

# 卫星通信用四波束有源相控阵方案

张永鸿<sup>1</sup>, 冯正和<sup>1</sup>, 许会玲<sup>2</sup>, 唐小宏<sup>3</sup>

(1. 清华大学微波与数字通信国家重点实验室 北京 100084;

2. 陕西凌华电子有限公司 陕西 宝鸡 721006; 3. 电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**【摘要】**针对人们对大容量移动通信的要求,提出了一个地球静止通信卫星用的毫米波四波束直接辐射有源相控阵方案。通过选择商品化的元器件,并立足于国内工艺条件,得到的方案有721个单元,单元间距3倍波长。设计最大增益47 dB,输出功率约140 W,噪声系数小于4.5 dB。

**关键词** 卫星通信; 相控阵; 多波束; 相位校正  
中图分类号 TN927 文献标识码 A

## Scheme of 4-Beam Active Phased Array Antenna for Satellite Communication

ZHANG Yong-hong<sup>1</sup>, FENG Zheng-he<sup>1</sup>, XU Hui-ling<sup>2</sup>, TANG Xiao-hong<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory on Microwave & Digital Communications, Tsinghua University Beijing 100084;

2. Shanxi Linghua Electronics Co. LTD. Baoji Shanxi 721006;

3. School of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** Millimeter wave multibeam active phased array antenna, with broad bandwidth, high gain and controllable beams, has attracted more attention. Based on commercial devices and domestic process conditions, an active phased array scheme for geostationary satellite communication is proposed. In the scheme, direct radiation antennas and four electronically reconfigurable pencil beams are included. The phased array with 721 elements and element spacing 3 times of wavelength is presupposed to achieve 47 dB gain, 140 W output power and less than 4.5 dB noise figure.

**Key words** satellite communication; phased array; multibeam; phase calibration

国外已有几个星载毫米波有源相控阵项目在研制之中,其发射频率在K波段,接收频率在Ka波段。文献[1]报道了雷声公司为美国国家航空航天局研制的双波束相控阵,将用于低轨道卫星通信,计划于2000年完成,并在2001年进行相关试验。文献[2]报道了德国为欧洲太空署(ESA)研制的四波束相控阵,也用于低轨道卫星,属于ARTES-3多媒体项目的内容之一,目前完成子阵演示试验。对地球静止卫星,仅有日本Gigabit项目在研<sup>[3]</sup>,已完成含64个单元的四波束子阵试验。

国内地面系统中,相控阵天线已有应用,但仅限于微波低端,Ka波段的相控阵系统尚未应用。星载天线中,相控阵还是空白。因此,对星载多波束有源相控阵进行探讨具有重要的意义。

毫米波多波束相控阵中,由于阵元间距小,成本高,其关键是采用尽可能少的阵元,研制宽带工作的元部件、MMIC器件,以及高密度封装技术,从而达到体积小,重量轻。本文立足于商品化的元器件,以及国内的加工条件,提出了一个地球静止卫星通信用的多波束有源相控阵方案,其下行频率在K波段,上行频率在Ka波段,各波束的最大辐射方向、功率、带宽或容量都能独立控制。考虑到Ka波段阵元间距小,以及各部件体积限制和方案的复杂性,最后选用四个波束。

## 1 系统组成

该系统由辐射系统、相控单元、馈电网络和波束控制组成。发射系统如图1所示,接收系统框图类似,

收稿日期: 2004-12-22

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目

作者简介: 张永鸿(1971-),男,博士,副教授,主要从事微波毫米波技术及其应用方面的研究。

只是信号传输方向相反。

### 1.1 辐射系统

可用的辐射方案有3种：直接辐射、相控阵馈电单反射面和相控阵馈电双反射面。在相同增益条件下，直接辐射相控阵的优点是阵元间距大，系统结构易于布局，扫描损失小；缺点是单元数多，成本高。反射面方案的优点是阵元数少；缺点是阵元间距小，系统结构难以布局，扫描损失大。单反射面的扫描损失最大，一般不用。双反射面方案的扫描损失居中，但因毫米波波长短，单元间距小，而且要达到所需的辐射功率，单元输出功率大，热耗集中，热控问题突出，目前也少有采用。

地球静止卫星的对地视角为 $\pm 8^\circ$ ，为保证在扫描范围内不出现栅瓣，同时尽可能加大阵元间距，以减少阵元数，设计选取阵元间距为3倍波长，呈正三角形排列；整个阵成正六边形排列，可以在一定程度上减小副瓣及栅瓣；扫描范围外的栅瓣可用高增益的喇叭来抑制。为方便结构上的实现，采用分层排列。若天线效率取70%，为达到最大增益47 dB，天线最宽的层应有31个单元，共721个单元。图2是单元馈源波导口的排列图。阵元周围可以增加一些不馈电的天线单元，以保证馈电的阵元方向图相同。

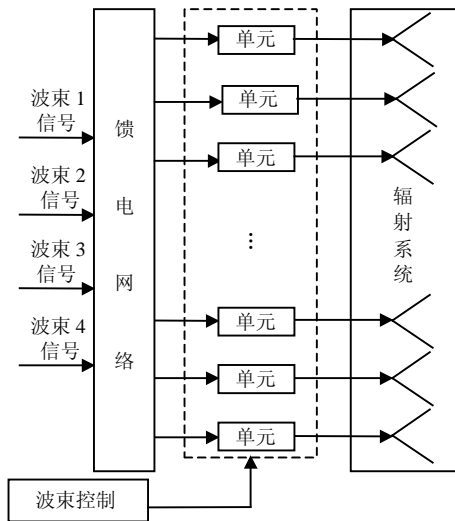


图1 发射系统框图

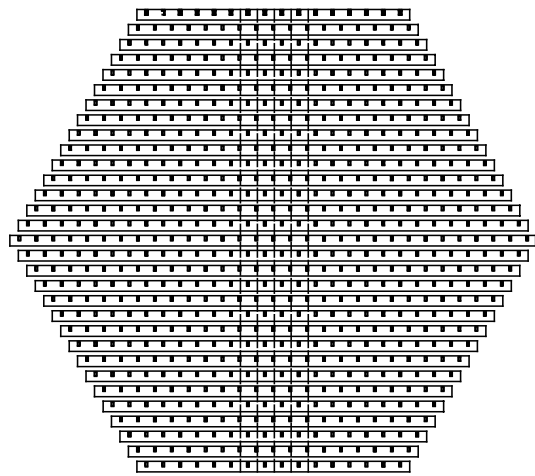


图2 直接辐射相控阵馈源排列图

### 1.2 单元结构

相控单元是整个相控阵的核心部分。发射和接收框图分别如图3和图4所示。各波束信号没有交叉，且器件体积小，可以并行排列。在发射单元中，各波束信号没有加放大器，一方面是为了减少放大器个数，另一方面是为了采用输出功率小的器件，最终减小功耗。在接收单元中，各波束信号都加有放大器，是为了减小后级电路的噪声对系统的影响；同时又能减小单个放大器的增益，提高稳定性；尽管放大器数量多，但低噪声放大器的功耗小，对系统热耗影响不大。

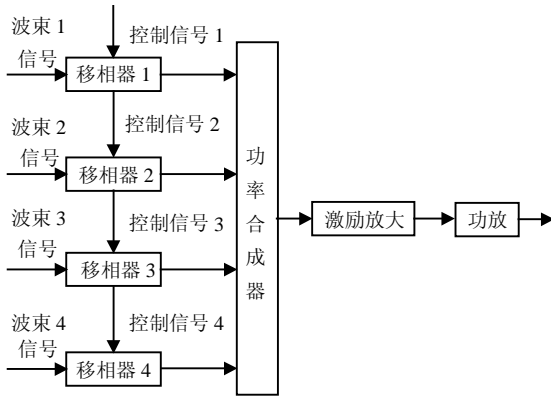


图3 发射单元框图

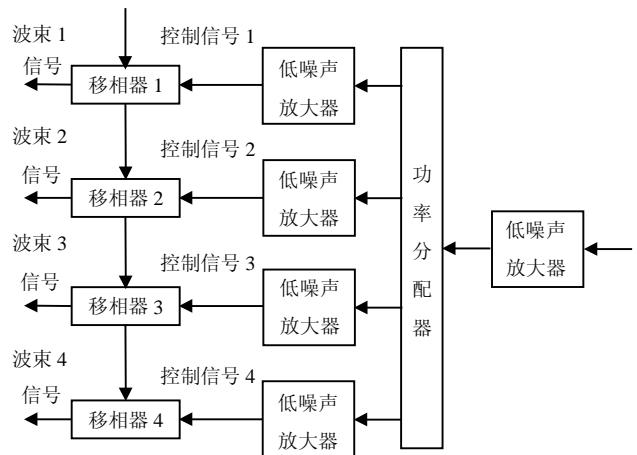


图4 接收单元框图

### 1.3 馈电网络

馈电网络包含层间馈电、层内馈电。层间馈电网络的位置见图2中的虚线。对Ka波段的接收来说,它是把来至于各层的信号合成后输出,每个波束信号对应一个网络,共四个相同的网络。对K波段的发射来说,它是将待发送的每个波束信号经放大、功分和延迟后分配到各层中,也有四个相同的网络,层间馈电网络如图5所示。从图中可见,在第一级和第四级功分前加有放大器,是为了补偿传输损耗;采用功放是利用它的高效率,减小功耗。接收部分的层间馈电网络与图5类似,只是不含放大器。

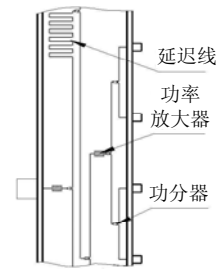


图5 层间馈电网络

层内馈电网络与层间馈电类似。由于体积限制,采用分层结构,每波束信号一层,共四层。其输入输出在同一层,层与层之间的连接用同轴传输线。在同轴线与微带线连接处有不连续性,应进行匹配。

### 1.4 波束控制

波束控制包括各波束的最大辐射方向、功率、带宽或容量的控制,这些控制由地面发出指令。功率和带宽的控制容易进行。移相控制的示意图如图6所示,每个单元带译码器和控制器各一个。波束合成数据存储器中存储对应各个波束及其指向的移相器每个位的状态信息;单片机根据转送的波束指向指令,从存储器中读取数据,并传送给译码器和控制器;然后由译码器根据移相器的位置选择数据并由控制器传递给移相器各个位,产生需要的相移。为了减少系统与各单元的控制线,采用串行口连接。各层的数据线可以连在一起,从层间的空隙穿出,再合在一起与系统单片机相连。

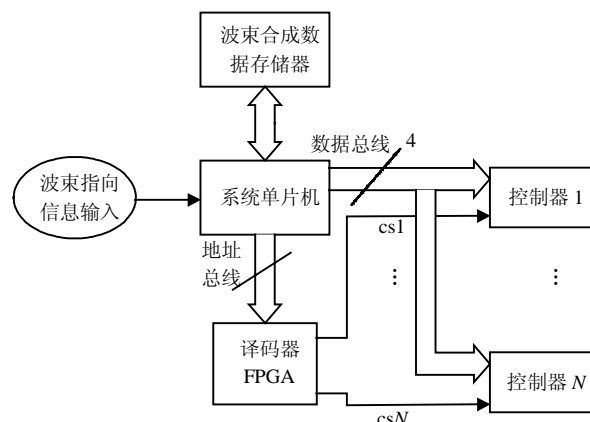


图6 移相控制框图

## 2 关键技术

### 2.1 宽带技术

毫米波的优点是带宽宽,只有有效地提高毫米波相控阵系统的带宽,才能发挥毫米波的优势,提高系统速率和容量。本系统中的元器件,如功率分配器(功率合成器)、放大器和喇叭天线等,带宽都比较宽。其带宽主要受限于移相器和馈电网络。

在相控阵中,最大辐射方向的仰角 $\theta = \arccos(\alpha/\beta d)$ ,其中 $\alpha$ 和 $d$ 分别为阵元间的相位差和距离; $\beta$ 为相位常数。如果相移量 $\alpha$ 为常数,则 $\cos\theta$ 与频率成反比,也就是说最大辐射方向与频率有关。当工作频带较宽时,最大辐射方向随频率的变化很大。为了使最大辐射方向与频率无关,应使 $\alpha/\beta$ 为常数,即 $\alpha/f$ 为常数。也就是说,相移量与频率成正比关系。满足这个要求的只有开关线移相器,又称为实时延移相器。它可由两个单刀双掷开关控制,选择两条传输路径中的一条,两路径的电长度之差就是相移。

相控阵馈电有串馈和并馈两种。串馈时各阵元信号对应的传输路径不同,在天线阵孔径上将产生由馈电引起的相位误差,该误差又会使波束指向产生偏离。并馈可以使该误差大大减小。本方案中采用了并馈,且对馈电网络中对应不同单元的输出信号增加了延迟线,保证了系统的带宽,如图5所示。

### 2.2 相位校正

由于器件、加工工艺、结构等多方面的原因,各阵元的相位和幅度是不同的。为了达到天线所需的最大辐射方向、旁瓣电平等性能,有必要对各阵元进行校正。天线阵在进行波束扫描时,各阵元移相器所需的相移是不一样的,移相器的实际相移和所需相移也有一定差别。为了获得所需的波束扫描特性,也有必要了解移相器的实际相移,以便在天线方向图综合中加以考虑。

相位校正已有不少方法可以进行,但这些方法往往只适用于地面设备校正<sup>[4]</sup>。对星载天线,必须采用在

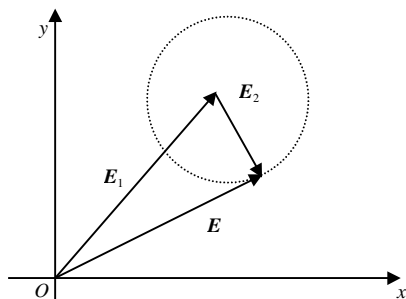


图7 旋转电场矢量测试法示意图

轨校正。

本系统拟采用旋转电场矢量法(Rotating Element Electric-field Vector Method, REV)进行测量<sup>[5]</sup>, 其原理如图7所示。 $E_1$ 为参考阵元的电场矢量,  $E_2$ 为待测阵元的电场矢量,  $E$ 为其合成矢量。当逐渐改变待测阵元的相移量时, 合成矢量成周期性变化。测出各种相移量时合成矢量的大小, 作为一组数据。再取另一个阵元, 按上述方法, 互为参考测出另外两组数据。进行数据处理后就能求出阵元的幅度比值以及各相移量时的相位差。

以此类推, 可以测出所有阵元的幅度比值和相位差。当传输路径随机变化时, 可用多次测试的方法来减少误差。当传输路径非随机性变化时, 测出的电场幅度不准确, 但相对幅度和相位差是准确的。因此, 这种方法适合卫星在轨校正。

卫星在轨校正时, 由于待测阵元和参考阵元功率(接收或发射)只占整个天线阵很小的一部分, 测试系统可能难以分辨, 因此实际中应采用子阵而不是阵元进行校正, 子阵内的阵元按一定规律旋转也能得到各阵元的幅度和相位<sup>[6]</sup>。由于器件老化、温度变化等因素, 各阵元的幅度和相位也会变化。当变化累积到一定程度时, 需要重新校正, 因而卫星在轨校正非常重要。上述方法也可用于阵元的故障诊断。

### 3 系统指标

接收部分中, 通道增益约26 dB, 从馈源口计算的总噪声系数约2.3 dB, 功耗约610 W。发射单元中, 增益约20 dB, 功耗2.46 W; 馈电网络增益约10 dB, 功耗约770 W。整个发射部分通道增益30 dB, 功耗约2 550 W, 输出总功率约220 W。

天线阵尺度为93倍波长, 如收/发频率为30/20 GHz, 则尺度为0.93/1.4 m。天线增益47 dB对应波瓣宽度 $0.65^\circ$ 。预计天线的馈电损耗约2 dB, 则输出总功率约140 W, 而噪声系数小于4.5 dB。

### 4 结束语

本文采用商品化的元器件, 以国内加工条件为基础, 提出了一个地球静止卫星通信的毫米波四波束有源相控阵方案。由于波束数较多, 功耗偏大, 热控问题有待进一步研究。

#### 参 考 文 献

- [1] Watson T, Miller S, Kershner D, et al. Design of a K-band transmit phased array for low earth orbit satellite communications[C]// IEEE Phased Array Systems and Technology, Proceedings, California, USA, 2000: 211-214.
- [2] Butz J, Spinnler M, Christ J, et al. Highly integrated RF-modules for Ka-band multiple-beam active phased array antennas[C]// IEEE MTT-S Digest, Seattle, WA, USA, 2002, 61-64.
- [3] Shiro Kitao, Hiromasa Nakaguro, Rumiko Yonezawa, et al. A consideration on Ka-band active phased array antenna for gigabit satellite[C]// 17th AIAA International communications satellite system conferring and exhibit, Yokohama, Japam, 1998: 270-278.
- [4] 文树梁. 一种有源天线阵通道幅相误差检测与校正技术[J]. 系统工程与电子技术, 1995, 7: 17-22.
- [5] Mano S, Regular T K. A method for measuring amplitude and phase of each radiation element of a phased array antenna[J]. Electronics and Communication in Japan, 1982, 5: 58-64.
- [6] Zheng Yuliang, Zhang Yonghong, She Jingzhao, et al. A remote calibration method based on amplitude measurement for large active phased array antenna[C]. 2003 Asia-Pacific Microwave Conference, Seoul Korea, 2003: 750-753.

编 辑 刘文珍