

doi: 10.7690/bgzd.2022.07.006

基于低轨卫星通信 K/Ka 车载相控阵设计

杨其聪, 程昱宇, 钟海, 黄鹏, 廖晨宇

(四川九州电器集团有限责任公司通信与对抗事业部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对卫星通信地面车载终端, 提出一种 K/Ka 频段相控阵设计方案为用户终端提供卫星信号通信服务。相控阵雷达 (phased array radar, PAR) 收发系统的接收采用单馈宽带贴片微带天线, 发射采用双馈贴片微带天线; 通过对单个阵元进行旋转形成 2×2 子阵; 相控阵天线在方位 360° 和俯仰 60° 锥形范围内扫描。实验结果表明: 该方案能实现圆极化功能, 结构紧凑, 提高扫描轴比性能, 阵列的增益、阻抗和轴比带宽可达到 30%。

关键词: 低轨卫星通信; 卫星互联网; K/Ka 频段; 相控阵天线; 圆极化

中图分类号: TN927 **文献标志码:** A

Design of K/Ka Vehicle Phased Array Based on Low Earth Orbit Satellite Communication

Yang Qicong, Cheng Yuyu, Zhong Hai, Huang Peng, Liao Chenyu

(Communication and Countermeasures Division, Sichuan Jiuzhou Electric Group Co., Ltd., Mianyang 621000, China)

Abstract: Aiming at the ground SATCOM vehicle terminal, a K/Ka-band phased array design scheme is proposed to provide satellite signal communication service for the user terminal. The phased array radar (PAR) transceiver system uses a single-fed broadband patch microstrip antenna for reception and a double-fed patch microstrip antenna for transmission; a 2×2 sub-array is formed by rotating a single array element; The phased array antenna scans in a cone of 360° in azimuth and 60° in elevation. The experimental results show that the scheme realizes the circular polarization function, has a compact structure, and improves the scanning axial ratio performance. The gain, impedance and axial ratio bandwidth of the array can reach 30%.

Keywords: low orbit satellite communication; satellite internet; K/Ka band; phased array antenna; circular polarization

0 引言

相控阵雷达 (PAR) 因其波束快速扫描与波束赋形的特点, 相比传统雷达有着无与伦比的使用灵活性。目前, 相控阵雷达的发展与雷达观测任务需求的增加密切相关, 而芯片 MMIC 技术的进步促进了低成本相控阵雷达的广泛应用^[1]。

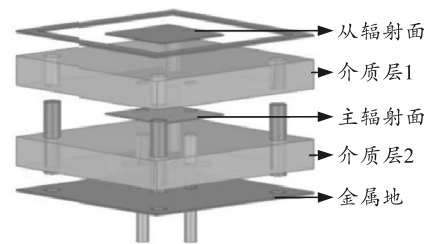
早在 20 世纪末, 世界各国机构便开始了星载相控阵天线的相关研究^[2]。2020 年, SpaceX 提出了“星链”星座及其地面终端的“星链”计划, 通过 40 000 多颗相互连接的卫星建立一个廉价的全球空间通信系统^[3]。2020 年 12 月 29 日, 我国成功发射了自己的卫星, 标志着中国有了自己的“星链”^[4]。我国已发射了 300 多颗低轨卫星, 对于中国的“卫星链”, 有学者提出通过相应的车载相控阵雷达系统向用户提供卫星相关服务^[5-7]。

笔者设计一种接收 (17.7~19.7 GHz) 和发射 (27.5~29.1 GHz) 的分面相控阵雷达收发系统。接收采用单馈宽带贴片微带天线, 发射采用双馈贴片

微带天线。为提高相控阵天线的圆极化扫描性能, 采用围绕一个阵元一个角旋转天线阵元形成 2×2 子阵, 此天线子阵可扩展为任意形状的全阵。相控阵天线在方位 360° 和俯仰 60° 锥形范围内扫描。

1 Ka 单元设计

如图 1 所示, 本宽带辐射阵元在结构上, 从上到下依次为寄生辐射片、介电层 1、主辐射片和介电层 2。通过设置一个寄生辐射片, 与主辐射贴片之间的耦合效应, 可额外获得一个谐振点, 通过对该谐振点的调试, 最终可达到天线整体工作带宽的目的, S_{11} 曲线得以展宽。

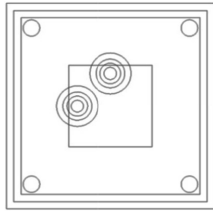


(a) 3D 视图

收稿日期: 2022-03-22; 修回日期: 2022-04-22

作者简介: 杨其聪 (1980—), 男, 福建人, 高级工程师, 从事二次雷达、数据链和卫星通信研究。E-mail: yangqicong9@163.com。

通信作者: 程昱宇 (1989—), 男, 四川人, 硕士, 工程师, 从事数据链及卫星通信研究。E-mail: 380532997@qq.com。



(b) 透视图

图 1 发射单元结构拓扑

由于采用堆叠微带天线形式，该天线单元介质板厚度较厚。根据表面波相关理论，介质层厚度越大，越容易激励其表面波，进而影响天线本来的辐射状态，也容易引起阵列单元间的过度耦合，造成天线有源驻波等性能参数下降。为此，需要将表面波截断，在此对天线辐射区域利用贯穿介电层 1 和介电层 2 的金属化过孔最终接与金属地完成屏蔽，具体结构拓扑如图 1 所示，金属化过孔的实现准则与传统的 SIW 技术无异，孔芯间距取工作波长的约 1/10。利用多层 PCB 压合工艺实现上述 SIW 金属化过孔十分容易。此外，该金属化过孔构成的金属腔可展宽天线的半功率波束宽度，从而减小大角度扫描时的增益下降^[8]。

另一方面，该低轨卫通相控阵终端为圆极化工作模式。天线组阵后，为了获得带内优异的大俯仰角扫描能力，天线单元不仅需要驻波带宽满足系统要求，同时需要具备优异的轴比带宽。根据微带天线理论，天线形成圆极化需要具备 2 个条件：1) 两路正交分量幅度相同；2) 两路正交分量相位差 90°。

为此，天线单元采用 2 点强制馈电，通过威尔金森功分器实现 2 路端口的能量等幅分布，而 90° 相位差由后端 TR 组件移相器保证。

利用仿真软件对该 Ka 频段天线单元进行全波仿真，如图 2 所示。

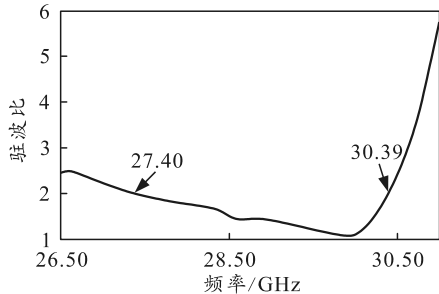


图 2 发射天线单元 VSWR

由上图可以看到，天线的工作频段十分可观，在要求的工作频段内，其 $VSWR < 2$ 。同时，天线单元各剖面方向图对称度高，有利于后期旋转子阵。

为了进一步提升天线阵列整体的轴比特性及大

俯仰角扫描能力，阵列拓扑采用 2×2 单元旋转的子阵布局，如图 3 所示。通过此种方式， 2×2 子阵的 8 个馈电点及 4 个贴片呈现完全对称的形态，从物理层面保证了其子阵辐射特性的对称性，轴比特性势必获得较大提升。

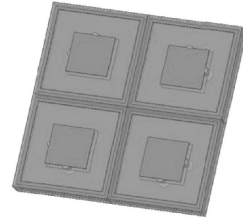


图 3 基于 2×2 旋转发射子阵

对 2×2 子阵进行扩展，组成 16×16 发射全阵，模型如图 4 所示。

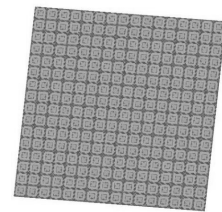


图 4 发射全阵模型

对全阵进行全波仿真，按下式计算馈入相位可实现扫描^[5]。

$$\varphi_{mn} = k \times (m d_x \cos \varphi_s + n d_y \sin \varphi_s) \sin \theta_s, \quad k = 2\pi f/c。$$

式中： f 为中心频点； d_x 为 x 轴单元间距； d_y 为 y 轴单元间距； θ_s 为 z 轴夹角； φ_s 为 x 轴夹角。

(m, n) 位号为：

- (1, 1) (1, 2) (1, 3) ...
- (2, 1) (2, 2) (2, 3) ...
- (3, 1) (3, 2) (3, 3) ...
- ⋮ ⋮ ⋮ ⋮

其扫描增益方向如图 5 所示。

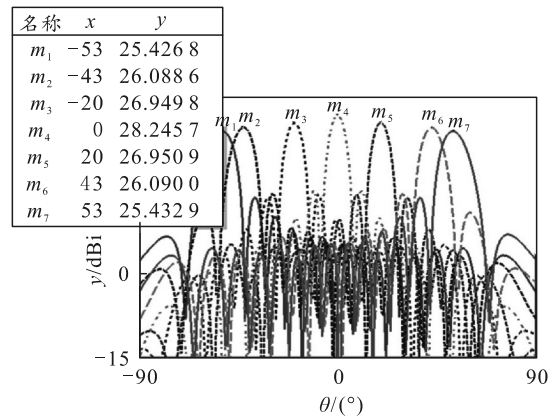


图 5 发射阵列 27.5 GHz 扫描方向

图 6 为 53° 扫描轴比图。

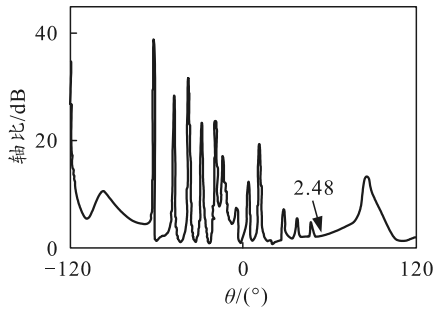


图 6 发射阵列 27.5 GHz 扫描 53°轴比方向

16×16 相控阵天线扫描特性如表 1 所示。

表 1 16×16 发射阵列扫描特性

频率/GHz	法向增益/dBi	扫描到 53°增益下降/dB	扫描到 53°轴比/dB
27.50	28.20	2.81	2.48

通过上述图表曲线、统计数据可以看到，发射阵列具备优异的大俯仰角扫描能力，±60°圆锥扫描范围内，轴比≤3 dB，扫描增益下降≤3 dB^[9]，上述特性使得该型天线完全具备对低轨卫星实施快速动态跟踪的能力，尤其是在运动载体中。

2 K 单元设计

与发射单元类似，设置一个寄生辐射贴片，与主辐射贴片之间的耦合效应，可额外获得一个谐振点，通过对该谐振点的调试，最终展宽天线工作带宽。同样，由于介质层较厚，需要将表面波截断，减小单元间耦合，对天线辐射区域利用贯穿介电层 1 和介电层 2 的金属化过孔最终接与金属地完成屏蔽，单元模型如图 7 所示。

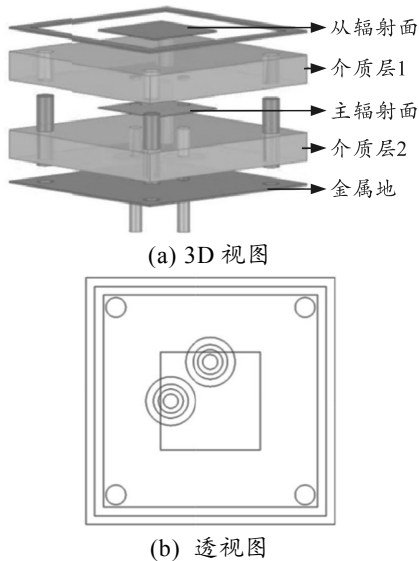


图 7 接收天线单元结构拓扑

单元工作于 K 波段，通过多次仿真优化得到了最优 VSWR 如图 8 所示。

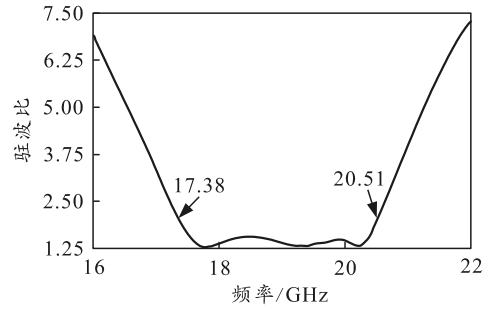


图 8 接收天线阵元驻波

同样，为了提高接收阵列的大俯仰辐射特性，基于 2×2 规模，对接收单元进行旋转形成子阵，如图 9 所示。

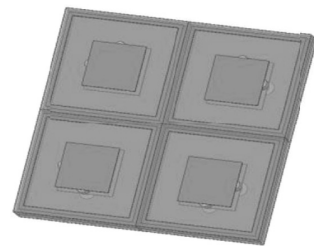


图 9 基于 2×2 旋转接收子阵

将 2×2 接收子阵扩展组成 16×16 接收全阵，如图 10 所示。通过全波仿真软件对接收全阵进行仿真。

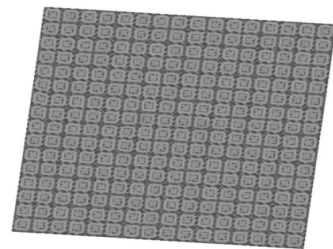


图 10 接收全阵

按下式计算馈入相位可实现扫描：

$$\varphi_{mn} = k \times (m d_x \cos \varphi_s + n d_y \sin \varphi_s) \sin \theta_s, \quad k = 2\pi f / c$$

式中： f 为中心频点； d_x 为 x 轴单元间距； d_y 为 y 轴单元间距； θ_s 为 z 轴夹角； φ_s 为 x 轴夹角。

其扫描增益方向如图 11、12 所示。

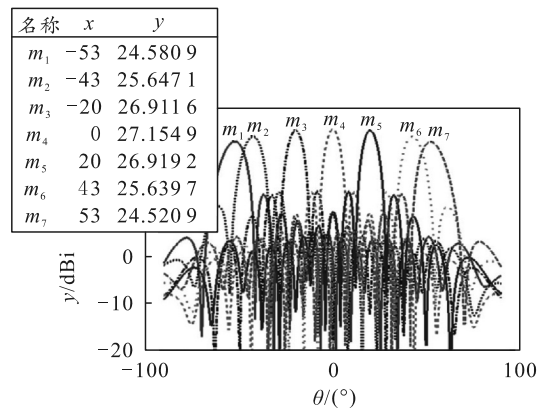


图 11 接收全阵 17.7 GHz 扫描方向

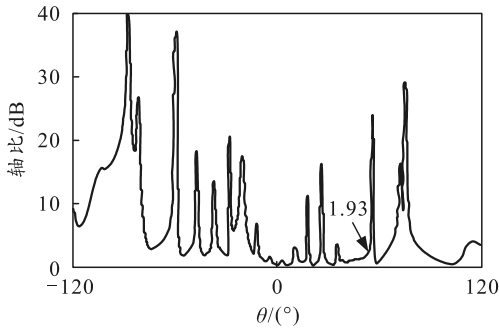


图 12 接收全阵 17.7 GHz 扫描 53°轴比方向
16×16 规模接收阵列扫描特性如表 2 所示。

表 2 16×16 接收阵列扫描特性

频率/GHz	法向增益/dBi	扫描到 53° 增益下降/dB	扫描到 53° 轴比/dB
17.70	27.15	2.63	1.93

同样，由仿真数据可以看到，60°扫描轴比 < 3 dB。在 60°扫描天线阵列增益下降 2.63 dB。接收全阵同样具备优异的大俯仰角辐射能力。

3 实物样机测试及分析

为了验证设计仿真结果，笔者制造加工了收发阵列实物样机(如图 13、14 所示)并对其进行测试。

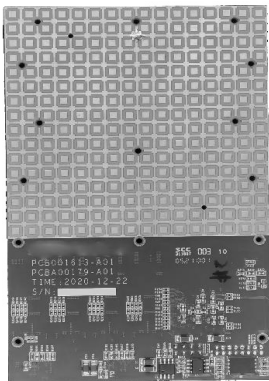


图 13 发射阵列实物

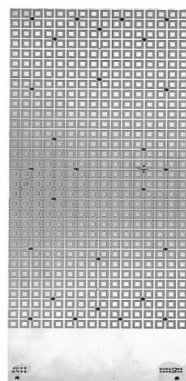


图 14 接收阵列实物

测试结果如图 15、16 所示，在工作带宽内，发射阵列轴比 ≤ 3 dB，60°扫描情况下增益损失仅为 3.5 dB。

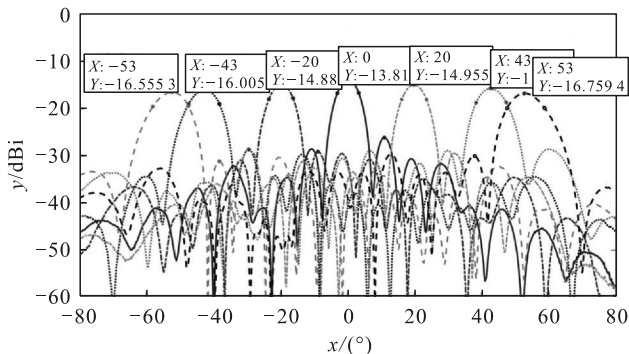


图 15 27.5 GHz Phi=0°

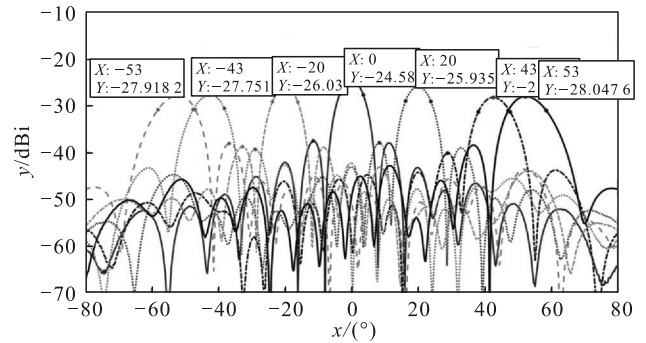


图 16 17.7 GHz Phi=0°

为达到低轨星座入网引用要求，笔者利用上文所述收发阵列进行共口径集成实现全功能状态的卫通相控阵终端，对其进行制造加工并完成测试。整机暗室测试如图 17 所示。

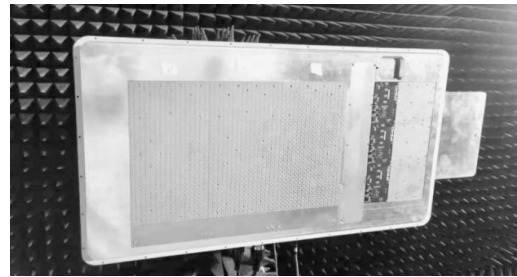


图 17 收发全阵实物

根据暗室中的测试记录，K/Ka 波段宽波束天线单元具有宽带和宽波束特性，在 ±60°波束范围内具有低增益波动，全功能整机的测试结果与前述收发阵列的测试结果基本吻合，达到了设计预期值。

4 结束语

笔者设计、制造并测试了一种具有接收机 (17.7~19.7 GHz) 和发射机 (27.5~29.1 GHz) 的收发共口径集成的低轨卫通相控阵天线。天线阵有 3 个特点：1) 发射天线单元采用分层宽带设计，接收天线采用单馈分层设计，实现圆极化功能，结构紧凑；2) 通过阵元旋转提高扫描轴比性能；3) 该阵列的增益、阻抗和轴比带宽可达到 20%。

该型卫通相控阵终端优异的大俯仰角辐射能力使得其完全能够满足低轨卫星通信的要求。

参考文献：

[1] 顾叶青, 孙为民, 余觉. 有源相控阵天线结构仿真分析[J]. 机电工程, 2020, 37(1): 59-63.
[2] WANG C S, WANG Y, LIAN P Y, et al. Space Phased Array Antenna Developments: A Perspective on Structural Design[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2020, 35(7): 44-63.