

星载多波束相控阵馈电反射面天线研究

杨 涛¹, 李 磊¹, 邹永庆²

(1.中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽 合肥 230088 ;

2.中国电子科技集团公司电子科学研究院, 北京 100041)

摘要: 星载多波束天线是解决卫星大容量高速率通信业务需求的主要手段之一, 多波束天线被广泛应用于各种卫星通信系统。对星载相控阵多波束天线、透镜多波束天线、常规反射面多波束天线和相控阵馈电反射面多波束天线等多种形式的天线进行分析, 提出一种新型相控阵馈电反射面多波束天线, 给出相应的设计方法, 并研制原理样机进行验证。该天线具有收发共口径、阵列规模小, 成本低, 波束数量可扩展、可快速捷变, 功率动态调用效率高, 与平台适装性好等特点。相比二维相控阵天线体制, 该天线可实现更多的波束数量; 相比反射面多波束天线, 又能实现全部波束的捷变扫描以及阵面功率93%~97%的集中调用能力。

关键词: 反射面天线; 多波束天线; 相控阵; 低成本

中图分类号: TP957

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022016

Research on Spaceborne Multi-Beam Phased Array Fed Reflector Antenna

YANG Tao¹, LI Lei¹, ZOU Yongqing²

1.The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China

2. China Academic of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China

Abstract: Spaceborne multi-beam antenna is one of the main means to meet the needs of high-capacity and high-speed satellite communication services, and is widely used in various satellite communication systems. Various forms of antennas, such as spaceborne phased array multi-beam antenna, lens multi-beam antenna, conventional reflector multi-beam antenna and phased array fed reflector multi-beam antenna were introduced. Here, a novel phased array fed reflector multi-beam antenna was demonstrated, the corresponding design method was given, and the prototype was developed and verified. The proposed antenna has the characteristics of transmitting and receiving common aperture, small array size, low cost, scalable beam quantity, fast agility, high dynamic deployment efficiency as well as good platform adaptability. Compared with the two-dimensional phased array antenna system, the antenna could achieved more beams. Compared with the multi-beam reflector antenna, it could also realized the agility scanning of all beams and the centralized call ability of 93%~97%.

Keywords: reflector antenna, multi-beam antenna, phased array, low-cost

0 引言

卫星通信具有覆盖范围广、传输距离远、组网灵活迅速等优点, 能够实现对海洋、山区和高原等地区近乎无缝的覆盖, 满足各类用户对通信覆盖的需求, 因此具有重要的商用价值。

卫星研制周期长、成本高, 同时由于卫星在轨期间市场变化越来越难以预测, 因此希望对卫星的功率、频

谱、覆盖范围、带宽等资源进行灵活使用和优化, 必要时可根据用户需求的变化进行重构。

采用可灵活调节的柔性数字转发技术及具有多个可灵活调度波束的高性能天线技术, 可以对入轨后的卫星按需进行参数化配置, 实现覆盖、容量、路由、频率等不同维度的灵活应用, 满足不同场景的需求。因此, 具有可灵活调度的多波束高性能天线是实现高性能灵活通

信的关键点之一。

卫星多波束天线根据结构形式大致可分为直射式、透镜式、反射式3种基本形式的多波束天线。

直射相控阵式多波束天线由多个辐射阵元排阵构成,由波束成形网络向阵元激励所需的幅度和相位,以形成不同形状的赋形波束。该多波束天线的优点是可对波束数目和形状进行灵活控制,并可控制波束做快速扫描,当少量T/R组件失效时,并不会对相控阵天线的性能产生太大影响;缺点是结构复杂,造价高昂。目前星上采用有源T/R组件的案例并不多。

透镜天线是几何光学原理在无线电频率范围的一种应用,多波束透镜天线的优点在于有更大的设计自由度,具有很好的旋转对称性,保留了良好的光学特性,无口径遮挡。但这类天线在低频段具有重量大、损耗大等致命缺点,导致其在星上应用严重受限,欧洲航天局近年来正在对离散透镜天线开展研究,研制了一种Ka频段的有源离散透镜天线。该天线阵元采用内置固态微波放大器的有源透镜,并使用非周期性排布方式。但该天线的辐射效率仅15%,大部分的能量被转化成热能,这使得散热难成为该天线的严重问题。

相比直射式、透镜式多波束天线,反射面多波束天线具有结构简单、加工技术成熟、增益高、成本低廉、波束数量多等优点,在固定多波束覆盖通信中得到广泛应用。反射面多波束天线的馈源通常由多个馈电单元组成,其波束成形方式可分为基本型成束法和增强型成束法两类。

基本型成束法体制利用每束单馈源(Single Feed per Beam, SFB)实现多波束,是一种最直接最简单的成束方式,其每个从天线口径中辐射出来的点波束都是由一个特定的馈源照射一块反射面形成的。该方案最大的优点就是辐射效率高,便于同时生成较多的点波束,馈电方便,相邻波束间具有较好的共极化和交叉极化特性,并且可以收发共用。这种成束方案的主要缺点在于,所需要的反射面数量多,在通过多块反射面来实现多色复用,需要在卫星表面占据较大的空间,对安装精度和异步展开精度要求高,而波束指向性却相对差,并且难以实现波束重构和波束灵活、波束覆盖区域自适应赋形等。

增强型成束法体制利用每束多馈源(Multiple Feed per Beam, MFB)实现多波束,一般选择馈源阵列排布形式,通过波束成形网络向阵列单元激励所需的振幅和相位,以形成不同形状的多波束,单个反射面便能实现波束间的隔离和波束赋形。

其优点是便于对波束数目和形状进行灵活控制,对于不规则区域的覆盖具有明显优势,只要两个及以下反射

面就能分别实现对数据的收发,节约卫星表面空间,安装相对方便。增强型成束法体制有两点局限性:一是MFB在形成相同点波束覆盖的情况下,所需要的馈源单元数量通常是SFB所需的数倍,尤其是在点波束分布比较分散的情况下,MFB需要的馈源单元数量将更大,使馈电网络复杂得多;二是功率调配能力有限,为实现周围射频通道的功率调配,多端口放大器波导管布局两维交错。

相控阵馈电反射面(PAFR)天线巧妙地结合了反射面与相控阵的优点,而且摒弃了二者的若干缺点。相控阵馈电反射面具有显著的技术优势:每个反射阵元的相位独立可控,设计自由度大,具备波束快速捷变、赋形能力,相控阵阵列规模小、成本低,因此国内外多家机构对相控阵馈电反射面天线进行了广泛研究。

1 相控阵馈电反射面天线

相控阵馈电反射面天线是以小型相控阵天线作为馈源的反射面天线。该天线系统基于光学原理,利用反射面将初级馈源阵口径进行放大,从而获取比初级馈源阵更高的增益和更窄的波束,因此该天线是一种兼具相控阵天线的灵活性和反射面天线低成本特点的高性价比的天线形式,可以在满足天线增益要求的同时实现有限角度的快速扫描以及多波束工作。

根据国内外相关文献的报道,相控阵馈电反射面天线主要包括具有二维电扫描功能的共焦相控阵馈电反射面天线和聚焦相控阵馈电反射面天线,以及具有一维电扫描功能的相控阵馈电反射面天线等形式。

1.1 共焦相控阵馈电反射面天线

共焦相控阵馈电反射面天线包括相控阵馈源及一对具有不同焦长及口径的偏置反射面天线,且两个反射面的焦点位置重合。反射面的形式可以为抛物面、椭球面等形式,反射面天线为抛物面时的原理如图1所示, D 主面、 D 副面、 D 相控阵分别为主副反射面及馈电相控阵的投影口径, F 主面、 F 副面分别为主副反射面的焦距。

相控阵辐射的近似平面波经过反射面的两次反射后,实现了两次傅里叶变换,即副面把平面波聚焦到焦点形成球面波,而球面波再次照射主面形成平面波。由于这种镜像关系,馈源阵面口径场分布在放大的主反射面口径上成比例地再现,于是形成了比直射阵更窄的高增益点波束,并可以通过对阵列加权实现等效的主面口径加权从而得到需要的扫描远场方向图。

共焦相控阵馈电反射面天线的孔径放大系数 M 、天线的增益 G 为

$$M = D_{\text{主面}} / D_{\text{相控阵}} = F_{\text{主面}} / F_{\text{副面}} \quad (1)$$

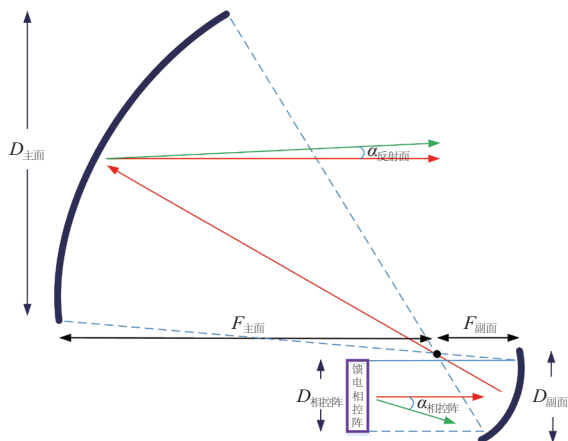


图1 共焦相控阵馈电反射面天线为抛物面时的原理

$$G = \eta M^2 G_a \quad (2)$$

式中， G_a 为相控阵馈源的孔径增益， M 为口径放大系数， η 为天线效率。

馈电相控阵所需的扫描角 $\alpha_{\text{相控阵}}$ 与反射面天线实现的扫描角 $\alpha_{\text{反射面}}$ 之间的关系为

$$\alpha_{\text{相控阵}} = M \alpha_{\text{反射面}} \quad (3)$$

一般希望口径放大系数 M 尽量大，从而降低相控阵馈源的尺寸及规模。一方面，口径放大系数 M 增大时，相控阵馈源的扫描角也需要相应增大，从而造成天线的扫描损失变大、副瓣电平增加、散焦严重等问题；另一方面，口径放大系数 M 较小时，虽然波束性能的恶化减小，但是此时副反射器的尺寸相对于主反射器的尺寸太大，与平台的适装性等方面存在问题。因此，设计时，一般折中选取口径放大系数 M 为2.5~3.5。

共焦相控阵馈电反射面天线由于其口径放大作用，获得了较高的增益并减小了阵列尺寸，且结合相控阵馈电扫描，可实现波束的无惯性捷变。虽然其增益不如传统的正馈抛物面天线高，也不如常规的直射阵扫描角度大，但其适合应用于高轨卫星通信，是高增益有限扫描较好的折中方案。

1.2 聚焦相控阵馈电反射面天线

聚焦相控阵馈电反射面天线同样由相控阵馈源和反射面天线组成。与共焦相控阵馈电反射面天线不同的是，聚焦相控阵馈电反射面天线的相控阵馈源位于焦散区，即将馈源阵列从焦平面向反射面方向移动一定距离，通过调整馈源阵列各单元的激励系数，使其等效为焦平面上的一个或多个虚拟馈源，实现二次聚焦作用。馈源从焦平面向反射面方向移动一定距离后，馈源所需匹配的波前是汇聚式的，振幅变化较小，通过调整馈源

阵列幅相分布可进行波束扫描或重构。

聚焦相控阵馈电反射面天线可以采用单反射器或双反射器构型。聚焦相控阵馈电反射面天线示意如图2所示。

与共焦相控阵馈电反射面天线一样，聚焦相控阵馈电反射面天线可以采用相对比较简单馈电阵（与直射相控阵比较）获得较高的增益，具有重量轻、收拢体积小、成本低等特点。使用这种聚焦馈源反射面天线，能够灵活实现有限视角范围内的多组笔状或扇形波束、连续扫描波束，以及赋形波束等，是卫星通信系统的优选方案之一。

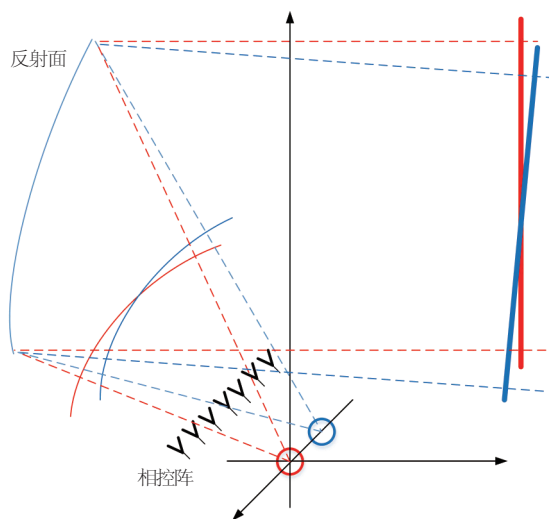


图2 聚焦相控阵馈电反射面天线示意

1.3 一维电扫描相控阵馈电反射面天线

共焦、聚焦相控阵馈电反射面天线均可以实现二维扫描，但是为了保证可以接受的扫描后的天线性能，其放大系数一般有限（典型值为3）。因此其馈电相控阵规模仍比较大，成本仍比较高。

为了进一步降低成本，在一些仅需部分柔性的应用场景，采用堆积的一维扫描相控阵线源馈电的双曲反射面天线结构是一种可行的解决方案。

一维电扫描相控阵馈电的双曲反射面天线示意如图3所示。双曲反射面天线的一个面如同聚焦相控阵馈电反射面天线一样在该面对一维扫描相控阵线源进行放大，双曲反射面天线的一个面如同常规反射面天线一样对相控阵线源进行光学放大。

采用9个相控阵线源馈电的一维电扫描相控阵双曲反射面天线在扫描方向可实现 $\pm 4^\circ$ 的波束扫描且增益仍在可接受的范围内；在线源堆叠方向，天线增益随覆盖角度的变化较小。

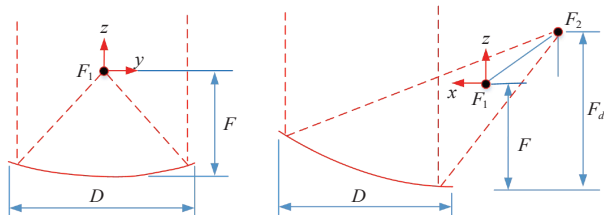


图3 一维电扫描相控阵馈电的双曲反射面天线示意

2 新型相控阵馈电反射面

是否选择采用相控阵馈电反射面天线架构时,需考虑的主要因素如下。

- (1)系统射频性能:包括电扫描范围、EIRP、G/T、波束宽度、副瓣等。
- (2)与平台的适装性:包括机械接口、收拢/展开的体积/包络等。
- (3)与平台的电接口:包括射频接口、控制/数据接口、电源接口等。
- (4)机械/环境设计:包括振动、热、辐照环境等。
- (5)参数:体积、重量、功耗,以及成本等。

共焦相控阵馈电反射面天线需两个以上的反射面,在允许工作视场外出现栅瓣的条件下,系统相控阵单元数量并未减少,系统复杂度和成本依然较高;聚焦相控阵馈电反射面天线为实现相控阵波束扫描,相控阵位置偏焦,造成扫描范围小,扫描损失大;一维电扫描相控阵馈电反射面天线在覆盖区域存在盲区,无法达到区域全覆盖。

为此,提出一种成本适中的更加灵活的宽带卫星通信多波束天线,该系统由反射面和两套一维堆积相控阵组成,如图4所示。

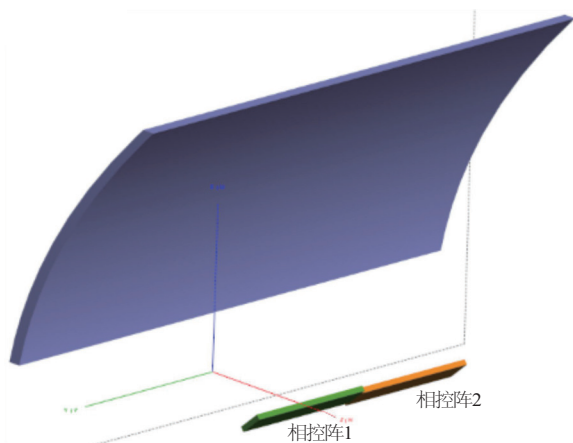


图4 系统组成模型

该天线相比大规模平面相控阵、MFB多波束天线和相控阵馈电反射面天线,具有以下优点。

(1) 相比多波束相控阵和PAFR,阵面规模缩小,波束数量多

由于采用的是反射面和堆积相控阵形式,利用反射面天线的放大作用,极大降低了相控阵馈源的规模。根据覆盖范围的需要,可以降低到相控阵1/3以上的规模,有效降低了系统复杂度和成本。

多波束相控阵受限于单元间距的影响,TR组件的尺寸受到限制,无法实现收发几十上百个波束,而利用反射面和堆积相控阵形式,在较小的馈源规模下可实现收发各上百个波束。

(2) 波束可大角度捷变,功率调度效率高

一维相控阵馈源可以通过控制每个单元幅相,实现波束的快速一维大角度捷变,因此在覆盖区域中,所有波束均可达,且相比多馈源多波束天线扫描损失小。

在相控阵中集成了多端口放大器,实现波束间功率动态调配。在每个相控阵馈源阵中,通过多端口放大器和空间功率合成,实现相控阵100%功率自由调配到任意一个波束中,提高该波束对热点区域的通信能力,而多馈源多波束天线仅能调用局部波束成形网络有限的功率。

(3) 易于实现收发共口径

在多馈源多波束天线中,为了实现馈源复用,发射波束成形网络内部相互正交馈电,使得接收网络空间受限,不易于实现收发共口径。

本系统发射馈电网络在多端口放大器实现上仅存在纵向正交耦合,横向有充足空间集成接收多波束网络,便于收发共口径高集成设计,相比收发分置,收发共口径占用的面积是收发分开的一半,重量轻1/3,在占用相同的面积时,收发共口径的EIRP和G/T指标较收发分开可提升2倍以上。

(4) 易于实现载荷平台一体化

系统的小型化使得装备易与平台一体化设计,无须大型的塔架结构或者展开机构便可进行装配,具有很好的适装性,相控阵馈源内嵌入平台西面板,提升系统刚度质量比,节省空间,同时利于热量及时、高效地传输到卫星散热面。

2.1 相控阵馈电反射面天线基本原理

相控阵馈电反射面天线由反射面器、相控阵1和相控阵2组成,每个阵列均由多行线阵组成。由于馈源阵偏焦,可以形成俯仰多波束覆盖,两个相控阵位置交错布置,实现波束空域上相互交叠覆盖,避免俯仰方向出现盲区。相控阵每行线阵由多套可扩展模拟波束成形网络

构成,形成方位多波束,原理如图5所示。

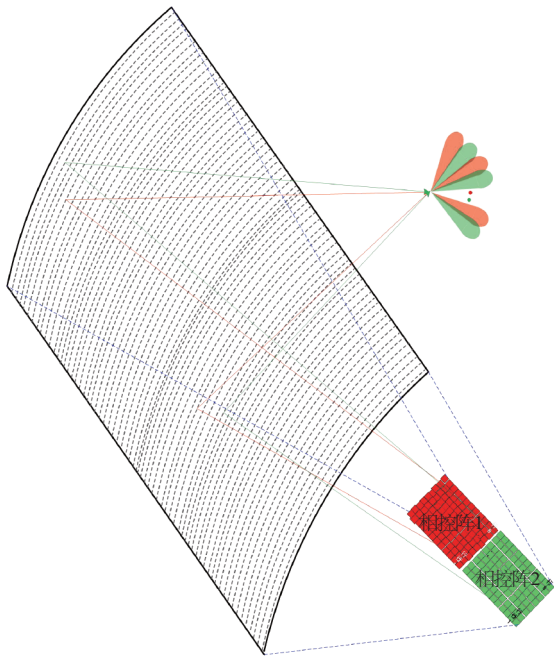


图5 相控阵馈电反射面天线多波束成形原理示意

由反射面偏焦扫描原理可知,当馈源的位置发生横向偏焦时,反射面的口径场相位会同时出现线性偏差与立方律偏差。这两种偏差合成在一起会使辐射主瓣的最大方向向相反方向偏离一定的角度,相控阵横向偏焦引起波束扫描,在俯仰方向形成波束覆盖,方位方向相控阵波束扫描。扫描原理如图6所示。

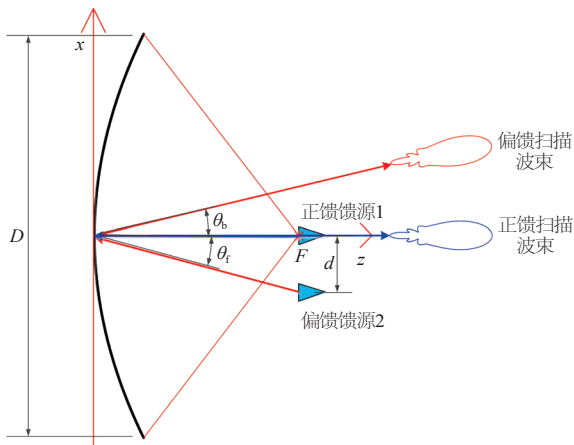


图6 反射面天线波束扫描原理

不同的偏焦距离 d ,实现波束不同角度覆盖,偏焦距离与扫描角度之间的关系如下。

$$\theta_b = \arctan(d/F) \times \text{BDF} \quad (4)$$

$$\text{BDF} = \frac{\theta_b}{\theta_f} \approx \frac{1 + X \left(\frac{D}{4F} \right)^2}{1 + \left(\frac{D}{4F} \right)^2}, \quad X = \begin{cases} 0.3, & T > 6 \\ 0.36, & T \leq 6 \end{cases} \quad (5)$$

其中, θ_b 为波束指向角, θ_f 为馈源偏转角, T 为馈源在反射面边缘的照射电平, BDF为波束偏移因子。

相控阵采用三角形布阵,两个相控阵之间相互交互排列。布阵形式如图7所示。

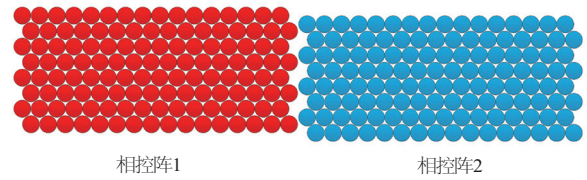


图7 相控阵布阵形式

馈源阵经过反射面后,在空间形成次级波束,两个子阵相互交错放置,实现俯仰方向空域覆盖,避免出现盲区。相控阵扫描方向,通过控制每个单元的相位,实现任意角度扫描,相控阵每行集成了收/发可扩展的多套波束成形网络,可以形成多个收发波束。图8为馈源阵在覆盖区域的多波束成形情况。

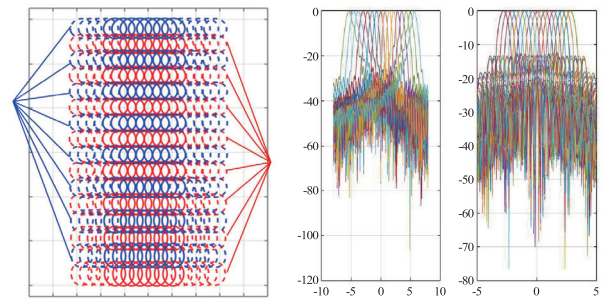


图8 馈源阵在覆盖区域的多波束成形情况

2.2 反射器

反射面天线主要组成是反射器。反射器主要有反射面口径 D 、焦距 F 、偏置高度 H 、反射面长度 L 等关键参数。

(1) 反射面口径 D

根据反射面波束宽度和方向性系数的预估公式

$$2\theta_{0.5} = (65^\circ \sim 80^\circ) \lambda / D \quad (6)$$

$$\text{Directivity} = 4\pi \left(\pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right) e_A / \lambda^2 \quad (7)$$

其中, λ 为工作波长, Directivity为方向性系数, e_A 为口径效率。

间穿插接收波束成形网络, 因此构成了二维纵横交错的收发多波束成形网络。

图9中多端口放大器用于发射波束成形网络实现波束间功率动态调配,在每个相控阵馈源阵中,通过MPA和空间功率合成,可以将相控阵100%能量自由调配到任意一个波束中,数倍地提高该波束定点通信能力。

图9 相控阵可扩展收发波束成形网络和发射组件

2.4 样机及测试

为验证系统功率调度能力、波束覆盖情况以及EIRP和 G/T ，研制如图10所示的相控阵馈电反射面天线原理样机，反射面采用碳纤维材料加工而成。该样机采用收发共口径天线，其中发射是K频段，接收是Ka频段，整个反射面口径为2 m²，相控阵1和相控阵2阵列规模分别是2×16单元和4×16单元。

利用平面近场暗室测试系统对原理样机进行测试。测试结果表明, EIRP和 G/T 均达到了预期要求, 功率调用效

A photograph of a robotic arm, likely a KUKA model, positioned inside an anechoic chamber. The chamber's walls, floor, and ceiling are covered with blue, pyramid-shaped electromagnetic wave absorbers designed to eliminate reflections. The robotic arm is mounted on a white frame and is holding a black rectangular panel. A red laser line is visible on the right wall. A warning sign with a 'no open flames' symbol and the text 'VERBODEN OM TOEGELIJDIG MET EEN OPEN VUUR TE WERKEN' is visible on the left.

图10 原理样机

Figure 10 consists of four panels, each showing a grayscale image of the magnetic field magnitude and a corresponding color-coded map of the magnetic field component. The panels are labeled 'Case A1', 'Case A2', 'Case A3', and 'Case A4'. The x-axis ranges from 0.0 to 1.0, and the z-axis ranges from 0.0 to 1.0. The color scale for the magnetic field component ranges from -0.5 to 0.5. The panels show the development of a magnetic field structure over time, with the color scale indicating the magnitude of the field component.

图11 多波束测试近场幅相分布

一维堆积线阵之间由多端口放大器纵向正交互联, 实现整个阵面功率调度, 线阵方向单元之间由多波束功分器互联。由于相控阵单元间间距较大, 在单元缝隙之

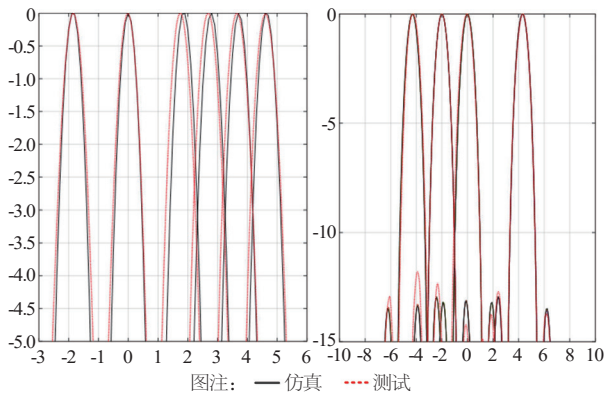


图12 波束方向图俯仰方向覆盖和方位方向扫描情况

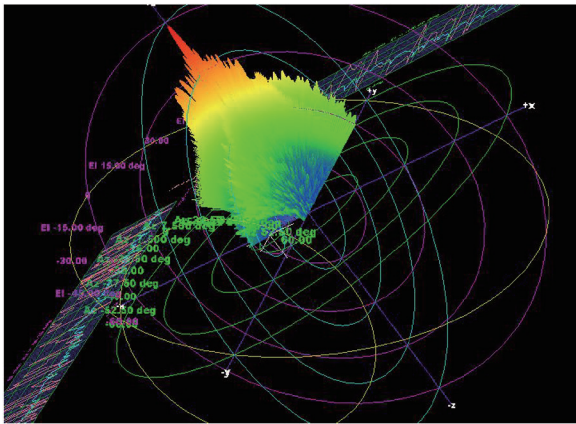


图13 法向波束3D方向图情况

率在93%~97%之间,波束覆盖及方向图测试结果如图11~13所示。俯仰向波束指向最大偏差小于波束宽度/10,方位方向分别控制波束电扫描到 $\pm 4.3^\circ$ 、 0° 、 -2° ,方位指向与理论一致,同时波束捷变时间小于100 μs 。

参考文献：

- [1] 陈修继, 万继响. 通信卫星多波束天线的发展现状及建议[J]. 空间电子技术, 2016, 13(2): 54-60.
CHEN X J, WAN J X. Development status and proposals for multi-beam antennas of communication satellites[J]. Space Electronic Technology, 2016, 13(2): 54-60.
- [2] 刘肖萌, 高文军, 邓云凯. 有限扫描反射面天线相控波束重构技术[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 481-486.
LIU X M, GAO W J, DENG Y K. Beam reconfiguring technique for limited angle scanning reflector antenna with phase-only control[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(2): 481-486.
- [3] 张振杰, 李正军. 阵馈聚焦镜像双反射面有限扫描天线研究[J]. 空间电子技术, 2011, 8(1): 20-26.
ZHANG Z J, LI Z J. Array fed focusing imaging double reflector limited scan antenna[J]. Space Electronic Technology, 2011, 8(1): 20-26.
- [4] 王宇, 闫鲁滨. 相控馈电双反射面天线辐射特性的研究[J]. 中国空间科学技术, 2005, 25(5): 40-45.
WANG Y, YAN L B. Study on radiation property of dual reflector antenna fed by phased array[J]. Chinese Space Science and Technology, 2005, 25(5): 40-45.
- [5] DRAGONE C, GANS M J. Imaging reflector arrangements to form a scanning beam using a small array[J]. Bell System Technical Journal, 1979, 58(2): 501-515.
- [6] COOLEY M. Phased array fed reflector (PAFR) antenna architectures for space-based sensors[C]//Proceedings of 2015 IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-11.
- [7] FONSECA N J G, GIRARD E, LEGAY H. Hybrid array fed reflector antenna solution for broadband satellite communications[C]//Proceedings of 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). Piscataway: IEEE Press, 2017: 2645-2648.
- [8] SCIANNELLA C, TOSO G. An imaging reflector system with reduced scanning aberrations[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(4): 1342-1350.
- [9] TOSO G, ANGELETTI P, MANGENOT C. Multibeam antennas based on phased arrays: an overview on recent ESA developments[C]//Proceedings of 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014). Piscataway: IEEE Press, 2014: 178-181.
- [10] MARTINEZ-LORENZO J A, GARCIA-PINO A, GONZALEZ-VALDES B, et al. Zooming and scanning Gregorian confocal dual reflector antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(9): 2910-2919.
- [11] UENO K. Phased array feed for communication satellite antennas[C]//Proceedings of 17th AIAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 1998.
- [12] KOISHI Y, KURIYAMA Y, MIYANO N, et al. A study of Ka band active phased array antenna for gigabit satellite communications[C]//Proceedings of 17th AIAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 1998: 279-287.
- [13] TAP K, TEKBAŞ D D, ERÇİL E, et al. Design, development and verification of an active phased array fed reflector antenna for a space application[C]//Proceedings of 8th European Conference

- on Antennas and Propagation (EuCAP 2014). Piscataway: IEEE Press, 2014: 11-12.
- [14] TAKIKAWA M, INASAWA Y, KONISHI Y. One-dimensional beam scanning reflector antenna for small satellite applications[C]//Proceedings of 2012 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC). Piscataway: IEEE Press, 2012: 159-162.
- [15] DIETRICH F J, METZEN P, MONTE P. The Globalstar cellular satellite system[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1998, 46(6): 935-942.
- [16] AKAISHI A, IGUCHI M, HARIU K, et al. Ka-band active phased array antenna for WINDS satellite[C]//Proceedings of 21st International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 2003.
- [17] LAFOND J C, VOURCH E, DELEPAUX F, et al. Thales Alenia Space multiple beam antennas for telecommunication satellites[C]//Proceedings of 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014). Piscataway: IEEE Press, 2014: 186-190.
- [18] 刘悦. 国外静止轨道移动通信卫星技术发展综述[J]. 国际太空, 2013(10): 26-31.
- LIU Y. A review of the development of foreign geostationary orbit mobile Communication Satellite Technology [J]. Space International, 2013(10): 26-31.
- [19] 王琦, 王毅凡. Ka波段通信卫星发展应用现状[J]. 卫星与网络, 2010(8): 20-27.
- WANG Q, WANG Y F. Development and application status of Ka-band communication satellites[J]. Satellite & Network, 2010(8): 20-27.
- [20] DJERAFI T, FONSECA N J G, WU K. Broadband substrate integrated waveguide 4×4 nolen matrix based on coupler delay compensation[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011, 59(7): 1740-1745.
- [21] ANGELETTI P, LISI M. Multiport power amplifiers for flexible satellite antennas and payloads[J]. Microwave Journal, 2010, 53(5): 96, 98, 100, 102, 104, 106, 108, 110.
- [22] PALACIN B, SHARSHAVINA K, NGUYEN K, et al. An 8×8 Butler matrix for generation of waves carrying Orbital Angular Momentum (OAM)[C]//Proceedings of 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014). Piscataway: IEEE Press, 2014: 2814-2818.
- [23] 吴季. 多波束通信卫星天线馈源参数的优化[C]//中国电子学会第五届天线年会. [出版地不详: 出版社不详], 1987: 8-13.
- WU J. Optimization of feed parameters for multi-beam communication satellite antennas[C]//The Fifth Antenna Annual Conference of Chinese Institute of Electronics. [S.l.:s.n.], 1987: 8-13.
- [24] REGIER F A. The ACTS multibeam antenna[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1992, 40(6): 1159-1164.
- [25] 王永根. 堆积均匀多波束成像反射面天线研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- WANG Y G. Research on stacked uniform multi-beam imaging reflector antennas[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008.
- [26] RICHTER J, SCHMIDT L P. Dielectric rod antennas as optimized feed elements for focal plane arrays[C]//Proceedings of 2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2005: 667-670.
- [27] CHEN Z H, LIU G D, CHU Q X. A new method for analyzing large size parabolic cylindrical reflector antenna[C]//Proceedings of 2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2006: 4421-4424.

[作者简介]



杨涛 (1986-), 中国电子科技集团公司第三十八研究所高级工程师, 主要研究方向为相控阵天线等。

李磊 (1972-), 中国电子科技集团公司第三十八研究所研究员, 主要研究方向为相控阵天线等。

邹永庆 (1962-), 中国电子科技集团公司电子科学研究院研究员, 博士生导师, 中国电子科技集团公司首席科学家, 主要研究方向为卫星通信、相控阵及数字阵列技术等。