

高低轨跟踪兼容的平板天线实现方法

陈 剑, 张正谦, 马新生, 钞 婷, 郭刚涛
(西安航天测绘数据技术有限公司, 陕西 西安 710100)

摘要: 为提升卫星通信天线产品在野外的便携性、易拆装性、使用性, 提出一种高低轨跟踪兼容的平板天线实现方法。天线采用天线射频一体化架构, 采用微带阵列天线与射频通道一体化平板式集成, 天线射频采用扁平化、一体化设计, 结合高密度多层垂直互联工艺, 整机体积小、重量轻、功耗低, 且跟踪控制单元即可满足高轨卫星信标及载波跟踪, 也可满足低轨卫星轨道解析及程序引导跟踪。该天线使用时无须手动拆装, 可一键展开对星完成通信接入, 对于高中低轨卫星均可实现高精度跟踪和稳定通信。

关键词: 平板天线; 便携; 低轨卫星; 跟踪

中图分类号: TN927.2

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022049

Implementation Method of GEO and LEO Satellite Tracking Compatible Flat-Plate Antenna

CHEN Jian, ZHANG Zhengqian, MA Xinsheng, CHAO Ting, GUO Gangtao
Xi'an Aerospace Remots Sensing Date Technology Corporation, Xian 710100, China

Abstract: In order to improve the portability, disassembly and usability of the satellite communication antenna products in the field, a GEO and LEO satellite tracking compatible flat-plate antenna implementation method was proposed, the micro strip array antenna was integrated with the radio frequency channel, and the radio frequency of the antenna was flat and integrated, combined with the high density multi-layer vertical interconnection technology, the whole machine was small in size, light in weight and low in power consumption, and the tracking control unit could satisfied the requirements of GEO Beacon and carrier tracking, also could satisfied the LEO analysis and the program guidance tracking. The antenna did not need manual assembly and disassembly, and could be used for satellite communication with one-button deployment. high-precision tracking and stable communication could be achieved for GEO, MEO and LEO satellite.

Keywords: flat-plate antenna, portable, LEO satellite, tracking

0 引言

我国卫星通信领域Ka高通量及低轨卫星通信的不断发展, 尤其是低轨卫星的兴起, 必将造成传统天线在低轨卫星通信应用中功能受限, 或设备高低轨卫星跟踪不兼容、频率不覆盖等诸多问题。SpaceX公司的低轨星链便携终端具有结构简单、轻量化携带、快速部署等诸多优点。目前我国还缺少适应高低轨兼容通信的便携式天线, 该类天线可在抢险救灾、应急指挥、野外作战指挥中轻量化携带、远距离背负、快速野外展开部署、一键对星通信, 确保在复杂地质条件或在供电无法保证的野外环境中依靠蓄电池装置供电完成高质量卫星通信, 为获取灾情、敌情及战场环

境等提供可靠的卫星通信保障。

本文以满足Ka频段高通量卫星及Ka频段低轨卫星为典型应用, 以等效0.45 m Ka频段平板天线为典型案例, 从天线的集成架构、宽带特性实现、强交叉极化隔离、低远旁瓣特性、过顶跟踪特性、程序引导跟踪特性等方面进行论述, 提出一种高中低轨卫星跟踪兼容的可折叠宽带平板背负式通信天线实现方法, 可为后续高低轨卫星通信地面应用提供切实可行的产品架构解决方案。

1 整体架构及宽带收发能力分析

为满足天线轻量化携带、远距离背负、快速野外展

开部署、一键对星通信需求,天线采用如图1所示的平板可折叠的整体架构,进行天线射频一体化集成、伺服转台一体化集成、基带及电源管理一体化集成,形成笔记本式的高集成设备。通过小型化、扁平结构的天线射频降低整机的负载和功耗,采用伺服驱动的方式,可实现对目标信号的大范围跟踪捕获和通信。平板天线模块化集成框图如图2所示。



图1 平板天线模型示意

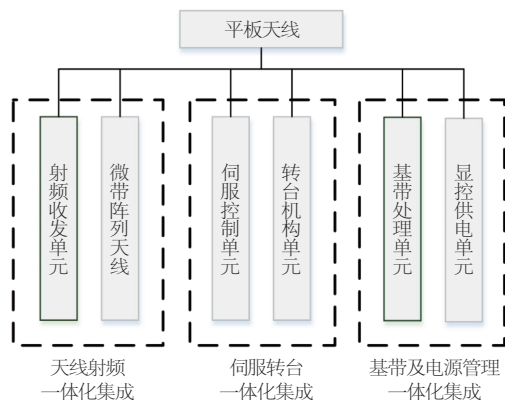


图2 平板天线模块化集成框图

天线射频一体化集成单元采用扁平化结构设计,内部采用MMIC与混合集成电路相结合的设计,射频信号与电源保护及控制电路采用多种、多层印制板混压设计,进一步提高电路设计的集成度,满足小型化及一致性的要求。图3为天线射频一体化集成单元效果,主要包含接收阵面、发射阵面、接收射频通道、发射射频通道、集成化PCB及散热模块。

通过对阶梯喇叭阵元、微带贴片阵元、偶极子阵元和Vivaldi阵元等形式进行对比,选取合理的阵元作为阵列天线的单元,其中,常用阵列天线单元如图4所示。

为满足Ka频段天线的宽带覆盖,并缩小整机尺寸、降低重量,本文选取微带贴片阵元作为本方案的阵列单元。微带

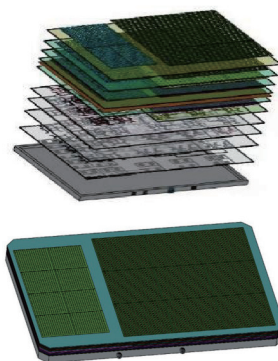


图3 天线射频一体化集成单元效果

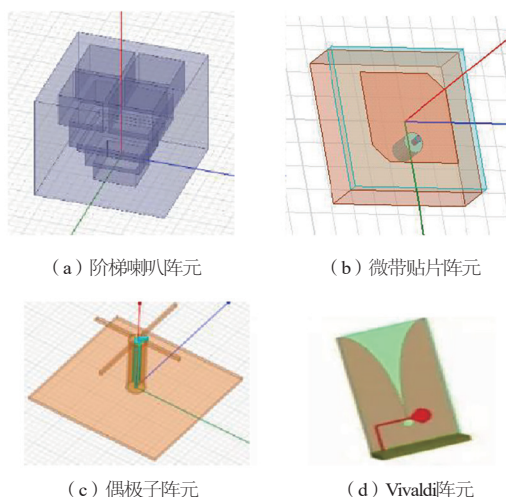


图4 常用阵列天线单元

贴片阵列天线采用多层PCB工艺,可以实现过孔垂直互联功率合成,减小天线整体损耗,且加工精度优于机械加工精度,因此是低成本、低损耗阵列天线的优选方案。为实现天线的圆极化,天线单元采用正交微带线进行馈电,如图5所示。

为更好地满足天线宽带特性及强收发隔离特性,天线阵列采用收发分离阵面布局方案。接收阵列采用 48×48 阵元,设置中心频点处半波长为组阵周期,边长 $7.5 \text{ mm} \times 48 = 360 \text{ mm}$ 的正方形布局。发射阵列采用 64×32 阵元形式,同样选取中心频点处半波长为组阵周期,形成阵列长边 $5 \text{ mm} \times 64 = 320 \text{ mm}$,短边 $5 \text{ mm} \times 32 = 160 \text{ mm}$ 的矩形布局,收发分离阵面结构示意图如图6所示。

根据 G/T 计算公式

$$G/T = G_e + 10 \times \lg(10N_x) - 10 \times \lg[10T_a + 290 \times (NF - 1)] \quad (1)$$

选取接收频段18~21 GHz中3个典型频点进行分析,得出各频点下应满足的 G/T 值见表1。

采用天线射频一体化集成方案,在发射链路中,中频信道输出信号首先经极化切换开关,传输至左旋圆极化

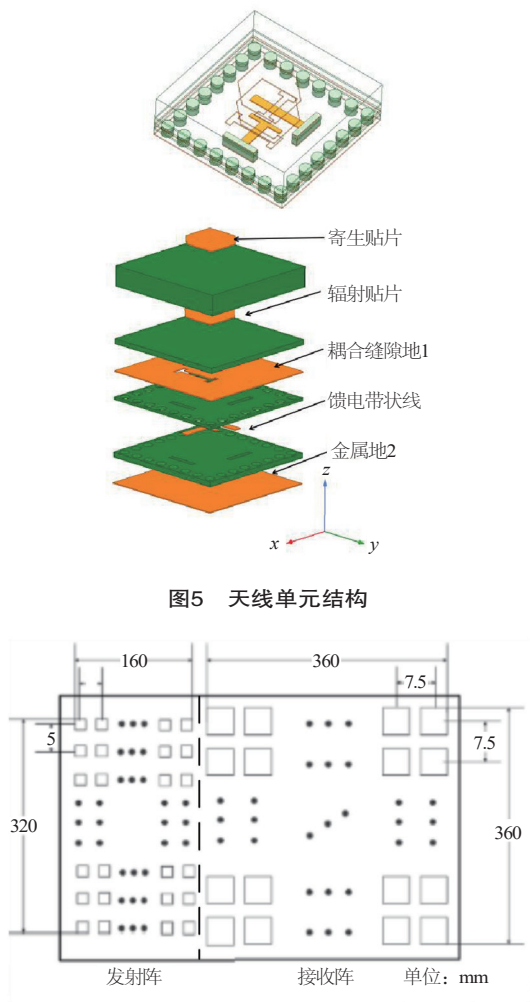


图5 天线单元结构

图6 收发分离阵面结构示意图

表1 Ka接收频段典型频点G/T值分析

频点/GHz	LHCP设计(G/T)/(dB·K ⁻¹)	RHCP设计(G/T)/(dB·K ⁻¹)
18	11.49	11.61
19.5	11.92	11.81
21	12.39	12.23

(LHCP)或右旋圆极化(RHCP)任一通道。在每个通道后,都连接1分8功分网络,将信号等幅同相分为8路。对8路信号进行功率放大,通过阻收滤波器,再进行1分256等功分,馈往每个天线阵元对应的圆极化端口。

选取发射频段27~30 GHz中3个典型频点进行分析,得出各频点下应满足的EIRP值见表2。

2 强交叉极化隔离

由于目前通信卫星多采用极化复用,天线需满足左旋和右旋分时切换工作。根据工程经验,对于阵列天线,

表2 Ka频段发射典型频点EIRP值分析

频点/GHz	LHCP设计EIRP/dBW	RHCP设计EIRP/dBW
27	44.29	44.19
28.5	44.79	44.46
30	45.43	45.01

交叉极化隔离度的仿真结果如果为30 dB左右,加工成型引入功分馈电相位偏差、馈线能量互耦等因素,将会使得实测交叉极化隔离度较仿真结果恶化12 dB左右,如不采用特殊方法和工艺,交叉极化很难达到25 dB。传统方式交叉极化隔离度仿真结果如图7和图8所示。

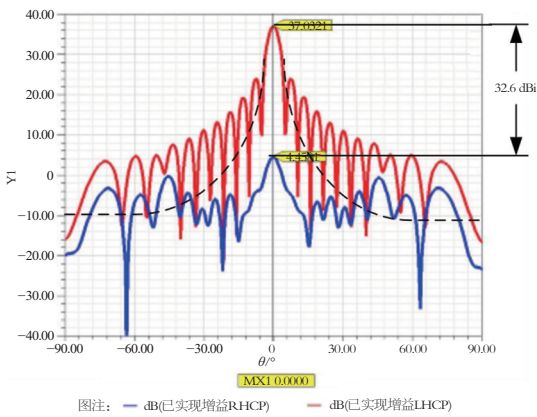


图7 28.5 GHz传统方法仿真交叉极化及旁瓣包络曲线

图7中,增益高的曲线为主极化方向图曲线,增益低的曲线为交叉极化方向图曲线,两者最大辐射方向增益之差为交叉极化隔离度。

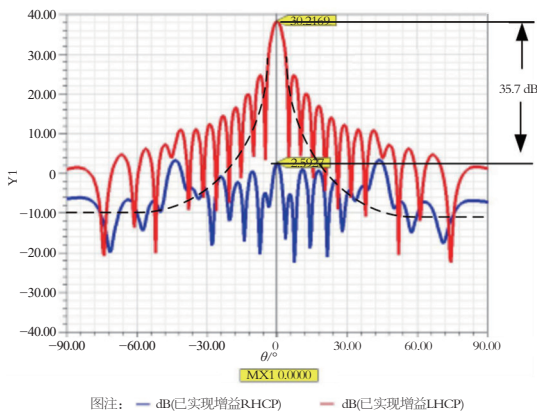


图8 30 GHz传统方法仿真交叉极化及旁瓣包络曲线

由于发射频段频率高,对交叉极化更为敏感,选取典型发射频点进行仿真分析,实测交叉极化隔离度很难

达到25 dB。

为提升阵列天线交叉极化隔离度,采用如下5种措施:

(1) 采用镜像对称微带贴片阵元设计,以减少高次模的产生,获得更优异的单元交叉极化抑制;

(2) 采用缝隙耦合馈电形式,既增大微带贴片天线带宽,又可以将全部馈电网络与贴片分别置于金属地板两侧,抑制馈线辐射;

(3) 馈电网络采用分层设计,通过地板隔离两个极化,避免同层两端口馈线之间的强耦合;

(4) 采用并馈与反相馈电相结合的形式馈电,利用正交走线和反相馈电走线的方式抑制左旋圆极化与右旋圆极化馈线上的能量互耦;

(5) 采用顺序旋转馈电来提供产生圆极化所需要的相位延迟,可显著增强主极化、抑制交叉极化。

通过应用以上5种提升交叉极化隔离度的方法,设计相同等效口径天线,取相同频点进行仿真,结果如图9和图10所示,各频点交叉极化隔离度均能优于40 dB。考虑微带天线加工成型后将会有12 dB左右的恶化,实际隔离度均能满足27 dB以上,交叉极化隔离度得到显著提升。

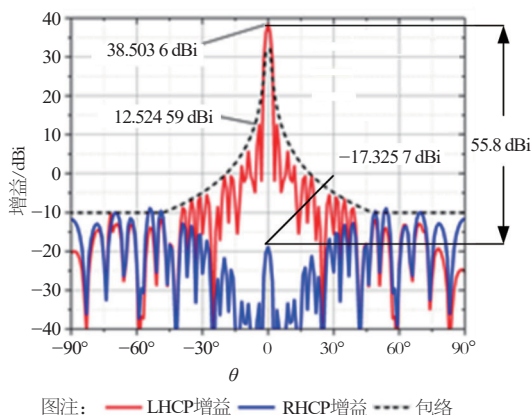


图9 28.5 GHz交叉极化隔离度及远旁瓣包络曲线

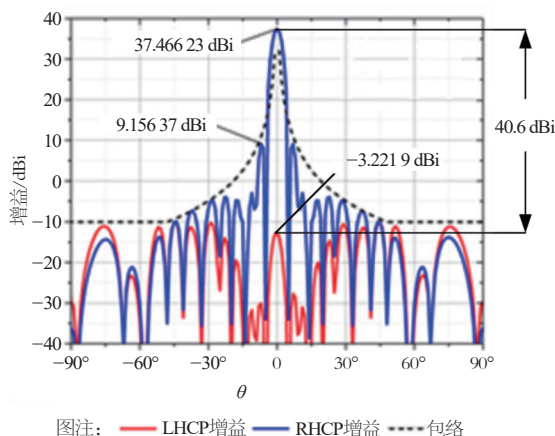


图10 30 GHz交叉极化隔离度及远旁瓣包络曲线

3 低远旁瓣抑制分析

本文通过免疫算法优化稀疏阵列分布,可实现接收阵和发射阵第一旁瓣优于-17 dB, $\pm 90^\circ$ 范围内旁瓣低于指标要求包络曲线,全面优于通用旁瓣规定: $\psi_{\min} \leq \psi < 48^\circ$, 旁瓣峰值增益 $\leq (32 - 25 \log \psi)$ dBi; $48^\circ \leq \psi < 180^\circ$, 旁瓣峰值增益 ≤ -10 dBi包络要求。

图7和图8为传统不加免疫算法和稀疏布阵时的仿真方向图,可以看出,传统方法仿真得到的远旁瓣抑制较差,发射端很容易产生旁瓣干扰信号。

通过采用仿真算法和稀疏算法,天线的旁瓣大幅降低,旁瓣曲线90%低于包络曲线,满足低包络要求,旁瓣包络如图9和图10虚线所示。

4 过顶跟踪能力分析

对于跟踪IGSO轨道及中低轨道的卫星,存在卫星目标从天线顶部过境的概率,跟踪过程中将在天顶方向附近形成跟踪“盲区”。当目标经过这一“盲区”时,天线会因方位速度失配而丢失目标。因此需要对轨道高度及天线跟踪转速、覆盖范围进行合理设计。

卫星在太空的运动属于天体运动,卫星围绕地球飞行,对于圆轨道卫星飞行的速度计算公式为

$$V_s = \sqrt{\frac{K}{R_e + h}} \quad (2)$$

式中, K 为引力常数, $K = 3.986 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$; R_e 为地球平均半径, R_e 取6 368 km; h 是卫星距地面的高度,按照400 km计算。

倾斜角度的大小和方位的最大速度与卫星高度有关,公式如下

$$\dot{A} = \frac{V_s \cdot \tan E_{\text{MAX}}}{h} \quad (3)$$

其中, V_s 为卫星飞行速度, h 为卫星距地面的高度, E_{MAX} 为过顶时的仰角, $\dot{A}$ 为方位角速度的弧度值。可得出不同卫星高度下,盲区角和天线方位转速的关系见表3。

表3 盲区角与天线方位转速的关系

A_{MAX}	E_{MAX}		
	1 000	10 000	35 000
10°/s	87.585	89.838	89.971
15°/s	88.390	89.892	89.981
20°/s	88.793	89.919	89.985
25°/s	89.034	89.935	89.988

对于方位俯仰型座架天线,在1 000 km轨道高度(典型低轨高度),方位最大速度25°/s情况下,天线的跟踪盲区的范围为[89.034°, 90°],即天顶有0.966°的盲区。

0.45 m平板天线半功率波束宽度为 2.2° ，在过顶卫星跟踪中，天线转速满足不低于 $25^{\circ}/s$ ，天线半功率波束可完全覆盖低轨跟踪盲区，即可实现过顶跟踪。

5 程序引导跟踪能力分析

对于GEO卫星目标，只需要一键展开，天线可根据存储的卫星参数自动获取位置信息，借助信标或载波接收机目标捕获和锁定。

对于IGSO、MEO及LEO目标，天线程序可以通过两行轨道参数采用基于SGP4/SDP4的模型，确定目标的瞬时位置和速度，进而计算出地面观测站观测目标卫星的方位俯仰角信息，还可以计算出目标卫星在地球表面投影的大地坐标（星下点坐标）的经纬度以及轨道高度。计算过程需综合考虑以下因素：坐标系统的转换精度；时间系统的统一精度；影响卫星轨道的大气、日、月和地球自身转动等带来的摄动因素；在计算机处理过程中，还需要考虑数值计算过程的精度问题。具体流程如图11所示。

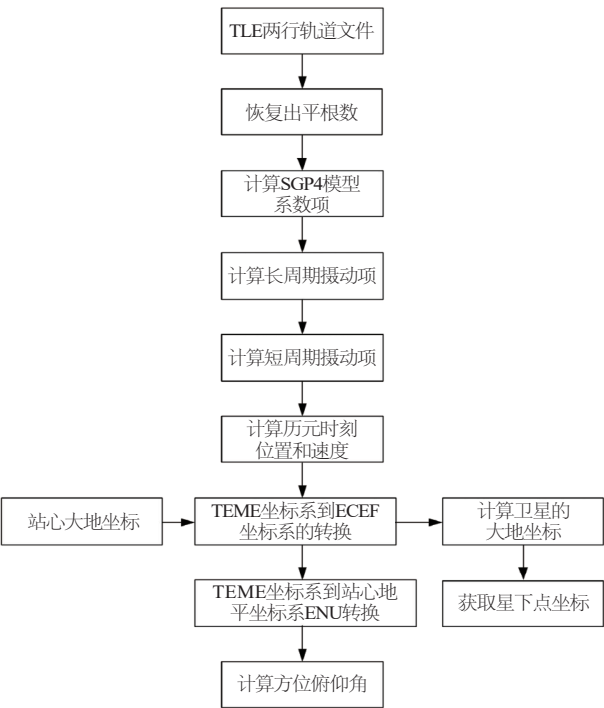


图11 卫星轨道预报的流程



图12 卫星程序引导跟踪软件示意

通过天线程序精确计算得到的目标位置信息，实时进行方位俯仰角信息执行及反馈，通过伺服转台的ADU及ACU单元综合作用，可实时引导天线指向目标位置，其跟踪精度通常优于1/5半功率波束宽度。

6 结束语

本文通过天线射频一体化的集成方法，结合不同轨道及过顶跟踪分析，低轨卫星程序引导跟踪等策略，提出了一种可满足高低轨卫星跟踪兼容的平板天线实现方法。通过仿真分析及理论计算评估，该集成方法可满足Ka频段高通量卫星及低轨卫星的覆盖，具有强收发和强隔离、低远旁瓣特性，可进行工程化应用和推广。

通过分析在0.45 m等效口径下，该天线的各项关键指标，可知该方法可满足过顶跟踪要求，且跟踪精度满足工程化要求。该集成方法实现的产品具有轻薄易携带、便于背负、可快速展开和撤收等诸多优点，在高低轨跟踪兼容下具有工程应用价值。

参考文献：

[1] 黄飞. 低轨卫星通信接入与切换策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
HUANG F. Research on access and handoff strategy in low earth orbit satellite communication[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.

[2] 李彩蝶. 低轨卫星通信系统接入技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
LI C D. Research on access technology of low earth orbit satellite communication system[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.

[3] 陈柯. 高效率平板天线技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
CHEN K. Studon the high efficiency panel antenna[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.

[4] 郝才勇, 张琪, 刘元媛. 新一代卫星通信终端平板天线[J]. 中国无线电, 2018(9): 41-45, 53.
HAO C Y, ZHANG Q, LIU Y Y. New generation of satellite communication terminal flat antenna[J]. China Radio, 2018(9): 41-45

[5] 程铭. Ka波段高增益双圆极化平板天线的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
CHENG M. Research on ka-band high-gain dual-circular-polarized planar antenna[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.

[6] 黄成, 马达, 樊星, 等. 一种Ka频段高效率双圆极化平板天线设

计[C]//全国微波毫米波会议论文集(下册).[出版地不详:出版社不详], 2018: 86-89.

HUANG C, MA D, FAN X, et al. Design of a Ka-band high-efficiency dual circularly polarized panel antenna[C]//Proceedings of the National Microwave and Millimeter Wave Conference (Volume 2).[S.l.:s.n.], 2018: 86-89.

- [7] 代孝俊, 杜国宏, 邓伟. 一种宽带平板天线的设计与仿真[J]. 成都信息工程大学学报, 2019, 34(1): 27-30.

DAI X J, DU G H, DENG W. A broadband flat antenna design and simulation[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2019, 34(1): 27-30.

- [8] 崔学武, 李强, 位朝垒, 等. 一种宽带低剖面高增益低副瓣定向平板天线[J]. 微波学报, 2022, 38(2): 33-37.

CUI X W, LI Q, WEI C L, et al. A broadband low-profile high-gain low-sidelobe directional planar antenna[J]. Journal of Microwaves, 2022, 38(2): 33-37.

- [9] 魏瑰. 一种低旁瓣微带平板天线的设计[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.

WEI G. Design of a microstrip planar antenna with slow sidelobe[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.

- [10] 谢学东, 操礼长, 刘旺华, 等. Ka频段低轨卫星跟踪方式研究[J]. 无线电工程, 2018, 48(11): 989-993.

XIE X D, CAO L C, LIU W H, et al. Research on tracking methods of ka-band LEO satellite[J]. Radio Engineering, 2018, 48(11): 989-993.

- [11] 徐崇彦, 张言锋, 孟祥国. Ka频段低轨卫星跟踪技术研究[J]. 无线电通信技术, 2017, 43(6): 56-59.

XU C Y, ZHANG Y F, MENG X G. Research on tracking

technology for ka-band LEO satellite[J]. Radio Communications Technology, 2017, 43(6): 56-59.

[作者简介]



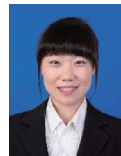
陈剑 (1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事军品导航产品、数据链产品、天线产品等的生产、工艺、检验等工作。



张正谦 (1990-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事卫星通信、遥感、导航、数据链等天线总体架构设计及产品开发工作。



马新生 (1988-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事卫星通信、遥感、导航等天线产品开发工作。



钞婷 (1988-), 女, 硕士, 主要从事卫星通信、遥感、导航等天线产品电磁仿真设计、调试和测试工作。



郭刚涛 (1987-), 男, 硕士, 主要从事卫星通信、遥感、导航等天线产品集成化设计及结构设计工作。