

导读:射频与微波技术包括电磁波的产生、放大、发射、传播及其与物质的相互作用、接收等,是雷达、通信等电子信息科学重要的公用技术。为了加强国内同行在射频微波领域的学术交流,促进微波技术应用水平的提高,《电子技术应用》杂志 2021 年第 7 期、第 8 期推出“射频与微波”主题专栏,论文内容涵盖硅基射频场效应管的研制、Ka 波段频率源的分析和设计、双模式高增益射频接收芯片的设计、反激变换器板级辐射的仿真、电磁波在等离子体中的传播分析等。本专栏论文都具有鲜明的工程应用背景,接触前沿技术应用,期待与读者互相切磋借鉴,共同提高我国的微波应用水平。本期刊出下半部分。



特约主编:谢拥军,北京航空航天大学电子信息工程学院教授,博士生导师。主要研究方向为天线与微波技术、计算电磁学及其应用、电磁兼容等。目前主持多项国家纵向和企业横向科研项目。发表学术论文 200 余篇(其中 SCI 论文 70 余篇),主编(或参编)《HFSS 原理与工程应用》、《简明微波》等专著 8 本。

## 高增益圆极化星载相控阵天线设计

金宇婷,邢斯瑞,沈晨阳,常俊德,张士伟

(长光卫星技术有限公司,吉林 长春 130000)

摘要:针对卫星 X 波段通信系统大范围数据传输的需求,设计具备高增益圆极化可宽角度电扫的星载相控阵天线。此天线阵元采用底馈的馈电方式,利用切角技术实现圆极化,利用开槽技术实现小型化。天线阵列错层排布,使其整体的辐射性能最优化。通过发射组件模块、波束控制模块和电源模块的合理布局和设计优化,使其电扫波束可在离轴角  $0\sim 60^\circ$ 、方位角  $0\sim 360^\circ$  内变化。此单机经加工后测试结果良好,对 X 波段通信系统尤其是相控阵天线的设计有一定的指导意义。

关键词:高增益;圆极化;宽角度电扫;相控阵天线

中图分类号:TN82

文献标识码:A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.211845

中文引用格式:金宇婷,邢斯瑞,沈晨阳,等.高增益圆极化星载相控阵天线设计[J].电子技术应用,2021,47(8):1-6.

英文引用格式:Jin Yuting, Xing Sirui, Shen Chenyang, et al. Design of spaceborne phased array antenna with high-gain and circular-polarization[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(8): 1-6.

### Design of spaceborne phased array antenna with high-gain and circular-polarization

Jin Yuting, Xing Sirui, Shen Chenyang, Chang Junde, Zhang Shiwei

(Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun 130000, China)

**Abstract:** A spaceborne phased array antenna with high-gain, circular polarization and wide-angle is designed to meet the requirements of large range data transmission of X-band communication system. The antenna array element is fed by the bottom feed, the circular-polarization is realized by the angle cutting technology and the miniaturization is realized by the slot technology. The array is arranged in staggered layers, so that the radiation performance is the best. Through reasonable layout and optimization design of transmitting module, beam control module and power module, the beam can be changed within  $0\sim 60^\circ$  off-axis angle and  $0\sim 360^\circ$  azimuth angle. The test results of this machine are good after machining, which has a certain guiding significance for the design of X band communication system, especially the phased array antenna.

**Key words:** high-gain; circular-polarization; wide-angle scanning; phased array antenna

0 引言

随着科技的迅猛发展,卫星广泛地应用在民用、军用、商业、农业、林业等各大领域<sup>[1-4]</sup>。其中,光学卫星因其诸多优点<sup>[5-7]</sup>,如:(1)数据获取较易且迅速,同时变量较广,极大降低了研究成本;(2)影像分辨率较高,满足多种使用需求;(3)数据覆盖较广,部分数据收集频率较高,且收集不受当地变故或政策变动影响。但由于星载相机的分辨率越来越高,导致图像数据日益增大,给数据下传造成了巨大压力。相比于无源定向的卫星天线<sup>[8]</sup>,相控阵天线因其高增益、可传输范围大等优点而被广泛采用<sup>[9-15]</sup>。

本文依托吉林一号卫星网络,提出了一款星载 X 波段高增益小型圆极化可宽角度电扫的相控阵天线,可以满足在低轨轨道上建立稳定的无线通信,以完成吉林一号的图像视频传输任务。其性能优良,工作在 X 波段,采用底馈技术和贴片开槽技术实现阵元小型化,贴片对称切角技术实现圆极化,阵列错层排布使其阵列辐射性能优良,尤其是轴比指标优化较为明显,同时相比同性能天线具有更小的尺寸。吉林一号卫星网络包含多颗视频图像卫星,此天线可为其图像视频数据下传提供无线保障,同时也为 X 波段高增益圆极化可宽角度电扫的星载相控阵天线的设计提供了一种新的思路。

1 相控阵天线系统功能及组成

相控阵天线的主要功能是在卫星飞行过程中接收上位机的射频信号,进行功率放大和滤波处理,最终由天线阵面辐射出去。并且相控阵天线应实时解算上位机送过来的角度信息,并控制各个通道的相移,使得波束始终指向数据地面接收站,实现载荷数据的对地传输,保证无线信号的质量、能量和指向无误。

相控阵天线由 4 大模块组成,分别是天线阵面模块、发射组件模块、波束控制模块以及电源模块。相控阵天线组成框图如图 1 所示。

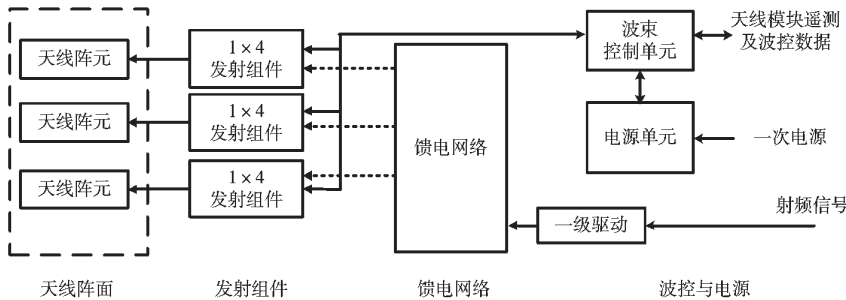


图 1 相控阵天线组成框图

2 相控阵天线阵面设计

2.1 相控阵天线阵元设计与仿真

微带天线的结构一般由介质基板、辐射体和接地板构成。介质基板的厚度远小于天线设计的电磁波波长,基板底部的金属薄层与接地板相接,正面则通过光刻或

真空镀膜技术制作具有特定形状的金属薄层作为辐射体,其形状可根据要求进行多种变化。天线基本阵元采用正方向贴片原型,其边长理论值为:

$$a=\frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_r}} \tag{1}$$

式中: $c$  为光速; $f$  为设计天线的工作频率,本设计中天线的工作频率为 8.2 GHz; $\epsilon_r$  为介质基板的相对介电常数,本设计中为 2.2。

本设计采用的馈电方式为底馈即同轴线馈电。其优点为馈电点位置可以自由选择,便于匹配;同轴接头位于贴片下方,由于接地板的存在,馈线对天线的辐射影响较小;同时此馈电方式与其他方式相比可以减小天线的整体尺寸,结构简单便于制作调试,便于整体小型化。

同时本设计采用在微带贴片对角线切角的方式引进微扰,当电磁波流过贴片表面时,因其路径不等,导致辐射电场分量以螺旋式前进,即形成了圆极化波,此种方式结构简单紧凑,便于制作。

采用了微带天线贴片表面开槽技术,切断了原先的表面电流路径,使电流绕槽边曲折流过而路径变长,贴片等效尺寸相对增加,谐振频率降低,进一步实现小型化。天线阵元模型如图 2 所示(为突出天线阵元结构,介质基板有截取),具体尺寸如表 1 所示。

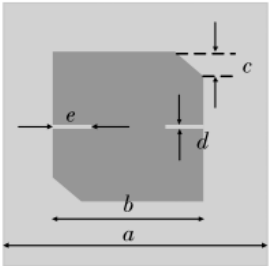


图 2 天线阵元模型图

表 1 微带天线尺寸数据 (mm)

参数	a	b	c	d	e
数据	30	10.55	2.05	0.22	2.05

本文采用仿真软件进行建模仿真,具体结果如下。

天线阵元回波损耗仿真结果如图 3 所示。由图 3 可知,在谐振频率 8.2 GHz 处回波损耗  $S_{11} < -20$  dB,10 dB 天线带宽为 7.912~8.652 GHz,共 0.74 GHz,相对带宽为 9%,匹配性能良好。图 4 为天线阵元仿真的轴比图,可以看到,中心处轴比为 1.7 dB,E 面和 H 面在大角度范围内都比较平滑且小于 3 dB,可见圆极化性能良好。图 5 为天线阵元方向图的仿真结果,由图可知,在谐振频率法向方向增益为 5.5 dB,前后比大于 30 dB,半功率波瓣宽度大于 100°,曲线平滑,辐射性能良好。图 6 为天线阵元增益随频率变化的仿真结果。由图可知,在 7.6 GHz~9 GHz 频段内,天线增益比较平滑,均大于 3 dB,在中心频点 8.2 GHz 处达到增益峰值 5.5 dB,微带阵元辐射性能良好。

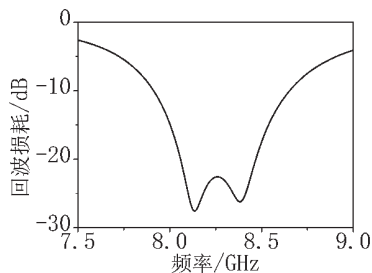


图3 天线阵元回波损耗图

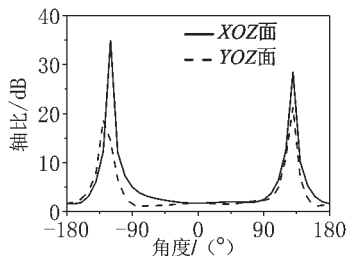


图4 天线阵元轴比图

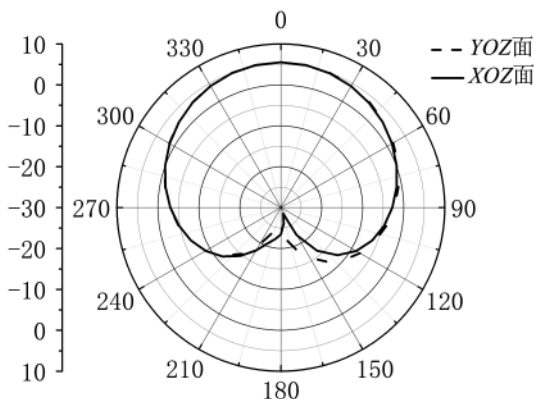


图5 天线阵元方向图

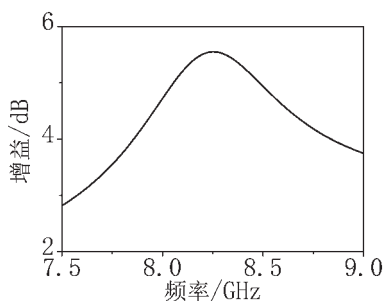


图6 天线阵元增益随频率变化图

## 2.2 相控阵天线阵列设计

本文设计了一款12阵元的微带天线阵列。采用3×4的阵列排布,如图7所示。采用相邻两排错位排布,优点如下:

- (1)整体增益最优,辐射效率大;
- (2)圆极化性能进一步提升;
- (3)整体尺寸最小。

天线阵列的介质基板大小为84 mm×47 mm,介电常

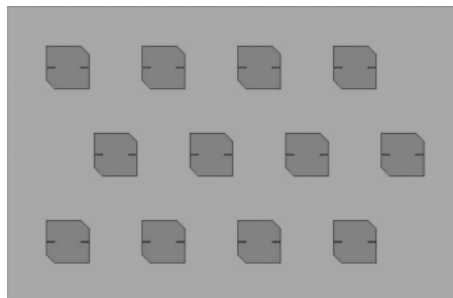


图7 天线阵列结构排布图

数为2.2。每一横排的4个阵元为一个子阵,由一个一分四的功分电路连接在一起,3个子阵分别和前端的3路发射通道相连接。通过仿真,整体天线阵列辐射性能良好。

## 3 相控阵天线发射组件模块设计

发射组件由驱动放大、馈电网络、3个四通道组件以及结构件等组成。首先,射频信号将进入发射组件模块,经过1个公共端,公共端包括一分三的馈电网络,其主要作用为将激励信号进行预放大和功率分配。然后信号进入3个四通道发射模块,共分为12路馈送到12个天线阵元上,发射模块主要完成射频信号的放大、移相和滤波的功能。每个通道具备通道单独开断的功能,便于相控阵天线的调试与测试,同时具备采集温度信息的能力。每个组件单独供电,具有独立的数据接口,可以单独拆卸、更换,便于后续产品的升级与扩展,为其提供接口。三通道发射模块原理框图如图8所示。

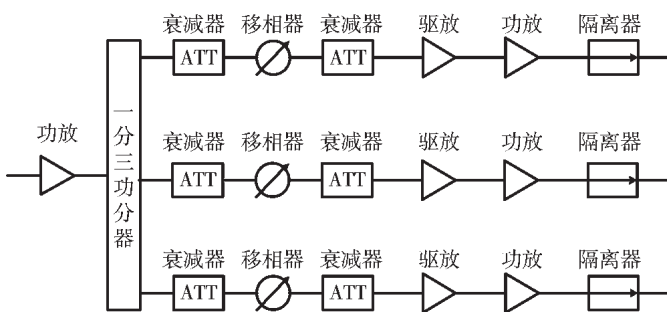


图8 三通道发射模块原理框图

本模块均选用成熟器件和工艺生产线,布局布线合理规范,保证多通道的一致性。同时合理选择末级功放、隔离器、输入放大器、移相等重要器件,保证单通道通带内平坦度、三阶交调、通道间幅度不一致性、二次谐波抑制、输入驻波和移相等满足整机指标。

## 4 相控阵天线波束控制模块设计

波束控制单元主要由FPGA电路、电源电路、时钟电路、下载电路、配置芯片、Flash存储器、RS422通信接口、温度采集电路等组成。其工作原理框图如图9所示,主要功能如下:

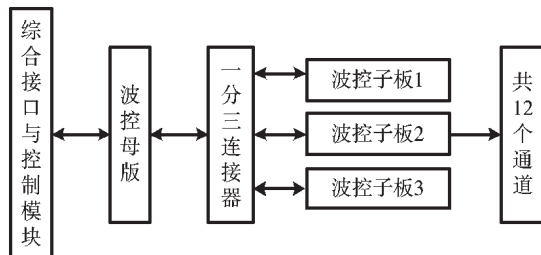


图9 波束控制单元工作原理框图

(1)电源转换:由卫星电源分系统为其供电,波束控制模块内部进行二次电源转换,为波束控制单元内的各个电路提供所需的电源。

(2)解算角度:根据上位机发送过来的天线波束指向角度信息,通过计算得出各天线单元的相位,并利用查表得出各发射组件内移相器的控制数据,完成对移相器的控制,从而达到相控阵天线电扫的功能。

(3)相控阵天线状态采集:可以采集波束控制单元的工作状态信息与天线状态信息,以此可以查看相控阵天线工作的多种工况。

波束控制模块 FPGA 软件功能模块分为很多子模块。指令接收模块是根据通信协议接收由上位机发送过来的串口数据,判断帧头和帧尾,并进行校验操作。指令解析与处理模块可以根据指令接收模块接收的信息,判断指令,并进行指令的处理与任务的分发与协调。遥测数据发送模块可以将需要回传的信息根据通信协议进行组帧并发送给上位机。指向精度修正模块在接收到正确的角度信息时,可以把接收到的角度数据根据插值算法和修正数据映射到新的指向角度。修正数据由整体相控阵天线整机测试提供,插值算法为一维线性插值。函数计算模块可以根据修正后的指向角度,计算出对应的正弦、余弦值。相位计算模块则根据指向角度和三角函数值计算每个通道的相位值。相位计算公式为: $\phi = (x \cdot \cos\varphi + y \cdot \sin\varphi) \cdot \sin\theta \cdot 2\pi/\lambda$ ,其中, $\varphi$ 是方位角, $\theta$ 是俯仰角, $\lambda$ 是波长。相位补偿模块把相位计算的结果与通道校准数据以及相位补偿数据相加,得到最终的相位值。移相器接口模块直接对移相器进行控制,进而达到控制整体相控阵天线波束指向的目的。参数设置模块可以由上位机软件控制数据写入和替换,可存储指向修正数据和相位补偿数据。温度数据采集模块用于采集温度遥测数据,并发送给指令回馈模块。复位模块用于实现上电初始复位和指令复位功能,方式采用异步复位、同步释放。波束控制模块 FPGA 软件功能模块组成框图如图 10 所示。

## 5 相控阵天线电源模块设计

电源模块主要由 DC-DC 器件构成,并配备外围滤波电路、保护电路和缓起电路。电源模块将外部一次电源供电转化为产品内部和组件所需的二次电源。电源模块电源转换框图如图 11 所示。

在供电初始设计电源保护电路。供电母线输入处设

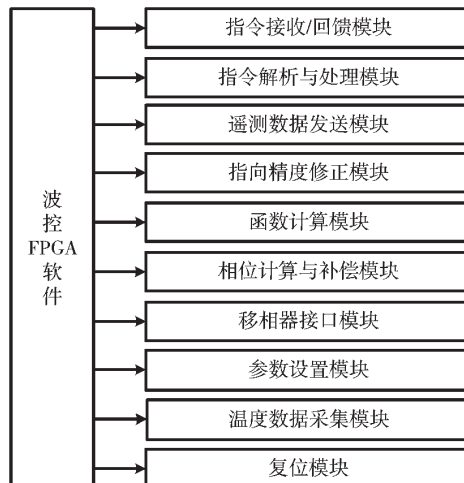


图10 波束控制模块 FPGA 软件功能模块组成

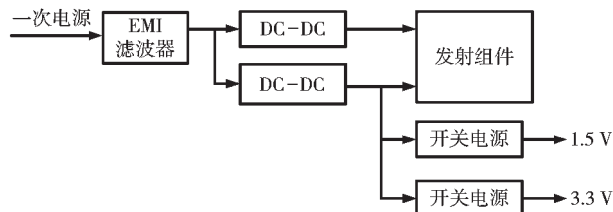


图11 电源模块电源转换框图

置熔断器对供电母线进行保护,防止产品意外短路危害供电母线。熔断器使用非平衡并联形式冗余,可防止意外浪涌电流同时损坏冗余熔断器。电源保护电路框图如图 12 所示。

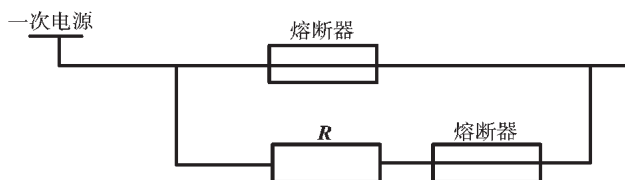


图12 电源保护电路框图

本相控阵天线单机电源模块内 EMI 滤波器和 DC-DC 供电入口处均含有储能滤波电容,上电瞬间呈短路(虚短)特性,将产生较大浪涌电流,对熔断器和电源母线产生冲击,因此设计浪涌抑制电路,限制上电浪涌电流。

浪涌抑制电路采用 PMOS 管搭建,利用 PMOS 管从截止至导通的中间高阻过程给后端电容预充电,利用 PMOS 管内阻限制充电电流,可实现抑制上电浪涌电流的目的。浪涌抑制电路框图如图 13 所示。

本相控阵天线电源模块在 DC-DC 后端设计 II 型二次电源滤波,利用大、小电容和磁珠搭配抑制 DC-DC 开关噪声对数字电路的影响。二次电源地对机壳设置滤波电容抑制共模干扰。同时本设计在开关电源后端和每个数字电路供电引脚就近处设置旁路电容,抑制电路高速开关对二次电源的影响。



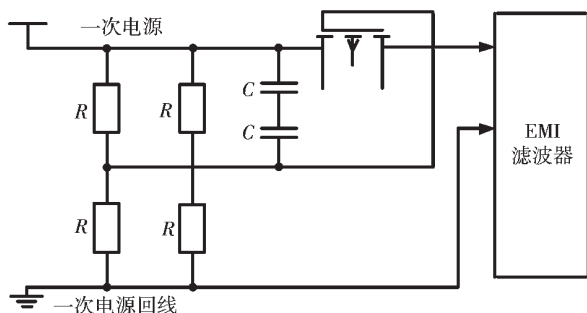


图 13 浪涌抑制电路框图

## 6 相控阵天线整机测试结果

相控阵天线按照上述仿真、设计加工实物进行测试,加工实物照片如图 14 所示(已加装天线罩),整体尺寸为:90 mm×110 mm×95 mm。驻波实测值如图 15 所示,由图可以看出,在中心频点8.2 GHz处,驻波比小于1.4,在相控阵天线整个工作带宽内,驻波比均小于1.6,可见此天线匹配性能良好。

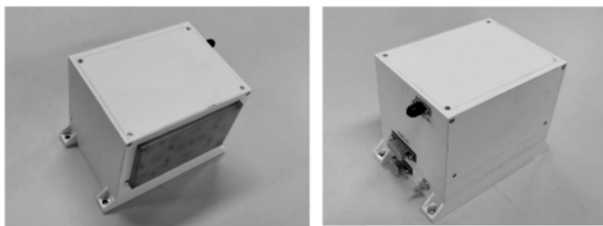


图 14 相控阵天线实物图

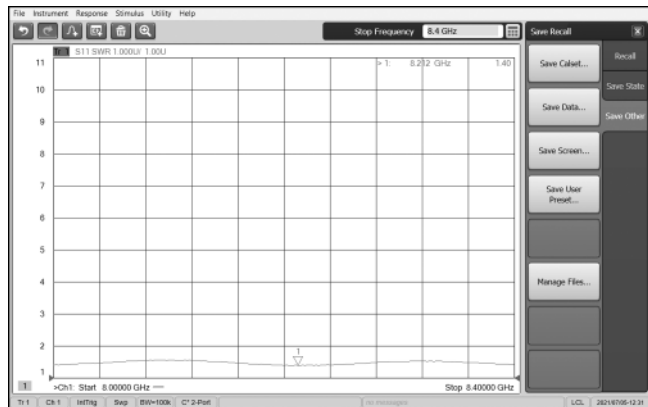


图 15 相控阵天线驻波实测图

相控阵天线的实测轴比方向图如图 16~图 18 所示。由图 16 可知,此天线阵列在谐振点处法向方向的实际增益为 25.7 dB,前后比大于 30 dB,半功率波瓣宽度为 22.8°,最大主瓣电平与最大副瓣电平差值大于 10 dB,轴比小于 1 dB。根据天线阵元仿真得到的增益指标和阵元数量,可通过理论计算得出天线阵列的增益在 16 dB 左右,加上天线阵列后端的诸多功放增益和衰减,此相控阵天线整体增益实测值与仿真设计值吻合。由图 17 可知,此天线阵列在谐振点处离轴角 30°、方位角 270°

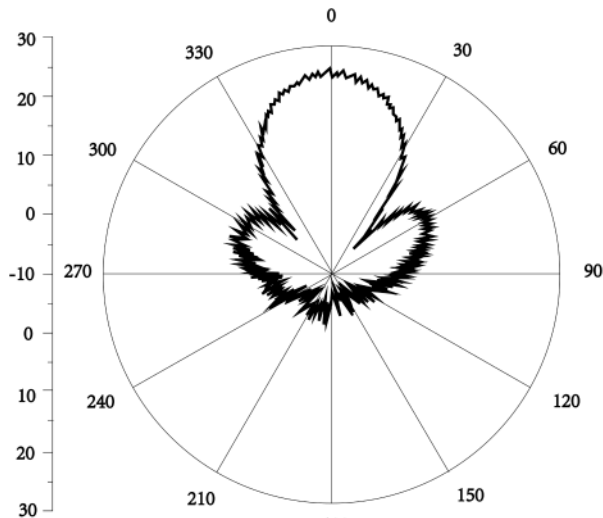


图 16 相控阵天线实测轴比方向图(法向)

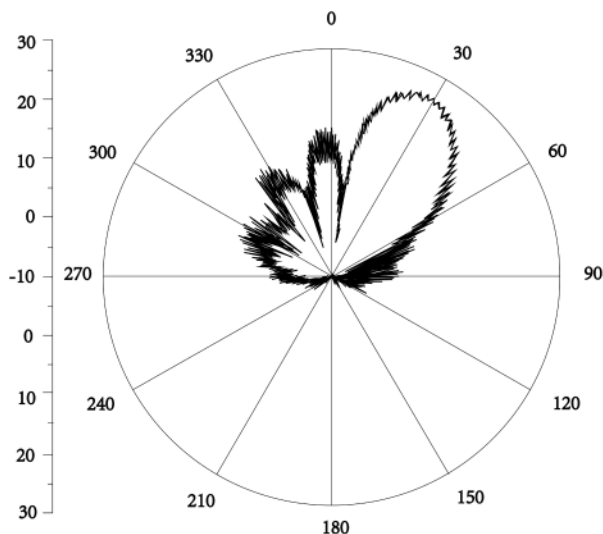


图 17 相控阵天线实测轴比方向图(离轴角 30°, 方位角 270°)

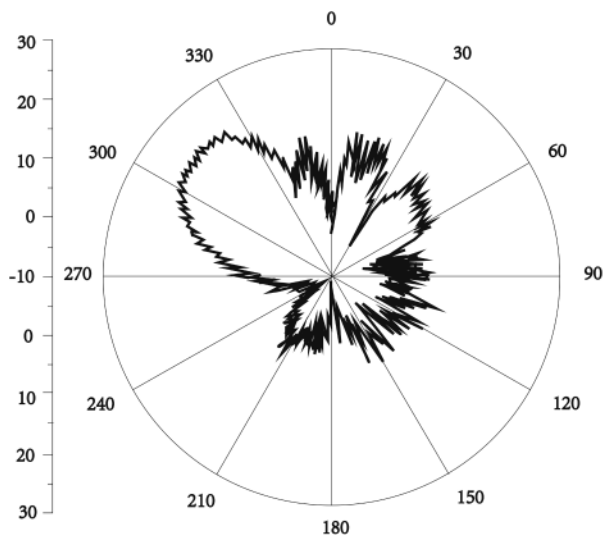


图 18 相控阵天线实测轴比方向图(离轴角 60°, 方位角 90°)

方向电扫的实际增益为 25.3 dB,前后比大于 30 dB,轴

比为 1 dB,由方向图可以看出波束最大指向与法向角度为 30°。由图 18 可知,此天线阵列在谐振点处离轴角 60°、方位角 90°方向电扫的实际增益为 20.9 dB,前后比大于 15 dB,轴比为 1.5 dB,由方向图可以看出波束最大指向与法向角度约为 53°,由于天线波束较宽,可在离轴角 60°的方向上达到较好的辐射性能。

相控阵天线上电后,可以由地面检测设备查看相控阵天线的遥测数值(即它的工作状态),此时为图 18 的工作状态截图,如图 19 所示。由图 19 可知,天线工作状态正常,12 个阵元的通道开关全部打开,移相值根据实际初始调试情况确定,后续无特殊工况或故障不再进行更改。由相控阵天线的遥测可以看出当前状态下单机工作的正常情况以及工况情况。

系统接收时间	遥测参数名称	原码	工程值
2021-06-02 04:54:31.081	数传天线指令计数	03(H)	3
2021-06-02 04:54:31.081	接收天线遥测状态	1(b)	正常
2021-06-02 04:54:31.081	天线组件电源状态	1(b)	加热
2021-06-02 04:54:31.081	离轴角	003C(H)	60
2021-06-02 04:54:31.081	方位角	005A(H)	90
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道1开关状态	1(b)	开
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道2开关状态	1(b)	开
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道3开关状态	1(b)	开
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道4开关状态	1(b)	开
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道5开关状态	1(b)	开
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道6开关状态	1(b)	开
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道7开关状态	1(b)	开
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道8开关状态	1(b)	开
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道9开关状态	1(b)	开
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道10开关状态	1(b)	开
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道11开关状态	1(b)	开
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道12开关状态	1(b)	开
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道1移相值	00000011(b)	3
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道2移相值	00001101(b)	13
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道3移相值	00011111(b)	31
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道4移相值	00000011(b)	3
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道5移相值	00000001(b)	1
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道6移相值	00100000(b)	32
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道7移相值	00001100(b)	12
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道8移相值	00000010(b)	2
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道9移相值	00001011(b)	11
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道10移相值	00010101(b)	21
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道11移相值	00010111(b)	23
2021-06-02 04:54:31.081	天线通道12移相值	00011100(b)	30

图 19 相控阵天线状态参数遥测值截图

## 7 结论

本文设计了一款高增益圆极化可宽角度电扫的星载相控阵天线。天线阵元采用底馈形式,利用切角技术实现圆极化,开槽技术减小结构尺寸,实现小型化。并且详细阐述了相控阵天线的组成结构。此相控阵天线经加工测试,测试结果良好,验证了此设计的合理性。该相控阵天线工作在 X 频段,具有良好的辐射性能,且结构简单紧凑,可用于 X 波段无线通信系统中。同时此相控阵天线对相关领域天线设计也有一定的指导意义。

## 参考文献

- [1] JIN Y T, SI L M, ZHANG Q L, et al. Dual-band bandpass filter using composite metamaterial resonator[J]. Modern Physics Letters B, 2016, 30(7): 1-7.
- [2] 何善宝. 浅谈商业遥感星座市场现状及发展[J]. 国际太空, 2019, 9(1): 62-63.

- [3] JIN Y T, SI L M, ZHANG Q L, et al. New design of ultra-wideband bandpass filter using metamaterial resonator[C]//6th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies. Shanghai, China, 2015: 561-563.
- [4] 张财广, 熊博莅, 匡纲要. 光学卫星遥感图像舰船目标检测综述[J]. 电波科学学报, 2020, 35(5): 637-647.
- [5] 郭子千, 郭月朋. 卫星遥感技术在森林资源调查中的运用分析[J]. 种子科技, 2020, 38(18): 125-126.
- [6] 许益乔, 张占月, 王登林, 等. 军地遥感卫星联合使用问题研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16(1): 81-86.
- [7] 李晓芳, 王娜, 史德杰. 雷达卫星遥感的发展及应用现状[J]. 卫星应用, 2013, 5(1): 44-50.
- [8] 金宇婷, 邢斯瑞, 孙伟. 星载高增益圆极化小型微带天线阵列[J]. 电子技术应用, 2020, 46(5): 59-62.
- [9] SCHUSS J J, UPTON J, MYERS B, et al. The Iridium main mission antenna concept[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(3): 416-424.
- [10] DIETRICH F J, METZEN P. The globalstar cellular satellite system[J]. IEEE Transactions on Antennas, 1998, 46(6): 935-942.
- [11] GREDAL L A, DREHER A. Tx-terminal phased array for satellite communication at Ka-band[C]//The 37th European Microwave Conference. Munich, 2007: 266-269.
- [12] AKIRA A, MASAAKI I, KENICHI H, et al. Ka-band active phased array antenna for windsatellite[C]//21st AIAA International Communications Satellite systems Conference and Exhibit. Washington D.C., 2003.
- [13] LIER E, PURD D, MAALOUF K. Study of deployed and modular active phased-array multibeam satellite antenna[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2003, 45(5): 34-35.
- [14] 田垒. 适应于小卫星的低成本相控阵天线技术研究[J]. 电子质量, 2021, 3(1): 7-10.
- [15] 李靖, 王金海, 刘彦刚, 等. 卫星通信中相控阵天线的应用及展望[J]. 无线电工程, 2021, 3(1): 1076-1084.

(收稿日期: 2021-06-07)

## 作者简介:

金宇婷(1991-), 通信作者, 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 卫星数据传输系统设计, E-mail: yuting910701@163.com。

邢斯瑞(1987-), 男, 硕士, 副研究员, 主要研究方向: 卫星通信系统设计。

沈晨阳(1993-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 卫星测控系统设计。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所