

一种双波束相控阵卫星天线的设计与实现

Design and Realization of a Dual-beam Phased Array Satellite Antenna

姜元山¹, 陈礼波¹, 王运付¹, 解宁宇², 刘霞¹ (1. 中讯邮电咨询设计院有限公司, 北京 100048; 2. 中讯邮电咨询设计院有限公司郑州分公司, 河南 郑州 450007)

Jiang Yuanshan¹, Chen Libo¹, Wang Yunfu¹, Xie Ningyu², Liu Xia¹ (1. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd., Beijing 100048, China; 2. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd. Zhengzhou Branch, Zhengzhou 450007, China)

摘要:

针对低轨卫星设计一种工作于Ka波段的双波束相控阵终端天线, 为用户提供低轨卫星通信服务。天线采用灵活可扩展的可拼接阵面技术、瓦片式堆叠式多波束子阵设计、低剖面微带天线设计等关键技术, 满足了天线对剖面、重量、集成度高的要求, 以及对终端设备的低成本、低功耗、多波束的需求。实验仿真结果表明该方案满足低轨卫星终端通信功能和性能要求。

关键词:

相控阵; 双波束; 低轨卫星; 终端; 毫米波

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2024.04.009

文章编号: 1007-3043(2024)04-0054-07

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

It designs a dual beam phased array terminal antenna operating in the Ka band for low orbit satellites, providing users with low orbit satellite communication services. The antenna adopts flexible and expandable spliced array technology, tile stacked multi beam subarray design, low profile Microstrip antenna design and other key technologies, which solves the requirements of the antenna for high profile, weight and integration, and realizes the requirements of low cost, low power consumption and multi beam for terminal equipment. The experimental simulation results show that the scheme can meet the communication function and performance requirements of low orbit satellite terminals.

Keywords:

Phased array; Double beam; Low orbit satellites; Terminal; Millimeter wave

引用格式: 姜元山, 陈礼波, 王运付, 等. 一种双波束相控阵卫星天线的设计与实现[J]. 邮电设计技术, 2024(4): 54-60.

1 概述

多波束相控阵天线是低轨卫星系统的重要组成部分, 对于实现海上、空中、陆地的全域通信覆盖具有明显的优势, 成为军事信息应用、民用通信保障和商

业通信应用的一个重要发展领域。针对天线低成本、低功耗、多波束等需求, 本文设计了一种用于低轨卫星通信的双波束相控阵天线, 天线工作在Ka波段, 两波束接收、一波束发射, 左右旋圆极化可配置, 优于1/4波束宽度的天线跟踪精度。天线采用灵活可扩展的可拼接阵面技术、瓦片式堆叠式多波束子阵设计、低剖面微带天线设计等关键技术, 满足天线对剖面、重量、集成度高的要求, 以及对终端设备的低成本、低功耗、多波束的需求。仿真和实验结果证明, 本文所设

基金项目: 天地融合的6G卫星通信立体智能组网技术研究(2020YFB1807900)

收稿日期: 2024-02-06

计的方案正确,产品能满足低轨卫星通信的要求。

2 双波束相控阵天线总体设计和工作原理

双波束相控阵天线终端主要由接收阵面、发射阵面、阵面波控、电源模块、变频模块、惯导模块以及结构模块(含天线罩)组成。相控阵终端组成如图1所示。

相控阵天线发射阵面工作时,外部天线控制终端发射的S波段3.8 GHz中频信号通过相控阵终端外部接口中频连接器进入变频通道组件,上变频为Ka波段信号(27.5~31 GHz)。主波控模组接收到天线控制终端发来的对星指令,根据GPS模组的定位信息以及陀螺仪、电子罗盘的方位姿态信息进行解算,得到波束指向信息,对各射频发射芯片组件进行幅度、相位调整。信号经过各天线单元辐射到空间中形成窄波束,指向通信卫星。

相控阵天线接收阵面工作时,主波控模组接收到天线控制终端发来的对星指令,根据GPS模组的定位信息以及陀螺仪、电子罗盘的方位姿态信息进行解算,得到波束指向信息;进而对各射频接收芯片组件进行幅度、相位调整,每个接收通道的信号在后端合成器内进行能量合成。合成信号通过信道模块进行下变频处理,转换为S波段中频信号(3.2 GHz),输出到后端天线控制终端。

整机采用28 V DC电源,电源完成DC/DC转换,实现对整个终端各模块的供电,保证每部分正常工作。主波控及分波控协同工作,共同控制每个收/发通

道中数字衰减器及数字移相器工作状态,以保证相控阵波束始终实时指向卫星。

3 双波束相控阵天线关键技术

3.1 灵活可扩展的相控阵天线阵面拼装技术

相控阵阵面采用了模块化、标准化子阵灵活拼组大阵实现。如图2所示,首先采用微波多层印制板实现标准化、模块化的小规模子阵,然后通过数个小阵拼接实现全阵,收发全阵均可独立波控、独立电源控制。天线采用平板架构的方式来实现轻薄化要求,整个阵面按照子阵化的方式来进行设计。接收和发射均在子阵级进行波控处理,便于提高波束切换时间,子阵可独立进行工作,也可以全阵一体化工作。

天线阵面的设计遵循标准化子阵的方式,根据不同的指标要求,采用不同数量的子阵进行拼组来实现阵面指标。阵面布局如图3所示。

接收阵面为双波束共口径阵面,采用4个256阵元的接收子阵阵面实现阵面指标,总阵元数量为1024。接收阵面采用单元双馈的方式,通过配置通道间相位差的方式实现阵面左右旋圆极化的切换,再配合2×2天线单元旋转布局,单元间通过旋转配相随左旋、右旋调整,进一步优化天线圆极化性能。天线接收到信号后,通过内部多级合路网络后,每个子阵输出2个波束,然后通过后端合路模组实现整个阵面的各波束合成。接收阵面采用LNA+多功能芯片的方式实现阵面有源通道,单芯片集成16通道的接收幅相控制和低噪声放大。

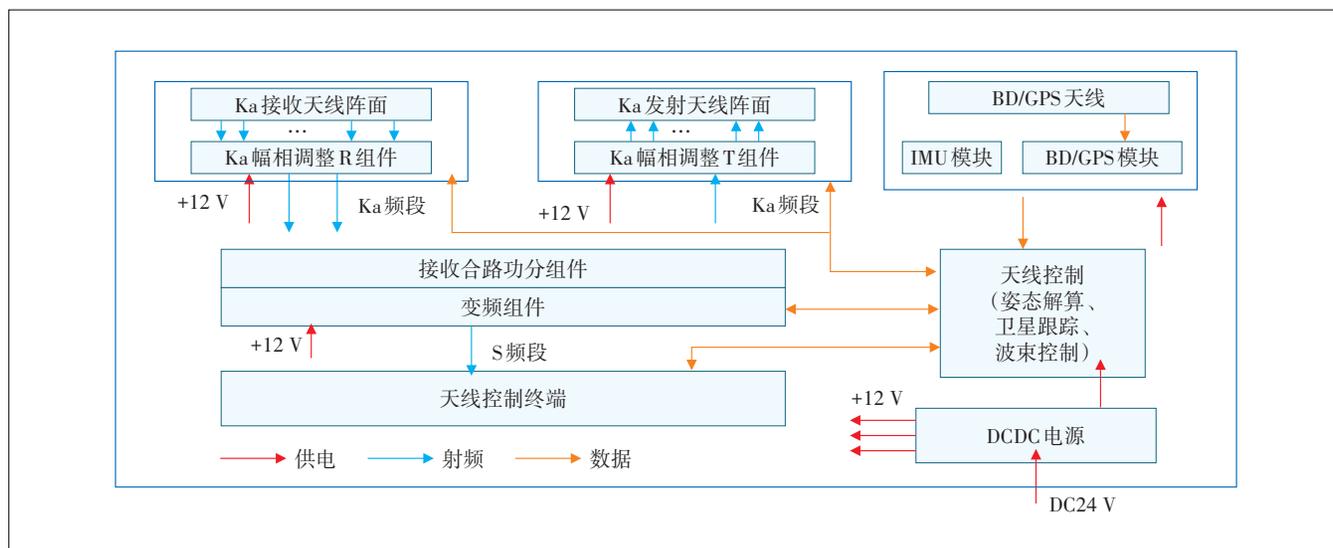


图1 Ka频段双波束相控阵终端架构

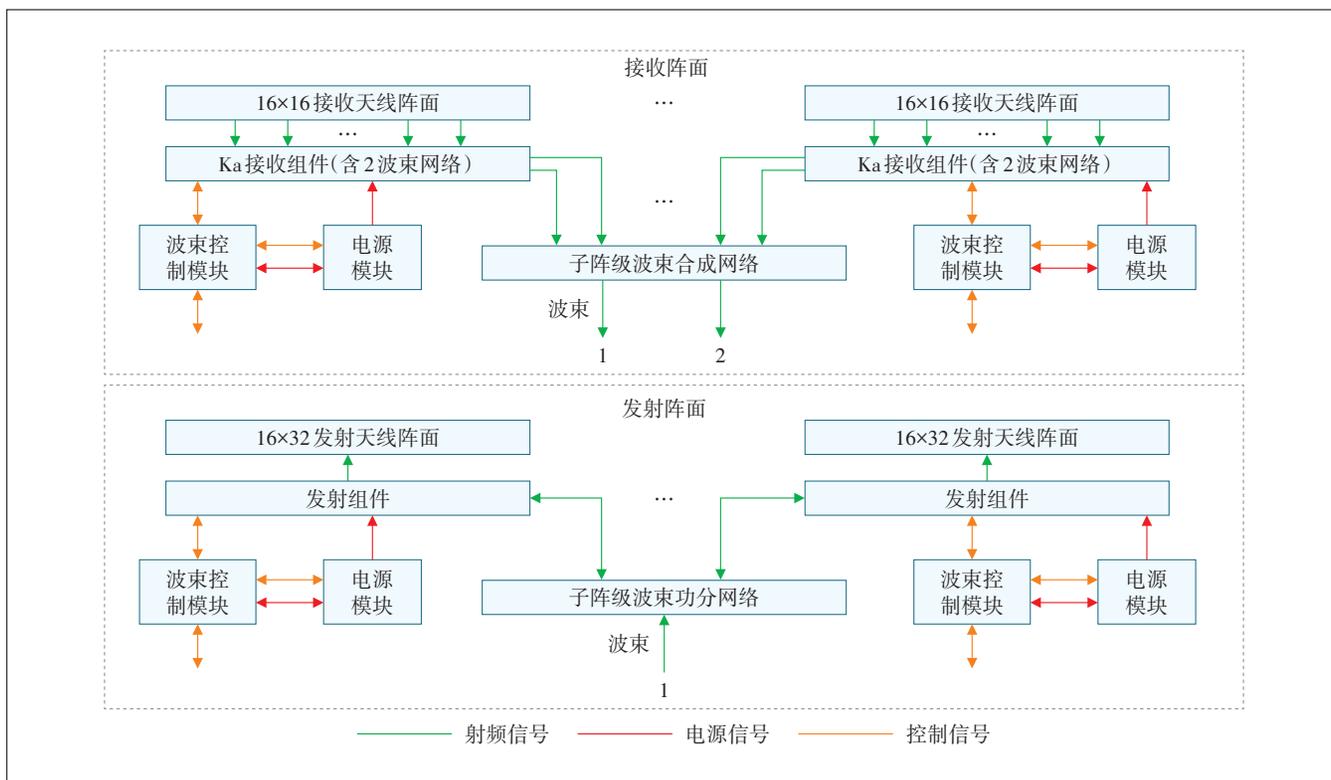


图2 阵面设计方案框图

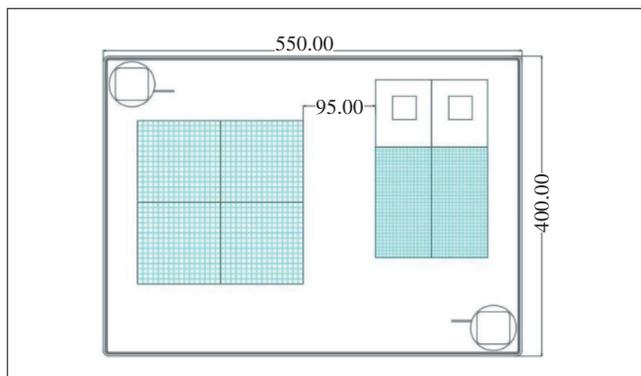


图3 相控阵天线阵面布局示意

发射阵面为单波束,采用2个512阵元的发射子阵组阵实现阵面指标,总阵元数量为1024。发射阵面采用单元双馈加 90° 电桥的方式来实现天线单元的圆极化,通过开关不同工作通道的方式,实现阵面的左右旋圆极化的切换,再配合 2×2 天线单元旋转布局,单元间通过旋转配相随左旋、右旋调整,进一步优化天线圆极化性能。激励信号经过SSMP连接器输入阵面后,通过内部功分网络可实现对阵面所有有源通道的激励,再通过天线辐射至空间实现波束合成。发射阵面选择单通道9 dBm的发射功率芯片实现有源放大,

单芯片集成8通道的发射幅相控制和功率放大。

3.2 瓦片式子阵设计

收发子阵主要包括天线阵面和射频TR组件,采用子阵化设计思路,每个子阵功能相同,通过多个子阵组装成整个阵面。

如图4所示,发射天线为单波束设计,采用瓦片平板式架构,利用AOB技术,阵元与馈电网络通过印制板上金属化过孔互联,天线、波控电源与射频接收组件一体化布局,高密度集成到一张微波多层板上。

接收天线为两波束设计,采用瓦片堆叠式的架构实现。如图5所示,天线辐射板、合成网络和子阵电源控制采用分离式设计,分别集成在3张多层微波板上,天线辐射板与合成网络之间通过毛纽扣的方式实现信号互联,通过低频连接器直插的方式与子阵电源控制板进行低频互联;然后再通过SSMP的方式与后端合成模块进行射频互联,通过低频连接器直插的方式与主板电源控制进行低频互联。

3.3 低剖面微带天线技术

微带天线由于剖面低、成本低,在相控阵天线中应用广泛。本文的双波束相控阵天线采用低剖面的微带天线形式来实现。结合相控阵天线系统对天线

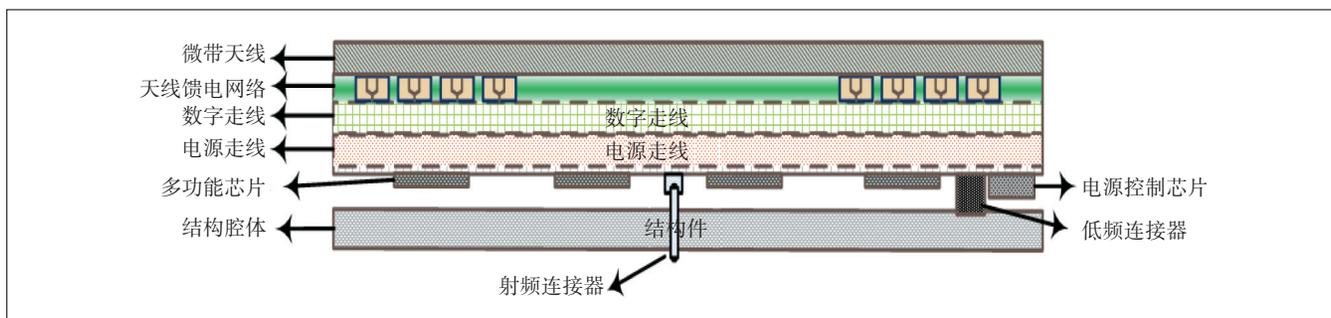


图4 发射子阵叠层示意

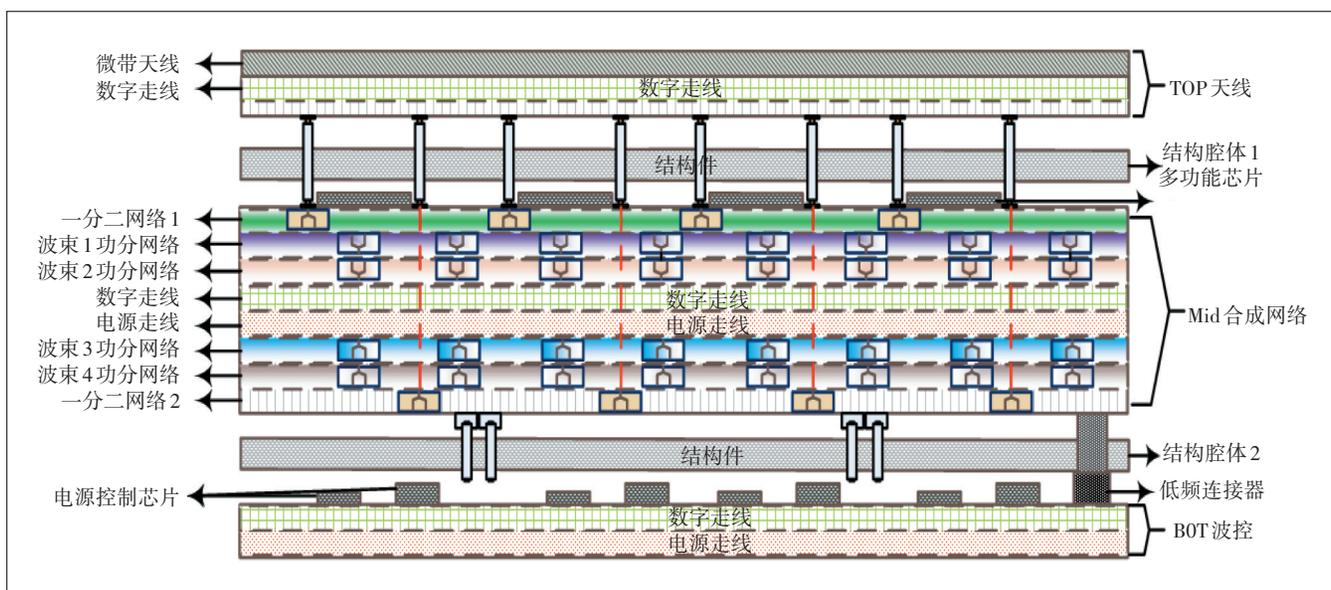


图5 接收双波束子阵叠层示意

极化方式的要求,发射天线单元采用双点馈电配合 90° 电桥的方式,实现单元天线的圆极化切换。接收天线单元的实现原理与发射天线类似,采用双点馈电方式,配合旋转馈电输入实现单元天线的极化切换。通过调整通道间相位排布实现单元的圆极化切换。通过控制多功能芯片内部的移相器,调整输出给天线单元馈口间的信号相位差,形成 0° 、 90° 或 90° 、 0° 的相位排列,以实现天线单元信号圆极化的左旋、右旋功能。

天线单元按照 2×2 规模进行旋转布局以及馈电,布阵方式及极化配相方式如图6所示。

通过调整通道间的相位和旋转馈电技术实现展宽驻波及轴比带宽,减少天线单元大角度扫描增益的下降。

4 双波束相控阵天线样机仿真测试及分析

4.1 关键指标计算

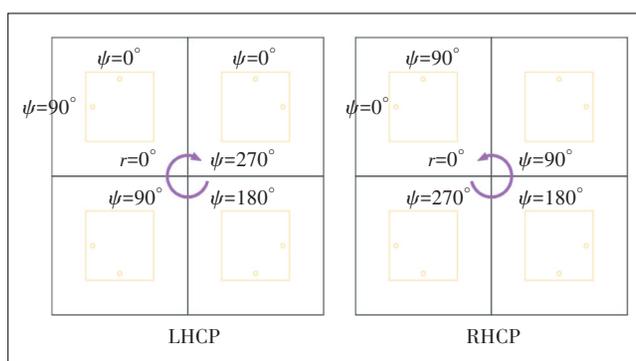


图6 左旋、右旋圆极化配相方式

发射链路包括上变频部分、功率分配网络、射频发射芯片(集成移相器、衰减器及大功率PA)以及发射阵面与天线罩。

根据有效全向辐射功率(EIRP)的计算公式:

$$\text{EIRP} = \text{GAIN} + P - \text{Loss} \quad (1)$$

式中:

GAIN——天线发射阵面增益(dB)

P——射频通道发射总功率(dBW)

Loss——天线单元到射频前端插入损耗(dB)

当前选型的多功能芯片内部各波束均含有独立的PA, 芯片单通道增益为23 dB, 系统单通道输出P-1功率为9 dBm。

发射阵面由2个发射子阵组阵而成, 满阵共1 024通道。即阵列单元数 N_a 为1 024, 单元天线增益 G_a 估算约为3.5 dB, 馈电及电桥损耗 L 为1.3 dB, 则阵列天线增益GAIN可通过公式: $GAIN = 10 \times \log(N_a) + G_a - L$, 计算得到天线增益GAIN约为32.3 dB。

导入各项数据, 可计算出天线发射链路的参数如表1所示。

表1 天线发射链路EIRP计算

参数		取值
天线罩损耗/dB		1.2
芯片输出P-1功率/dBm		9
通道输出P-1功率/dBm		9
阵列规模		1 024
阵面发射增益/dB		32.3
扫描下降/dB	$\pm 30^\circ$	2
	$\pm 45^\circ$	3
	$\pm 60^\circ$	5
	$\pm 70^\circ$	7
EIRP/dBW	法向	40.21
	$\pm 30^\circ$	38.21
	$\pm 45^\circ$	37.21
	$\pm 55^\circ$	35.21
	$\pm 70^\circ$	33.21

根据上述计算结果, 可知发射阵面扫描范围内EIRP ≥ 40 dBW@29.25 GHz。

接收系统等效噪声温度可由式(2)来计算:

$$T_k = \left(10^{\frac{NF_{ab}}{10}} - 1 \right) \times T_0 + ant_k \quad (2)$$

式中:

T_k ——接收系统等效噪声温度

ant_k ——天线等效噪声温度

T_0 ——标准噪声温度(K)

NF_{ab} ——射频接收链路噪声系数(dB)

根据工程经验, 标定该频段天线等效噪声温度约为80 K。

根据选型的多功能芯片单通道噪声系数最差约

为2.2 dB, 系统噪声保守按0.7 dB恶化评估, 则接收系统噪声系数为2.9 dB。

阵面由2个接收子阵组阵而成, 满阵共1 024通道。即阵列单元数 N_a 为1 024, 单元天线增益GAIN估算为3.5 dB, 馈电及电桥损耗 L 约为1.3 dB, 则阵列天线增益GAIN可通过公式: $GAIN = 10 \times \log(N_a) + G_a - L$, 计算得到天线增益GAIN约为32.3 dB。

导入上述各项数据, 计算可得天线接收链路参数如表2所示。

根据上述计算结果, 可知接收阵面扫描范围内 $G/T \geq 5$ dB/K@19.45 GHz。

4.2 仿真测试

为贴近实际阵面仿真结果、快速仿真优化, 先利用2x2的模型及主从边界进阶优化天线性能。接收天线阵列2x2旋转布局模型及部分仿真结果如图7和图8所示。

由上述仿真结果可知, 2x2天线子阵有源驻波良

表2 天线接收链路G/T值计算

参数		取值
天线罩损耗/dB		1
芯片噪声系数/dB		2.2
系统噪声系数/dB		2.9
阵列规模		1 024
阵面接收增益/dB		32.30
扫描下降/dB	2	2
	3	3
	5	5
	7	7
G/T/(dB/K)	法向	5.79
	2	3.79
	3	2.79
	5	0.79
	7	-1.21

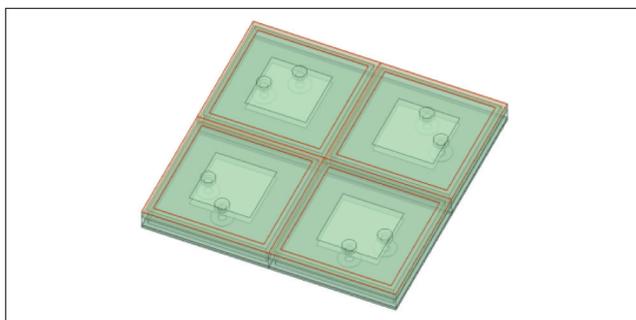


图7 基于2x2旋转布局模型

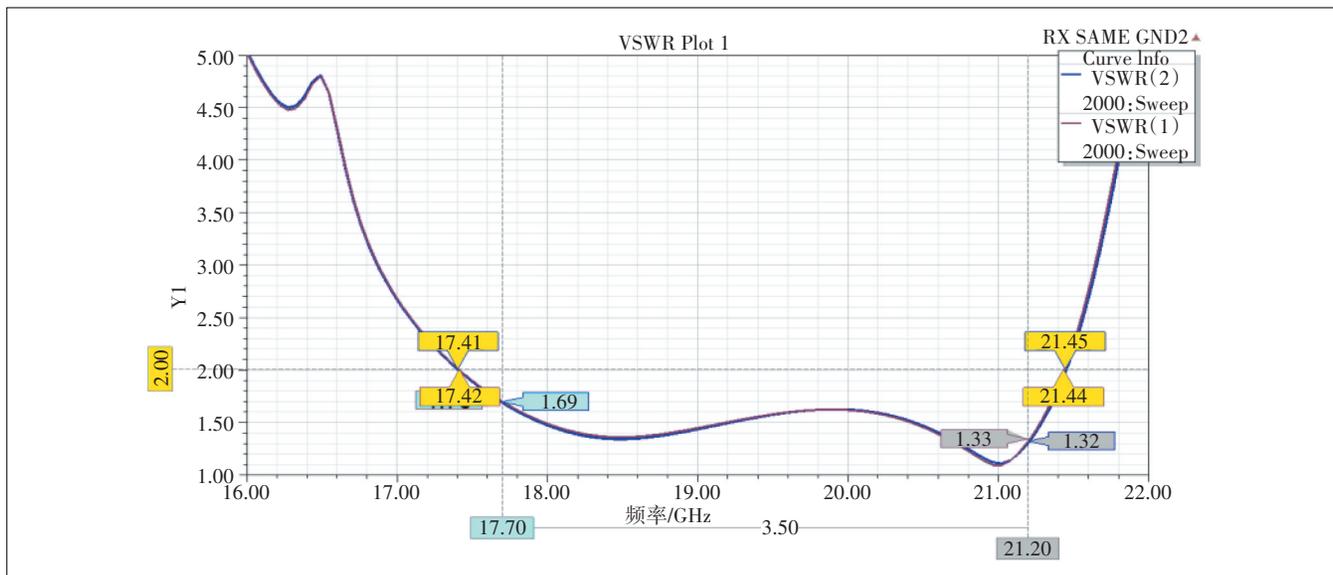


图8 接收天线2×2模型有源驻波示意

好,均小于2。

天线阵面要在方位、俯仰方向实现二维相扫,为避免出现栅瓣,其方位、俯仰面阵元间距须满足式(3):

$$\begin{cases} d_x \leq \left(1 - \frac{1}{N_x}\right) \frac{\lambda}{1 + |\sin \beta_{m1}|} \\ d_y \leq \left(1 - \frac{1}{N_y}\right) \frac{\lambda}{1 + |\sin \beta_{m2}|} \end{cases} \quad (3)$$

式中:

β_{m1}, β_{m2} ——方位、俯仰面扫描角度,取 70°

N_x, N_y ——方位、俯仰面上阵元数,取32

本方案中接收单元间距 $d_x = d_y = 6.8 \text{ mm}$ 。通过计算可知,满足式(3)。

发射天线阵列 2×2 旋转布局模型及部分仿真结果如图9和图10所示。

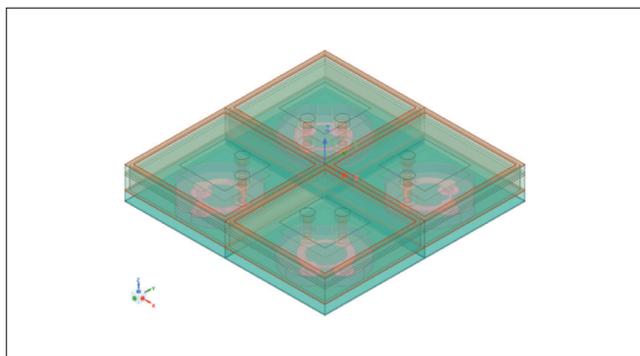


图9 基于 2×2 旋转馈电模型

由图10可知,经过 2×2 规模旋转馈电后,天线的轴比小于 0.1 dB ,满足技术指标要求。

天线阵面在方位方向(32元)、俯仰方向(16元)实现二维相扫,本方案中接收单元间距 $d_x = d_y = 4.6 \text{ mm}$ 。通过计算可知,满足式(3)。

4.3 实验结果

为了验证设计和论证结果,实现了双波束相控阵天线样机,极化方式为双极化,自动切换。其主要指标如表3所示。

为达到低轨卫星入网要求,对整机进行暗室测试,根据暗室测试记录,双波束相控阵天线整机测试结果与关键指标及仿真测试结果基本吻合,达到了设计的预期。

5 结束语

6G时代卫星互联网将成为通信领域“万物互联”和“泛在互联”2个发展方向的代表性技术,卫星互联网与地面5G的天地融合通信可以在不受地理条件限制的万物泛在互联中发挥不可替代的作用,并衍生出全新的天地融合卫星通信终端,广泛服务于各类用户的通信需求。

本文设计实现了一种具有接收双波束、发射单波束的相控阵天线终端,可同时对2颗低轨卫星进行跟踪。接收天线双波束共口径阵面,采用单元双馈的设计实现左右旋圆极化的切换,发射天线为单波束采用单元双馈加 90° 电桥的方式来实现圆极化;采用模块

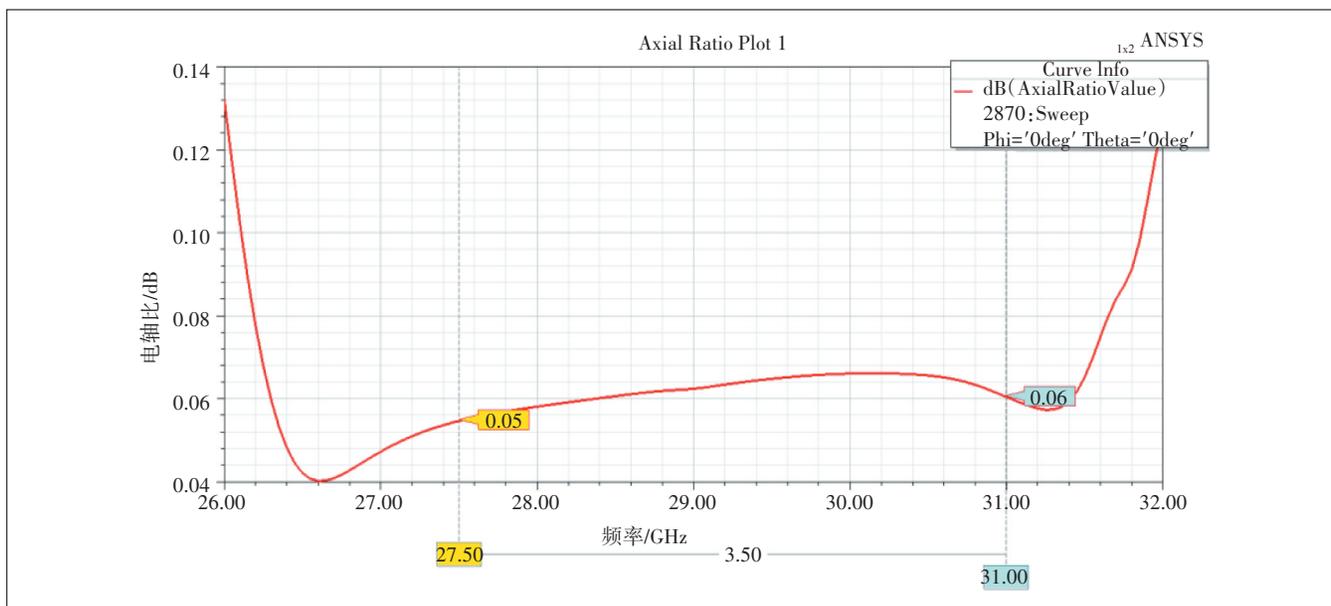


图10 基于2×2旋转馈电轴比

表3 双波束相控阵天线测试结果

参数	取值
工作频段	上行27.5~31 GHz, 下行17.7~21.2 GHz
EIRP	法向 ≥40 dBW@29.25 GHz(含天线罩)
G/T值	法向 ≥5 dB/K@19.45 GHz(含天线罩)
轴比	法向 ≤2 dB(含天线罩)
副瓣抑制	法向 ≥12 dB
跟踪精度	优于 1/4 波束宽度
工作角度	方位角: 0°~360°, 离轴角: ≥±70°

化微带天线具备高集成度、低剖面、低成本、小型化的特点。通过仿真实验及样机测试,本文的双波束相控阵天线能够完全满足低轨卫星终端通信要求。

参考文献:

[1] 解宁宇,陈任翔,马广辉,等. 低轨高通量星座系统波束设计方案研究[J]. 邮电设计技术,2023(1):47-50.
 [2] 周德山,王燕,钟颀,等. 卫星与5G融合通信组网探索[J]. 邮电设计技术,2020(9):49-52.
 [3] 姜元山,王运付,刘霞,等. 卫星与5G融合多模物联网终端的实现与应用探讨[J]. 物联网技术,2023,13(3):101-103,107.
 [4] 王琳,张晨,王显煜,等. 基于多波束卫星系统的跳波束技术研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版),2019,39(3):25-30.
 [5] 杨其聪,程显宇,钟海,等. 基于低轨卫星通信K/Ka车载相控阵设计[J]. 兵工自动化,2022,41(7):21-24,35.
 [6] 陈佑东. 车载移动卫星通信系统的应用[D]. 西安:西安电子科技大学,2021.
 [7] 罗烜. 低成本毫米波相控阵关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学,

学,2020.

[8] 赵涤葵,陈智慧,尤肖虎. CMOS毫米波芯片与4096发射/4096接收超大规模集成相控阵设计实现[J]. 中国科学(信息科学),2021,51(3):505-519.
 [9] 张晨,张更新,王显煜. 基于跳波束的新一代高通量卫星通信系统设计[J]. 通信学报,2020,41(7):59-72.
 [10] 常皓. 基于硅工艺的Ka波段多功能芯片关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2020.
 [11] 彭娜. 硅基毫米波波束相控阵芯片的研究与实现[D]. 南京:东南大学,2021.
 [12] 周涛. 数字多波束天线阵列规划和赋形研究[D]. 成都:电子科技大学,2022.
 [13] 韩帅,吴宜航,李季蹊,等. 低轨高通量卫星按需波束调度技术[J]. 天地一体化信息网络,2022,3(2):28-38.
 [14] LIU B K, JIANG C X, KUANG L I, et al. Joint user grouping and beamwidth optimization for satellite multicast with phased array antennas [C]//GLOBECOM 2020-2020 IEEE Global Communications Conference. Taipei:IEEE,2020:1-6.
 [15] TANG J Y, BIAN D M, LI G X, et al. Optimization method of dynamic beam position for LEO beam-hopping satellite communication systems[J]. IEEE Access,2021(9):57578-57588.

作者简介:

姜元山,高级工程师,硕士,主要从事5G/6G终端研发工作;陈礼波,高级工程师,硕士,主要从事无线通信设计工作;王运付,工程师,硕士,主要从事5G/6G终端研发工作;解宁宇,工程师,硕士,主要从事卫星通信相关方面的研究工作;刘霞,工程师,硕士,主要从事5G/6G终端研发工作。