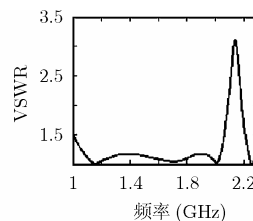


图 5 L/S 分波器 RF_in 端驻波比

2.3 波束形成网络

波束形成网络包括 L 频段和 S 频段的波束形成网络两部分,两部分设计原理是一样的,都包括和差器、波束变换网络和圆极化形成网络 3 部分,如图 6 所示。

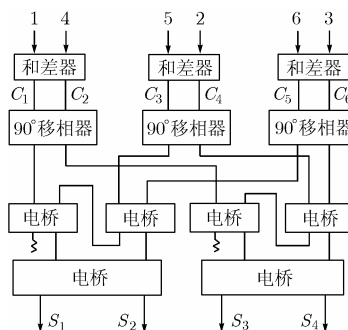


图 6 波束变换网络

照射器的 6 个接收单元接收的信号通过分波器后,进入 3 个和差器形成 6 路和差信号公式(1):

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{\sqrt{2}}(E_4 - E_1), & C_2 &= \frac{1}{\sqrt{2}}(E_4 + E_1)\angle 90^\circ \\ C_3 &= \frac{1}{\sqrt{2}}(E_2 - E_5), & C_4 &= \frac{1}{\sqrt{2}}(E_2 + E_5)\angle 90^\circ \\ C_5 &= \frac{1}{\sqrt{2}}(E_3 - E_6), & C_6 &= \frac{1}{\sqrt{2}}(E_3 + E_6)\angle 90^\circ \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由于相对的照射器单元相位反相, 由式(1)可知, $C_i(i = 1, 3, 5)$ 分别表示相对的两个照射器单元接收信号的和, $C_i(i = 2, 4, 6)$ 分别表示相对的两个照射器单元接收信号的差。这 6 路信号经过 3 个 90° 移相器、4 个 90° 电桥后变成 2 个锥形差波束、2 个和波束。再经过 2 个 90° 电桥, 形成左右旋圆极化和、差信号, 其输出信号记为 $S_j(j=1, 2, 3, 4)$, 经过较复杂的推导, 可以得到其表达式为

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \frac{1}{\sqrt{6}}(E_1\angle 0^\circ + E_2\angle 60^\circ + E_3\angle 120^\circ + E_4\angle 180^\circ \\ &\quad + E_5\angle 240^\circ + E_6\angle 300^\circ) \\ S_2 &= \frac{1}{\sqrt{6}}(E_1\angle 270^\circ + E_2\angle 210^\circ + E_3\angle 150^\circ + E_4\angle 90^\circ \\ &\quad + E_5\angle 30^\circ + E_6\angle 330^\circ) \\ S_3 &= \frac{1}{\sqrt{6}}[(E_1 + E_4)\angle 180^\circ + (E_2 + E_5)\angle 60^\circ \\ &\quad + (E_3 + E_6)\angle 300^\circ] \\ S_4 &= \frac{1}{\sqrt{6}}[(E_1 + E_4)\angle 90^\circ + (E_2 + E_5)\angle 210^\circ \\ &\quad + (E_3 + E_6)\angle 330^\circ] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由式(2)的物理意义可知, S_1 为右旋和信号, S_2 为左旋和信号, S_3 为左旋差信号, S_4 为右旋差信号, 差信号中包含了俯仰误差和方位误差。因此, 六单元自跟踪天线与普通的多口径自跟踪天线不同, 前者的俯仰误差和方位误差合成在一个差通道中, 与圆波导单口径多模馈源类似, 而后的俯仰误差和方位误差是独立的两个通道。

2.4 单通道形成网络

形成左右旋圆极化和、差信号以后, 如何实现单通道调制, 并在接收机中解调出差信号, 将误差信号与目标所在的方位角对应起来是单通道变换器的关键。单通道变换器由数字移相器和耦合器等组成, 选择同一旋向的和、差信号(如: S_1 和 S_4) 进入单通道变换网络, 在耦合器中差信号被叠加在和信号上, 形成单通道调制信号。

将经过耦合器后的单通道信号对和信号进行归一化处理, 得到单通道信号为

$$E = 1 + ke^{j(\beta - \phi + \alpha)} \quad (3)$$

式(3)中的 k 是单通道输出信号中差信号与和信号幅度的比值; α 是数字移相器的固定相移, 在控制信号的一周期内分别取值: $0^\circ, 180^\circ, 90^\circ, 270^\circ$; β 是单通道输出信号中和、差信号相位与理论值的差别造成的相位差, ϕ 是天线方位角。

根据式(3), 单通道信号与控制信号的相位 α 、目标偏离天线轴线的方位角 ϕ 有关, 因此当照射器单元接收来自偏离轴向的电磁波信号时, 产生的误差信号被调制在和信号

上, 经过检波等信号处理, 检出误差信号引导伺服系统完成跟踪。

3 系统调试与测试结果

由前文对馈源工作原理的分析可知, 要使馈源具有良好的性能, 必须保证网络中各个器件、各个功能子网络具有良好的相位特性。天馈系统的调试的主要难点是馈源网络的宽频带相位的匹配。

虽然图 6 中各器件之间用电缆连接, 但是, 由于各器件除了输出端口的相对相位外, 如 90° 电桥输出端口相位差为 90° , 器件本身还有相移, 甚至有些器件还有与电缆随频率的相位变化不同斜率的相位变化, 因此, 通过电缆往往不能在较宽的频带内, 实现复杂网络的相位匹配。根据选用器件类型的不同, 需要在适当的器件之间插入 20° , 40° 等值的宽带移相器, 在馈源内实现和差相位的宽频带匹配, 这样就不需要接收机对馈源内部和差相位进行调整, 简化系统工作的复杂性。

馈源的相位中心必须与抛物面天线的焦点重合, 否则就会散焦, 散焦严重时(散焦幅度大于 λ) 将产生增益的损失、方向图畸变等影响。

由单极对数周期天线的工作原理可知, 随着工作频率的升高, 谐振振子的长度变短, 其有效工作区域逐渐向天线顶端靠近, 相位中心也随之向顶端移动, 所以工作频带内的最高频率和最低频率所对应的相位中心的距离相差较大, 为使天线在整个工作频段内正常工作, 需要调整馈源相位中心与抛物面焦点的相对位置关系。

馈源各部分调试合格后, 安装在口径为 3.2m, 焦径比为 0.38 的抛物面上进行外场测试。收发天线相距 300m, 信号源架设在 18° 仰角的发射塔上, 天馈系统实际测试指标如下。

频率为 1.1GHz, 2.2GHz 时, 和方向图增益分别为 22.9dB, 30.1dB; 3dB 波束宽度为 5.2° , 2.8° ; 第一副瓣电平为 24dB, 18dB; 差方向图零深为 35dB, 40dB; 差方向图分离角为 7.28° , 3.8° ; 和、差方向图见图 7, 图 8。

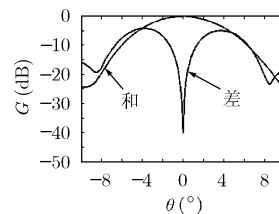


图 7 1.1GHz 和差方向

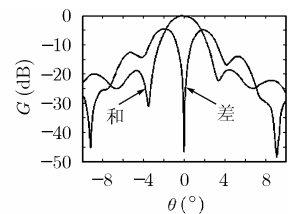


图 8 2.2GHz 和差方向

4 馈源结构集成化设计

馈源由一套照射器、一套分波器、两套波束形成网络、

两套单通道形成网络以及 LNA 等组件组成, 涉及十几个器件、70 余根配相电缆, 网络复杂, 为了降低馈源本身的遮挡影响, 需要尽量减小馈源本身的体积和截面面积。在设计时, 采用一体化设计, 将多个微波部件设计在一个结构中, 减少器件之间的连接电缆, 优化各器件之间的位置关系, 合理利用有限的结构空间。设计成功的馈源网络体积为 $\Phi 360\text{mm} \times 230\text{mm}$, 含天线罩的体积为 $\Phi 400\text{mm} \times 566\text{mm}$ 。

5 结束语

本文研究了六单元圆形阵列单脉冲天线这一新型跟踪天线的工作原理, 结果表明六单元单脉冲自跟踪天线与传统的多口径单脉冲自跟踪天线具有很大的区别, 与圆波导单口径多模喇叭单脉冲自跟踪天线相似。采用数字移相器, 将双通道合成为单通道, 减少了系统成本和设备量。

采用六单元单极对数周期天线组成圆形阵列照射器, 设计了一个 $1\text{GHz} \sim 2\text{GHz}/2.2\text{GHz} \sim 2.3\text{GHz}$ 双频段双圆极化单通道单脉冲抛物面天线系统。该天线具有良好的性能指标, 在整个工作频段内实现了自跟踪工作, 验证了分析的正确性。

参 考 文 献

- [1] 张凤林, 李鹏程. S 波段 5 米遥测自跟踪天线. 航天国防科学技术报告, HT-19980791.
 - [2] Lee Kuan Min. Design and analysis of a multimode feed horn for a monopulse feed. *IEEE Trans. on Antennas Propag.*, 1988, 36(2): 105-106.
 - [3] Johnson R C. *Antenna Engineering Handbook*. New York, McGraw-Hill, Inc. Third Edition, 1993, Chapter 40:13-14.
 - [4] Sullivan A. QUADRASCAN a state-of-the-art monopulse antenna feed. International Telemetry Conference, San Diego, 1987:631-640.
 - [5] 肖开奇. 单极对数周期天线阵. 电子对抗技术, 1991, 6(2):21-27. Xiao Kai-qi. Monopole log-periodic antenna array. *Electronic Warfare Technology*, 1991, 6(2): 21-27.
 - [6] Athanasas T J and Ingeron P G. Log-periodic arrays with split delay-line feeds. *Antennas and Propagation Society International Symposium, Philadelphia*, 1986:765-768.
 - [7] 丁晓磊. 超宽带单极对数周期天线的研制. 遥测遥控, 2005, 26(增刊):1-4. Ding Xiao-lei. Design of an ultra side band log-periodic monopole array. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2005, 26(Supplement): 1-4.
- 张凤林: 男, 1964 年生, 研究员, 从事卫星导航、测控、雷达等天线的研制。
- 刘玉杰: 男, 1975 年生, 工程师, 从事卫星导航、测控天线的研制。
- 丁晓磊: 女, 1971 年生, 高级工程师, 从事测控、雷达等天线研制。
- 陈 剑: 男, 1979 年生, 工程师, 从事测控等天线的研制。