

● 设计·工艺

轻质可展开 GNSS-R 天线结构与仿真

刘良玉 李东颖 匡全进 陈银平
(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘要: 为兼容全球主流卫星导航系统, 顺应小型化、低成本发展趋势, 设计了一种兼具轻质、小型化、宽频带、高增益等优点的可展开 GNSS-R 天线。该天线通过组阵使用, 展宽波束覆盖范围并提高增益; 螺旋线采用柔性支撑和固定支撑相结合的形式, 引入收拢固定装置和解锁装置实现收拢与展开。通过与传统螺旋天线对比, 从结构设计和力学仿真角度阐述了可展开 GNSS-R 天线方案的可行性, 该天线既具有可展开天线收拢尺寸小、重量轻的特点, 又具有传统天线结构稳定的特点。

关键词: 轻质; 可展开; GNSS-R 天线; 螺旋天线

中图分类号: V476 **文献标识码:** A

Structure Design and Simulation of Light-weight Deployable GNSS-R Antenna

Liu Liangyu Li Dongying Kuang Quanjin Chen Yinping
(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109)

Abstract: To be compatible with mainstream global satellite navigation systems and align with the trend of miniaturization and low-cost, a deployable GNSS-R antenna which combines the advantages of light-weight, compact-size, broadband and high-gain has been designed. By operating in an array configuration, this antenna can broaden the frequency band as well as increase gain; the helix adopts a combination of flexible and rigid supports; the antenna utilizes stowing/locking mechanisms and unlocking mechanisms to achieve compact storage and reliable deployment. Compared with traditional spiral antennas, the feasibility of the deployable GNSS-R antenna solution is demonstrated from perspectives of structure design and mechanical simulation. This antenna has both the compact stowed size, light-weight characteristic of deployable antennas and the structural stability of traditional antennas.

Key words: light-weight; deployable; GNSS-R antenna; spiral antenna

1 引言

GNSS-R 全球导航卫星系统反射测量技术 (Global Navigation Satellite System-reflectometry) 接收经地球表面 (例如海面、陆地、冰面等) 反射回来的导航卫星信号, 通过分析反射信号的特性来反演地球表面的各种环境参数。GNSS-R 作为一种新型遥感手段, 与传统技术例如散射计、微波辐射计、SAR

(合成孔径雷达)、雷达高度计等相比具有低成本、低功耗、信号源丰富、高时空分辨率、全球覆盖、全天候工作等优势。GNSS-R 已经广泛应用于海面高度测量、海面风场反演、海冰反演、土壤湿度测量、海面浮油探测等方面^[1-2]。

GNSS-R 天线接收从地球表面反射回来的导航卫星信号, 是 GNSS-R 的重要组成部分之一。当前, 全球导航卫星系统 (GNSS), 如美国的 GPS、俄罗斯的

GLONASS、欧盟的 Galileo 以及中国的 BD 等，工作频率和频段各有差异，但工作频率均在 1 150~1 300 MHz 和 1 559~1 611 MHz 2 个频段之间^[3]。全球导航卫星并存且相互兼容是未来的趋势，因此能够兼容四大卫星导航系统、充分利用所有可用 GNSS 信号资源的宽频带 GNSS-R 天线具有广泛应用前景^[4-5]；同时由于 GNSS 信号本身非常微弱，经过地表反射后的信号更是微弱不堪，为补偿巨大的路径损耗和散射损耗，GNSS-R 天线必须具有高增益特点。

星载 GNSS-R 天线安装在低地球轨道 (LED) 卫星上，可以实现全球覆盖，是目前最主流的平台搭载方式。为适应微小卫星、组网卫星、大规模星座建设，节省卫星平台空间、降低发射成本，当今星载天线轻质、小型化、低成本是趋势^[6-8]，因此，GNSS-R 天线需具备以下特点：轻质、小型化、宽频带、高增益。

2 方案介绍

对于工作在 L 频段的 GNSS-R 天线通常采用螺旋天线、微带贴片天线、十字交叉振子天线等设计方案^[9]。微带贴片天线结构及馈电方式简单、剖面低、易实现圆极化，但工作带宽窄；十字交叉振子天线结构简单、可靠性高，同样工作带宽窄^[3]。以上两种天线均不满足 GNSS-R 天线宽频带、高增益的要求，而螺旋天线结构简单、增益高、频带宽、易实现小型化和轻量化，本文 GNSS-R 天线采用螺旋天线设计方案。

为了提高宽频范围内的天线增益，螺旋天线一般采用增加圈数和多天线组合使用的方式。由电性能仿真得到满足宽频带、高增益的 GNSS-R 天线关键参数，如表 1 所示。

表 1 GNSS-R 天线设计参数

项目	数值
螺距/mm	45
圈数	8
螺旋线中径/mm	70
组阵形式	160 mm×160 mm 方形组阵

受制于星上空间、质量限制，结合本文 GNSS-R 天线使用场景，对 GNSS-R 天线提出如表 2 所示结构指标：

表 2 GNSS-R 天线结构设计指标

项目	数值
重量/kg	≤1.1
安装尺寸/mm	≤300×300
发射状态高度/mm	≤150
发射状态基频/Hz	≥100
在轨状态基频/Hz	≥25

如表 1 所示，螺距和圈数决定了 GNSS-R 天线高度不低于 360 mm，已经远超表 2 中发射状态高度要求。传统螺旋天线一般使用固定支撑形式，高度无法压缩。为降低 GNSS-R 天线发射状态高度，满足轻质、小型化特点，本文设计了一种柔固结合可展开的 GNSS-R 天线。下面以单元天线为例，通过与传统螺旋天线对比，详细介绍 GNSS-R 天线设计过程。

3 固定支撑 GNSS-R 天线

3.1 结构组成

为保持固定螺距，螺旋线一般采用固定支撑形式。如图 1 所示，固定支撑 GNSS-R 天线主要组成：螺旋线、骨架、卡箍、连接块、电连接器等。连接块将螺旋线起始端与电连接器导通，螺旋线根部通过卡箍固定在骨架法兰上，骨架上刻有螺旋槽，螺旋线沿螺旋槽缠绕在骨架上，捆扎绳将螺旋线按间距 45 mm (螺距) 绑扎固定在骨架上。

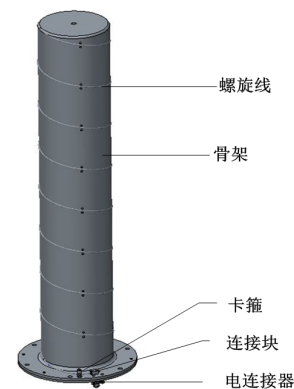


图 1 固定支撑 GNSS-R 天线示意图

为防止结构自身对电磁信号的干扰，骨架、卡箍等材料为非金属，本例中骨架为玻璃纤维复合材料，卡箍为聚酰亚胺材料，捆扎绳采用宇航舱外通用 22DPTH 绑扎带。固定支撑 GNSS-R 天线重量为 345 g，外包络尺寸为 $\Phi 115 \text{ mm} \times 376.6 \text{ mm}$ 。

3.2 模态分析

天上结构需承受严苛的发射条件，因此结构是否稳定至关重要。模态分析是检验结构是否稳定的重要依据。对天线结构模型进行简化，移去不影响整体模态结果的细小特征^[10]，建立有限元模型。固定支撑 GNSS-R 天线有限元模型仅保留骨架，其余特征均做简化处理。

本文使用有限元前处理软件 Patran、后处理软件 Nastran 进行模态分析。固定天线安装面，即骨架法兰，进行模态分析。固定支撑 GNSS-R 天线前三阶固有频率为 102.5 Hz、103.2 Hz、719.8 Hz，前三阶模态振型均为整体变形，前两阶模态振型如图 2、图 3 所示。固定支撑 GNSS-R 天线根部固定后相当于悬臂梁结构，平面悬臂梁第一阶模态振型为一阶弯曲变形。由于天线结构上圆周对称，因此前两阶模态频率相近、振型相似，振型分别为天线两个对称方向上的整体摆动。如图 2、图 3 中坐标系所示，天线第一阶模态振型为 x 方向整体摆动，第二阶模态振型为 z 方向整体摆动，最大位移均出现在最远端-天线顶部。

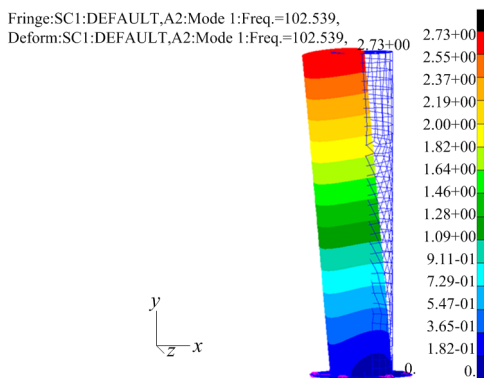


图 2 固定支撑 GNSS-R 天线第一阶模态振型

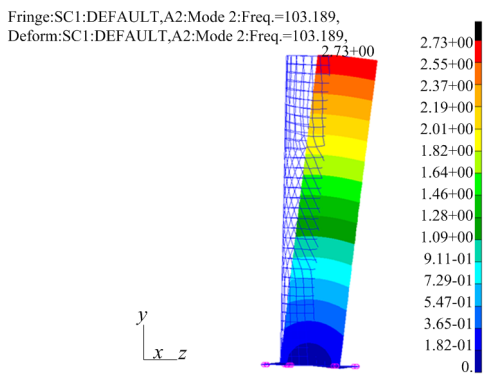


图 3 固定支撑 GNSS-R 天线第二阶模态振型

3.3 总结

固定支撑 GNSS-R 单元天线重 345 g，安装尺寸为 115 mm×115 mm，发射状态高度为 376.6 mm，发射状态基频即第一阶固有频率为 102.5 Hz。组阵使用时，4 个单元天线以 160 mm×160 mm 间隔独立安装在卫星平台，互不影响，发射状态与在轨状态相同，基频均为单元天线基频。固定支撑 GNSS-R 天线组阵后总重量为 1.38 kg，安装尺寸为 275 mm×275 mm，发射状态高度不变，为 376.6 mm，发射及在轨状态基频为 102.5 Hz，重量和发射状态高度均不满足设计指标。

4 柔固结合可展开 GNSS-R 天线

L 频段螺旋天线一般尺寸较大，组阵使用后天线尺寸将会成倍增大。固定支撑 GNSS-R 天线结构如图 1 所示，其高度为 376.6mm。天上空间资源紧张，发射成本昂贵^[11]，若螺旋线采用固定支撑形式，将浪费宝贵的天上空间资源。为压缩 GNSS-R 天线高度尺寸、节省天上空间资源，考虑螺旋线采用柔性支撑形式。天线发射时呈收拢状态，到达预定轨道工作时呈展开状态。

柔性支撑螺旋天线一般采用绳索张紧预成型螺旋线的形式保持设计螺距，其中预成型螺旋线螺距小于设计值^[10]。柔性支撑形式可以大大压缩高度尺寸同时减小质量，从而释放更多的空间资源、降低发射成本。另一方面，柔性支撑螺旋天线在轨展开后结构稳定性明显不如固定支撑天线，为防止卫星调姿、变轨时天线指向和波束覆盖范围发生偏转，需提高柔性支撑螺旋天线展开后的结构稳定性。

以上所述综合考虑设计一种柔固结合可展开 GNSS-R 天线，螺旋线采用柔性支撑和固定支撑相结合的形式，这样既可以压缩天线发射（收拢）时的高度尺寸，又可以提高天线展开后的结构稳定性。

4.1 结构组成

柔固结合可展开 GNSS-R 天线根部 1.5 圈螺旋线采用固定支撑、其余 6.5 圈螺旋线采用柔性支撑设计，如图 4、图 5 所示。

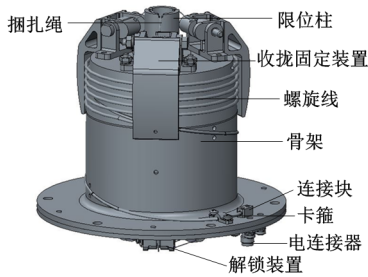


图 4 柔固结合 GNSS-R 天线收拢状态示意图

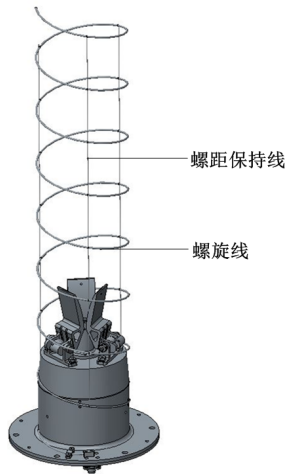


图 5 柔固结合 GNSS-R 天线展开状态示意图

柔固结合 GNSS-R 天线主要组成为：捆扎绳、限位柱、收拢固定装置、螺旋线、骨架、连接块、卡箍、电连接器、解锁装置等。发射时天线呈收拢状态，如图 4 所示，根部 1.5 圈螺旋线缠绕捆扎在骨架上，其余 6.5 圈螺旋线呈压缩状态收拢在骨架和收拢固定装置之间。捆扎绳拉紧收拢固定装置，使之保持收拢状态。捆扎绳从收拢固定装置尾部引出，跨过限位柱，从骨架顶部穿入，从底部穿出，最后固定在解锁装置上。到达预定轨道后，解锁装置通电将捆扎绳熔断，收拢固定装置在扭簧作用下展开直至抵住限位柱，同时螺旋线在自身回弹力作用下弹开，并在螺距保持线的约束下保持设计螺距，天线完成展开如图 5 所示。

柔固结合 GNSS-R 天线重量为 254 g，收拢状态外包络尺寸为 $\Phi 115 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$ ，展开状态外包络尺寸为 $\Phi 115 \text{ mm} \times 383 \text{ mm}$ ，收拢率为 71.3%。

4.2 细节设计

为防止螺旋线收拢状态下移位，螺旋线采用 3 点约束。3 组收拢固定装置沿周向均布在骨架上，每组收拢固定装置独立捆扎，最终 3 路捆扎绳汇集固定在同一解锁装置上。

4.2.1 收拢固定装置

如图 6 所示，收拢固定装置主要由底座、挡块、转轴、扭簧等组成。挡块质量为 7 g，质心距离扭簧中心为 20 mm，驱动挡块转动所需最小扭矩为 $0.14 \text{ kg} \cdot \text{mm}$ 。收拢状态下扭簧处于 180° 压紧状态，此时扭簧处于最大压紧角度，最大展开扭矩为 $10.08 \text{ kg} \cdot \text{mm}$ 。捆扎绳从挡块尾部引出，拉紧挡块使之保持图 6a 中收拢状态。捆扎绳选用 8 编线径为 0.6 mm 的大力马线，最大拉力为 45.5 kg，在高温下可熔断，熔断温度约为 350°C ^[13]。

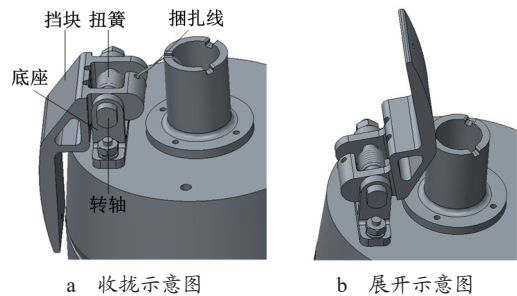


图 6 收拢固定装置示意图

展开时解锁装置将捆扎绳熔断，挡块在扭簧作用下往上旋转展开，直至抵住限位块无法转动。展开状态下扭簧处于 10° 压紧状态，此时展开扭矩为 $0.56 \text{ kg} \cdot \text{mm}$ ，挡块在扭簧作用下始终保持在展开状态。

4.2.2 解锁装置

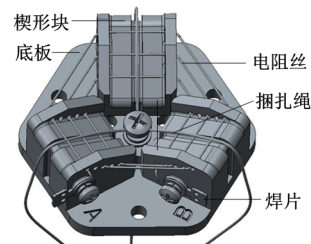


图 7 解锁装置示意图

如图 7 所示，解锁装置主要由底板、楔形块、电阻丝、捆扎绳、焊片等组成。3 组楔形块沿周向均布在底板上，电阻丝从中心向外围、从底到高环形缠绕在楔形块上，电阻丝两端通过焊片外接电路。3 路捆扎绳分别跨过楔形块一起固定在解锁装置中心螺钉上。楔形设计以及多圈回形缠绕可使捆扎绳与电阻丝多点接触，确保捆扎绳充分熔断。电阻丝选用铁铬铝电阻丝^[13]，通电后产生高温将捆扎绳熔断，收拢固定装置展开，螺旋线弹开，天线完成展开。

4.3 模态分析

对柔固结合可展开 GNSS-R 天线分别建立收拢状态和展开状态的有限元模型，移去不影响整体模态结果的细小特征，固定骨架法兰，进行模态分析。

4.3.1 收拢状态模态分析

收拢状态下柔固结合可展开 GNSS-R 天线前三阶固有频率为 710.4 Hz、711.8 Hz、988.9 Hz，前三阶模态振型均为天线整体变形，前二阶模态振型如图 8、图 9 所示。原理同固定支撑 GNSS-R 天线，柔固结合可展开 GNSS-R 天线收拢状态前两阶模态频率相近、振型相似，振型分别为天线 2 个对称方向上的整体摆动。如图 8、图 9 中坐标系所示，天线第一阶模态振型为 z 方向整体摆动，第二阶模态振型为 x 方向整体摆动，最大位移均出现在最远端-天线顶部。

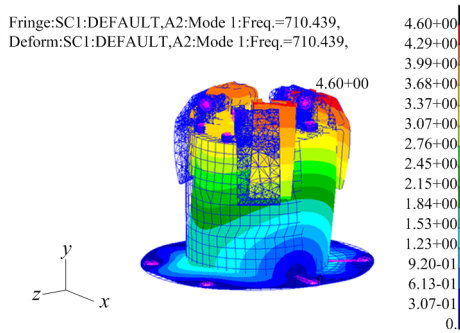


图 8 收拢状态第一阶模态振型

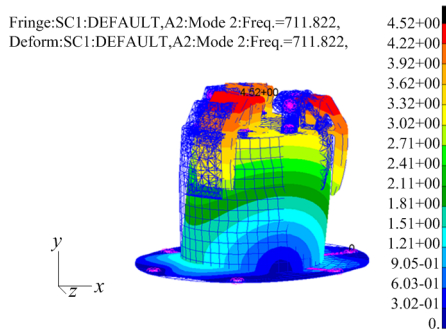


图 9 收拢状态第二阶模态振型

4.3.2 展开状态模态分析

柔固结合可展开 GNSS-R 天线螺旋线选用线径为 0.15 mm 的铍青铜 QBe2 线，螺旋线可等效为弹簧^[12]，弹簧刚度 k 计算公式：

$$k = \frac{Gd^4}{8nD^3} \quad (1)$$

式中， G 为材料切变模量 ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$)； d 为弹簧线径，mm； n 为有效圈数； D 为弹簧中径，mm。

由式 (1) 可计算出螺旋线等效弹簧刚度为 36.3 N/m。本文中螺旋线为预成型螺旋线，成型螺距为 1.1 倍设计螺距，即 49.5 mm，展开后由螺距保持线张紧到设计螺距。展开状态下螺旋线回弹力可由胡克定律计算得到：

$$F = kx \quad (2)$$

式中， k 为弹簧刚度，N/m； x 为弹簧伸长或缩短的长度，m。由式 (2) 计算可得，展开状态下螺旋线回弹力为 1.06 N。

建立展开状态柔固结合可展开 GNSS-R 天线有限元模型，螺距保持线施加 1.06 N 预紧力，固定骨架法兰，进行有预应力的模态分析。展开状态下柔固结合可展开 GNSS-R 天线前三阶固有频率为 34.2 Hz、35.9 Hz、37 Hz，前三阶模态振型为螺旋线整体变形，前二阶模态振型如图 10、图 11 所示。原理同固定支撑 GNSS-R 天线，柔固结合可展开 GNSS-R 天线展开状态前两阶模态频率相近、振型相似，展开后天线结构薄弱部分为柔性支撑螺旋线，因此前两阶模态振型表现为螺旋线两个对称方向上的整体摆动。如图 10、图 11 中坐标系所示，天线第一阶模态振型为螺旋线 z 方向整体摆动，第二阶模态振型为螺旋线 x 方向整体摆动，最大位移均出现在螺旋线顶部。

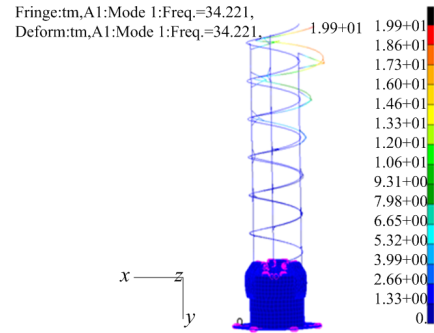


图 10 展开状态第一阶模态振型

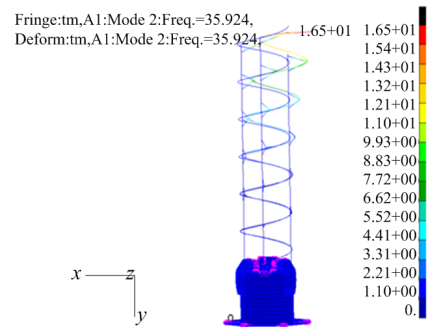


图 11 展开状态第二阶模态振型

4.4 总结

柔固结合可展开 GNSS-R 单元天线重 254 g, 安装尺寸为 115 mm×115 mm, 发射状态即收拢状态高度为 110 mm, 发射状态基频即收拢状态第一阶固有频率为 710.4 Hz, 在轨状态基频即展开状态第一阶固有频率为 34.2 Hz。GNSS-R 天线采用柔性支撑和固定支撑相结合的形式, 相对于传统固定支撑形式, 单元天线发射状态高度由 376.6 mm 压缩至 110 mm, 重量由 345 g 减小到 254 g, 大幅压缩了天线收拢高度尺寸、减轻了重量; 同时相对于柔性支撑形式, 可明显提高天线展开后的整体刚度, 增强展开后的结构稳定性。

组阵使用时, 4 个单元天线以 160 mm×160 mm 间隔独立安装在卫星平台, 互不影响, 发射状态和在轨状态基频均为单元天线基频。柔固结合可展开 GNSS-R 天线组阵后总重量为 1.02 kg, 安装尺寸为 275 mm×275 mm, 发射状态高度为 110 mm, 发射状态基频为 710.4 Hz, 在轨状态基频为 34.2 Hz, 均满足设计指标。电性能方面, GNSS-R 单元天线单独使用时, 11 dB 增益波束覆盖范围为 $\pm 12^\circ$, 组阵后通过波束形成网络形成 4 个波束, 11 dB 增益波束覆盖范围扩展为 $\pm 22.5^\circ$ 。波束覆盖范围的增大, 可使 GNSS-R 天线接收更大区域内的 GNSS 反射信号, 从而极大提高观测效率、空间覆盖率和数据量, 提高反演地表参数精度, 为遥感应用开辟新的可能性。柔固结合可展开 GNSS-R 天线组阵后如图 12 所示。

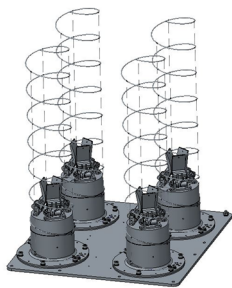


图 12 GNSS-R 天线工作状态示意图

5 结束语

为兼容全球主流卫星导航系统, 顺应小型化、低

成本发展趋势, 设计一种兼具轻质、小型化、宽频带、高增益等优点的 GNSS-R 天线。

本文 GNSS-R 天线通过 2×2 方形组阵使用的螺旋天线, 展宽波束覆盖范围、提高增益。鉴于传统螺旋天线在轻质、小型化方面的明显不足, 设计一种柔性支撑和固定支撑相结合的可展开 GNSS-R 天线, 该天线既具有可展开天线收拢尺寸小、重量轻的特点, 又具有传统天线结构稳定的特点。柔固结合可展开 GNSS-R 天线组阵后总质量为 1.02 kg, 发射状态高度为 110 mm, 发射状态基频 710.4 Hz, 收拢状态基频为 34.2 Hz, 均满足设计指标, 收拢率为 71.3%; 与固定支撑 GNSS-R 天线相比, 质量节省 26%, 高度降低 71%。

参考文献

- [1] 王延光, 白照广, 朱雪萍, 等. 星载 GNSS-R 海面风场观测载荷关键技术设计与验证[J]. 中国空间科学技术, 2022(5): 117-124.
- [2] 马凤军, 万继响, 施锦文, 等. 一种新型双圆极化 GNSS-R 天线设计[C]//2021 年全国天线年会论文集: 2021 年卷. 北京: 电子工业出版社, 2021: 6-9.
- [3] 沈尤睿, 高文军, 吴春邦, 等. 航天器天线工程设计技术[M]. 第 1 版. 北京: 北京理工大学出版社, 2018: 77-80.
- [4] 沈少阳. 卫星导航终端多系统兼容导航天线设计与实现[J]. 自动化应用, 2022(8): 148-150.
- [5] 李晓鹏, 李瑞雄, 高伟. 宽带高精度 GNSS 双频柱状螺旋天线[J]. 现代信息技术, 2022(1): 48-49.
- [6] 张闯, 妖文杰, 张捷, 等. 一种小型化 GNSS 高精度天线设计[J]. 导航定位学报, 2023(8): 31-37.
- [7] Zhang Xiaohong, Wu Mingkui, Liu Wanke, et al. Initial assessment of the COMPASS/BeiDou-3: new-generation navigation signals[J]. Journal of Geodesy, 2017(10): 1225-1240.
- [8] 刘健, 曹冲. 全球卫星导航系统发展现状与趋势[J]. 导航定位学报, 2020(1): 1-8.
- [9] 张闯, 王晓辉, 姚文杰, 等. 应用于导航卫星系统的低剖面测量型天线设计[C]//中国卫星导航定位协会. 卫星导航定位技术文集(2021): 2021 年卷. 北京: 测绘出版社, 2021: 62-66.
- [10] 苏醒, 张宇环, 匡全进. 一种新型星间链路天线结构设计及仿真[J]. 航天制造技术, 2021(4): 24-29.
- [11] 张更新. 现代小卫星及其应用[M]. 第 1 版. 北京: 人民邮电出版社, 2009.
- [12] 张健军, 王见, 庄园, 等. 新型天基 ADS-B 系统可展开天线结构设计[J]. 机械设计与制造, 2017(2): 121-123.
- [13] 刘良玉, 张健军, 陈银平, 等. 新型星载 AIS 可展开天线结构设计[J]. 航天制造技术, 2021(6): 40-44.