

柔性碳纤维反射面天线卷绕分析与试验

杨留义, 王力文, 徐磊, 刘越东, 史永康, 刘昊
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 面向立方星对高增益天线的应用需求, 结合柔性碳纤维复合材料优异的力学性能, 提出一种可卷绕收纳反射面天线方案, 收纳体积严格控制在 2 U 以内。该天线主要由柔性碳纤维反射面、柱壳杆、副反射面和馈源等组成。柱壳杆驱动反射面展开并维持反射面展开到位后的空间构型, 其一端与柔性碳纤维反射面周向边缘连接, 另一端固定到天线中心部位。采用弹性欧拉梁理论, 建立卷绕收纳状态碳纤维反射面和柱壳杆所需约束载荷的评估方法。研制了 0.5 m 口径原理样机, 开展了卷绕收纳展开试验和暗室测试。样机卷绕收纳后直径约 140 mm, 高度约 180 mm。约束载荷分析值相比测试值偏大约 24%, 测试结果充分验证了柔性碳纤维反射面天线卷绕收纳设计的可行性。

关键词: 复合材料; 可展开; 反射面; 天线

中图分类号: V414; TN828.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2025)05-0127-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20250217003

CSTR: 32406.14.ycyk.20250217003

引用格式: 杨留义, 王力文, 徐磊, 等. 柔性碳纤维反射面天线卷绕分析与试验[J]. 遥测遥控, 2025, 46(5): 127-133.

Coiling Analysis and Test on Flexible Composite Materials Reflector Antenna

YANG Liuyi, WANG Liwen, XU Lei, LIU Yuedong, SHI Yongkang, LIU Hao
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: To meet the demand for highly efficient folding and high gain antenna used in CubeSats, a deployable reflector antenna that can be tightly coiled was presented using flexible composite materials. The antenna was mainly composed of flexible reflector, cylindrical shell boom, sub-reflector and feed. The cylindrical shell booms play the role to deploy and maintaining the flexible reflector in the needed shape. One end of each cylindrical shell boom was connected to the periphery of the reflector, while the other one was fixed to the center of the antenna. A simple method was developed to predict the coiling load using elastic Euler beam theory. A 0.5 m prototype antenna was constructed and tested for coiling deployment and RF performance. The diameter and height of the prototype in coiled state were nearly 140 mm and 180 mm separately, and the predicted constraint load was 24% higher than the test value.

Keywords: Composite materials; Deployable; Reflector; Antenna

Citation: YANG Liuyi, WANG Liwen, XU Lei, et al. Coiling Analysis and Test on Flexible Composite Materials Reflector Antenna[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2025, 46(5): 127-133.

0 引言

立方体卫星是一类采用模块化设计的微小卫星, 发射收纳状态以 U 为单位, 1 U 即 10 cm×10 cm×10 cm, 每 U 重量约 1.33 kg^[1]。该类卫星具有研制成本低、开发周期短、收纳体积小等特点。随着低轨组网技术的发展, 立方体卫星在对地观测、深空通信、空间安全等领域中的应用呈现出快速增长的趋势^[2-4]。在体积和重量的综合约束下, 为

拓展立方体卫星的性能, 开展高增益高收纳效率可展开天线研究具有重要意义^[5]。针对深空通信、微波遥感等领域立方体卫星对高增益天线需求, 研究人员已提出多种不同形式的可展开天线设计方案, 如金属丝网反射面天线^[6-11]、平面反射阵天线^[12]等。其中, 金属丝网反射面天线采用张紧的金属丝网作为反射面, 通过径向肋或张拉索系提供展开预紧力, 具有收纳效率高、尺寸可扩展能力强的优点, 目前成为应用研究的热点。美国 Rain-

Cube 立方体卫星 0.5 m 口径反射面天线采用 30 根径向肋支撑^[6,7], 通过在径向肋中间区域布置铰链实现高效率收纳, 收纳体积不大于 1.5 U(10 cm×10 cm×15 cm), 展开后在 35.75 GHz 频点增益约 42.6 dB。文献[8]为减少铰链关节数量, 提出了径向布置 16 条抛物线形缠绕肋连续支撑金属丝网反射面天线的方案, 收纳体积与美国 0.5 m 口径反射面天线相当; 受支撑肋数量限制, 该方案折叠展开后精度约 0.71 mm RMS, 可满足 X 频段应用需求。为进一步增大天线口径, 并提高反射面效率, 文献[10]采用柱壳杆支撑张拉索系, 研制了 1 m 口径偏馈金属丝网反射面天线, 可实现收纳体积约 3 U(10 cm×10 cm×30 cm), 在 35.75 GHz 频点增益约 49.2 dB, 基于此方案的更大口径发射面天线目前正处于研制过程中^[11]。与金属丝网反射面天线构型不同, 平面反射阵天线由于采用平面反射阵列代替抛物反射面, 因此具有与立方星共形设计简单、展开机构较少的优点。美国 MarCO(Mars Cube One)立方体卫星采用了平面反射阵天线形式^[12], 该天线采用 3 块子阵组成, 与 6 U 卫星共形设计, 天线展开后平面尺寸约 60 cm×34 cm, 在 8.4 GHz 频点增益约 29.2 dB。由于反射阵列中每个单元反射相位需要通过特定几何尺寸实现, 因此平面反射阵相对带宽较窄, 且设计难度更大^[13]。

对于 Ka 频段反射面天线, 其形面精度一般优于 1/30 波长。受保形机制限制, 金属丝网反射面天线需要较多的连接点才能实现 Ka 频段应用。采用柔性碳纤维复合材料研制的薄壁结构具有一定的抗弯刚度且卷绕收纳曲率较大, 该类结构作为天线反射面可以简化支撑结构, 是高精度高收纳效率反射面天线实现的一个重要技术方向^[14]。文献[15]为实现碳纤维反射面展开状态处于较高的刚度, 同时便于收纳, 针对三向织物增加环氧树脂复合材料反射面开展了背部增强筋布置优化, 为高精度反射面的应用提供了方向。为进一步提高卷绕收纳效率, 文献[16]提出了将碳纤维反射面周向分片的方案, 分割线采用螺旋线形式布置, 相邻分片间仅在反射面中心区域和外圆周区域采用碳纤维片连接, 可实现 0.5 m 口径反射面卷绕收纳直径在 14 cm 左右。由于周向分片后单片局部支撑刚度不足, 该类型反射面在展开状态受自重影响较大, 展开后形面精度测试面临较大困难。为避免碳纤维增强树脂基复合材料弯曲半径过大引起

的收纳效率不高的问题, 文献[17]提出了大柔性碳纤维复合材料方案, 通过选用硅橡胶作为基体, 并结合碳纤维三向织物研制了大柔性、低热膨胀系数碳纤维复合材料反射面, 并给出了不同支撑形式反射面天线实现方案。面向立方星需求, 结合折纸技术, 文献[18]通过预置折线, 提出了将柔性碳纤维增强复合材料作为反射面的可展开天线方案。该方案采用固化成型的碳纤维面作为反射面, 利用反射面本身局部抗弯刚度, 采用少量支撑点实现了可满足 Ka 频段应用的形面精度。针对一定厚度柔性面卷绕收纳设计问题, 文献[19]通过在其卷绕中心布置正多边形, 假设折线沿正多边形有序卷绕, 且卷绕过程中折线长度不变, 采用微元法建立了折线与正多边形外接圆半径和边数的微分方程, 通过数值积分获取了不同折线布置下的收纳体积, 为一定厚度反射面折线设计提供了重要指导。

面向立方体卫星应用需求, 为实现高增益反射面天线高效率卷绕收纳, 本文结合柔性碳纤维复合材料, 提出径向柱壳杆支撑卷绕收纳碳纤维反射面天线方案。采用弹性欧拉梁理论, 将卷绕状态连续反射面视作离散的柔性悬臂梁, 建立柔性碳纤维面和柱壳杆卷绕收纳所需约束载荷的简化分析方法。研制原理样机, 开展卷绕收纳展开试验和暗室测试, 验证卷绕收纳碳纤维反射面天线的可行性, 为星载可展开天线研制提供参考。

1 结构组成与工作原理

卷绕收纳碳纤维反射面天线主要由碳纤维反射面、柱壳杆、副反射面、副反支杆、副反支撑环、馈源、中心体、锁定与解锁装置等组成。其中, 碳纤维反射面采用多层碳纤维增强硅橡胶材料在模具上固化成型。成型后的反射面具有较小的折弯半径, 且具有一定的抗弯刚度, 通过数个离散点支撑即可维持较高的形面精度。柱壳杆采用碳纤维复合材料模压成型, 可类似卷尺一样卷绕折叠, 两端胶接铝合金接头。碳纤维反射面中心区域连接固定到天线中心体上, 外侧周边区域通过多个离散的支点与柱壳杆一端连接。柱壳杆另一端连接固定到天线中心体上, 并可绕中心体旋转收纳。副反射面通过副反射面支杆连接到副反射面支撑环上, 副反射面支撑环可沿馈源轴向在一定范围内上下滑动。馈源安装到天线中心体

上, 在实现馈电的同时, 发挥副反射面支撑环展开导向和支撑功能。

参考太阳帆折叠方案^[20], 碳纤维反射面卷绕折叠前首先沿折线Z形折叠, 然后再连同柱壳杆整体有序螺旋式卷绕收纳到中心体上。在天线底部采用四连杆机构将副反射面支撑环与碳纤维反射面锁定绳联动, 通过一套周向锁定绳实现碳纤维反射面和副反射面的同步锁定收纳。展开时, 切割器切断周向锁定绳, 实现对碳纤维反射面和副反射面的同步解锁释放。解锁后, 沿天线周向分布的柱壳杆在自身存储的弹性能作用下展开到位并锁定, 带动碳纤维反射面展开并稳定在工作状态; 副反射面在圆柱弹簧驱动下沿馈源轴向展开到位并锁定。卷绕收纳碳纤维反射面天线收纳状态与展开状态如图1所示。

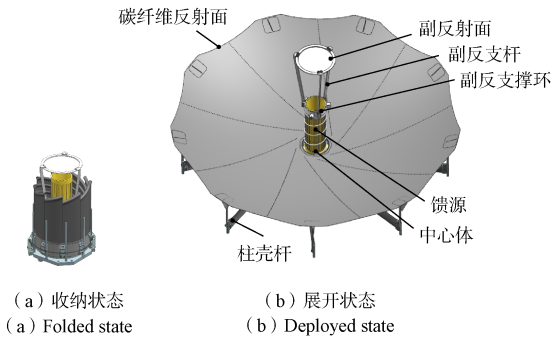


图1 卷绕收纳碳纤维反射面天线示意图
Fig. 1 Diagram of foldable reflector antenna

2 卷绕载荷分析

2.1 柔性碳纤维面卷绕载荷分析

为实现卷绕收纳, 柔性碳纤维面需首先沿径向折线进行Z形折叠, 然后与碳纤维柱壳杆整体绕天线轴向卷绕收纳。相比柱壳杆, 柔性碳纤维面为旋转抛物面, 其弯折卷绕收纳变形较为复杂, 涉及几何大变形、接触非线性等问题。为获取卷绕构型与收纳约束载荷间关系, 将沿折线Z形折叠的反射面视作多个独立的径向悬臂梁, 忽略各相邻区域间接触产生的摩擦力影响, 建立卷绕状态碳纤维面简化分析模型如图2所示。

柔性碳纤维面卷绕折叠时, 其折线处两侧反射面存在断续贴合接触。为简化分析, 忽略柔性碳纤维反射面卷绕过程中的拉伸变形, 将卷绕状态折线两侧碳纤维面区域视作梁的一部分, 根据弹性欧拉梁理论, 为实现沿梁轴向方向曲率变化

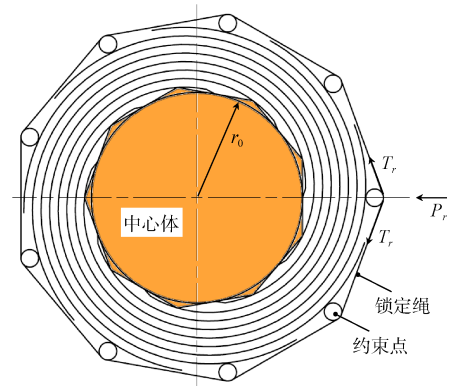


图2 柔性碳纤维面收纳状态受力分析简图

Fig. 2 Constraint diagram of the flexible reflector in folded state

κ_r , 需要施加的弯矩为:

$$M_r = \frac{EI_r}{1-\nu^2} \kappa_r \quad (1)$$

式中, E 为梁模型的等效弹性模量, I_r 为梁模型的截面惯性矩, ν 为梁模型的泊松比。对于采用 n 处约束点的柔性碳纤维反射面, 记其收纳状态 n 处约束点所在圆直径为 D_f , 则每处约束点需施加的径向载荷 P_r 的计算公式为:

$$P_r = \frac{2M_r}{D_f \sin(2\pi/n)} \quad (2)$$

为约束碳纤维面处于卷绕状态, 所需锁定绳张力 T_r 计算公式为:

$$T_r = \frac{P_r}{2\sin(\pi/n)} \quad (3)$$

忽略约束点尺寸对收纳曲率的影响, 则卷绕状态柔性碳纤维面沿梁长度方向变化后的曲率半径与约束点所在圆半径一致。虽然碳纤维反射面卷绕收纳时为螺旋式收纳, 但其靠近中心体处卷绕曲率半径与最外侧卷绕曲率半径的比值往往大于反射面内侧Z形弯折构型高度与外侧Z形弯折构型高度的比值, 从而使得碳纤维面卷绕过程中出现卷绕载荷逐渐增大的趋势, 直至最终卷绕状态。因此在评估碳纤维反射面卷绕载荷时, 采用外侧弯折构型高度和外侧卷曲收纳曲率半径计算得到的约束载荷将会比实际值偏大。

2.2 柱壳杆卷绕载荷分析

柱壳杆采用多层预浸料模压成型, 铺层顺序为 $[\pm 45/0]$ 。其中, 外层为平纹织物, 内层为单向布。T300预浸料固化后工程常数见表1。

将单层平纹织物等效为按 $\pm 45^\circ$ 铺设的两层单

表1 T300 预浸料固化后性能参数^[21]

参数	性能
纵向弹性模量/GPa	126
横向弹性模量/GPa	8
泊松比	0.33
剪切模量/GPa	3.7
密度/(kg/m ³)	1 780

向布, 忽略由此引入的拉扭耦合影响, 采用经典层合理论, 可得柱壳杆弯曲刚度矩阵 D 为:

$$D = \begin{bmatrix} 344.69 & 75.33 & 0 \\ 75.33 & 101.30 & 0 \\ 0 & 0 & 78.41 \end{bmatrix} \quad (4)$$

D 矩阵为柱壳杆单位截面长度弯曲刚度矩阵, 单位为 $N \cdot m^2$ 。

柱壳杆分析坐标系如图 3 所示。

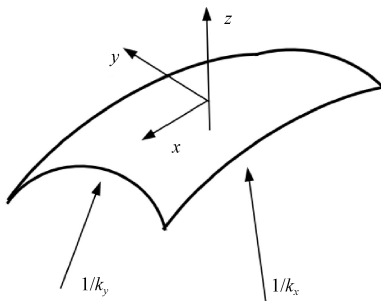


图3 柱壳杆分析坐标系

Fig. 3 Coordinate of the cylindrical shell boom

假设柱壳杆卷绕过程发生纯弯曲, 初始状态 x 方向和 y 方向的曲率分别记为 κ_{x0} 和 κ_{y0} , 卷曲状态 x 方向和 y 方向的曲率分别记为 κ_{x1} 和 κ_{y1} 。忽略柱壳杆边缘效应的影响, 则卷绕过程中柱壳杆单位截面长度弯矩为:

$$M_{bx} = D_{11}(\kappa_{x1} - \kappa_{x0}) + D_{12}(\kappa_{y1} - \kappa_{y0}) \quad (5)$$

在柱壳杆卷绕时, 相邻柱壳杆间相互接触, 由于柱壳杆存在壁厚, 使得柱壳杆 x 方向最大曲率与最小曲率间存在差值, 该值与柱壳杆的壁厚和柱壳杆的数量相关。为保守估计, 采用柱壳杆 x 方向最大曲率计算柱壳杆单位截面长度弯矩。柱壳杆卷绕状态在自由端采用锁定绳约束, n 处约束点所在圆直径为 D_f 。忽略压紧点尺寸对卷绕直径的影响, 若每根柱壳杆卷绕角度均接近一周, 则柱壳杆 x 方向最大曲率计算公式为:

$$\kappa_{x1} = \frac{2}{D_f - 2nt_b} \quad (6)$$

式中, t_b 为柱壳杆的壁厚。

锁定绳对柱壳杆产生径向的约束力 P_b , 其计算公式为:

$$P_b = \frac{2M_{bx}L_b}{D_f \sin(2\pi/n)} \quad (7)$$

式中, L_b 为柱壳杆截面弧长。对于 n 个绕中心体卷绕的柱壳杆, 需要的锁定绳张力 T_b 计算公式为:

$$T_b = P_b / \sin\left(\frac{\pi}{n}\right) \quad (8)$$

综合式(3)和式(8), 可计算得到锁定绳卷绕状态所需约束载荷:

$$T_i = T_r + T_b \quad (9)$$

3 样机试验

3.1 卷绕与展开试验

依据设计方案, 研制了 0.5 m 口径原理样机。碳纤维反射面厚度约 0.34 mm, 各向等效弹性模量约 4 GPa, 泊松比约为 0.3。碳纤维反射面周向采用 9 根柱壳杆支撑, 柱壳杆壁厚约 0.36 mm, 截面张角为 70°, 初始曲率半径为 20 mm。采用专用工装将样机卷绕收纳, 收纳状态如图 4 所示, 高度约 180 mm。图中锁定绳直径约为 0.5 mm, 通过周向系连实现对碳纤维反射面和柱壳杆的卷绕锁定约束。由于柱壳杆与碳纤维面连接点未布置在最外边缘, 因而导致柔性碳纤维面最外侧区域卷绕包络相比设计值偏大, 最大外包络直径约为 140 mm。

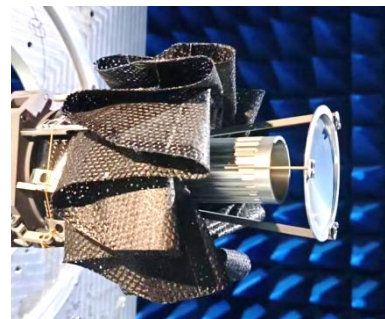


图4 0.5 m 样机卷绕收纳状态

Fig. 4 Folded state of 0.5 m prototype

对于碳纤维反射面, 卷绕状态其最外侧曲率半径约为 70 mm, Z 形弯折构型最大高度约为 88 mm。考虑到卷绕过程中, 折线两侧柔性碳纤维面间可发生较小的相对位移, 因此计算简化梁模型的截面惯性矩时, 将两层柔性碳纤维面视作分层梁进

行计算。根据式(1)~式(3),卷绕状态柔性碳纤维面所需锁定绳张力为1.18 N。对于柱壳杆,从伸直状态变化到卷绕状态, x 向曲率最大变化为 21.4 m^{-1} , y 向曲率变化为 -50 m^{-1} 。根据式(5)~式(8),卷绕状态柱壳杆所需锁定绳张力为8.58 N。考虑柔性碳纤维面和柱壳杆的卷绕约束载荷,卷绕状态锁定绳张力约9.76 N。

卷绕状态,采用拉力计测试锁定绳收纳载荷,测试方案如图5所示。测试得到锁定绳张力载荷为7.86 N。分析值相比测试值偏大约24%,分析认为主要原因是在卷绕收纳过程中碳纤维柱壳杆除发生弯曲变形外还出现一定程度的扭转变形,从而导致实际锁定绳张力载荷相比分析值偏小。

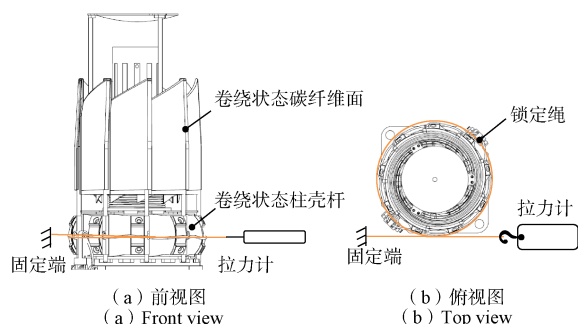


图5 卷绕状态锁定绳张力测试示意图

Fig. 5 Test setup of tensioned force of the lock rope in folded state

对于中心体可靠固定的碳纤维反射面天线,

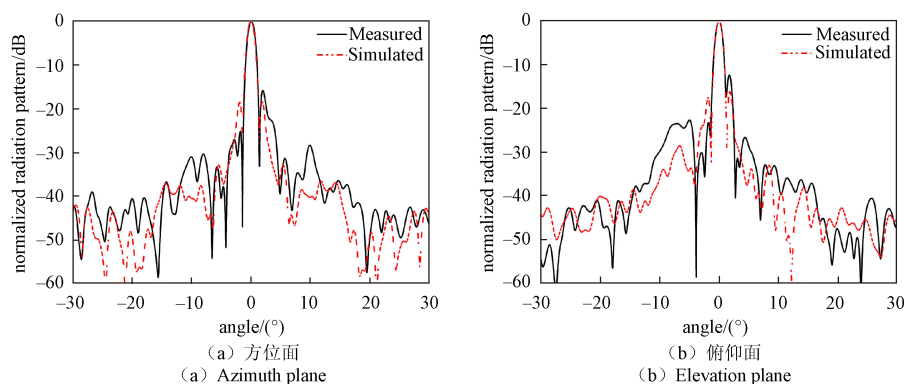


图7 样机测试和仿真方向图

Fig. 7 Measured and simulated radiation patterns of prototype antenna

3.3 天线性能对比

不同方案的0.5 m口径可展开反射面天线性能对比见表2。柔性碳纤维复合材料作为反射面时,相比金属丝网反射面所需的支撑点数

解除锁定绳约束后,柔性碳纤维面在柱壳杆驱动下可迅速展开,副反射面在圆柱弹簧驱动下同步展开到位,展开时间约为1 s。卷绕收纳碳纤维反射面天线展开状态如图6所示。

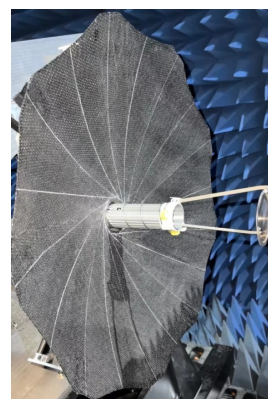


图6 0.5 m样机展开状态

Fig. 6 Deployed state of 0.5 m prototype

3.2 暗室测试

对展开状态样机在平面近场暗室进行单频点测试,得到样机方位面和俯仰面归一化方向图与仿真结果对比如图7所示。样机方位面3 dB波束宽度为 1.11° ,最大副瓣电平为 -12.3 dB ;俯仰面3 dB波束宽度为 1.14° ,最大副瓣电平为 -15.8 dB ,样机增益约 42.8 dB 。暗室测试波束宽度与仿真分析结果符合较好,受副反射面支杆分布位置影响,当方向图切面存在副反射面支杆时,靠近副反射面支杆侧副瓣抬升明显。

量较少,因此在相同工作频段下,具有结构相对简单的优势。由于综合考虑了副反射面的同步锁定与展开,本文方案的收纳体积相比文献[18]略大。

表 2 不同可展开反射面天线性能对比
Table 2 Characteristics of different deployable antennas

方案	工作频段	展开口径	收纳体积	实现方式	结构特点
径向肋反射面天线 ^[6]	Ka	0.5 m	~1.5 U	金属丝网结合中间含转动关节的刚性肋连续支撑	可展开机构较多, 结构较复杂
缠绕肋反射面天线 ^[8]	X	0.5 m	~1.5 U	金属丝网结合可缠绕柔性曲肋连续支撑	结构较简单, 精度受限
卷绕收纳碳纤维反射面天线 ^[18]	Ka	0.5 m	~1.3 U	碳纤维面结合卷尺离散支撑, 副反射面独立锁定展开	较简单
本文工作	Ka	0.5 m	~1.8 U	碳纤维面结合碳纤维柱壳离散支撑, 副反射面联动锁定展开	较简单

4 结束语

面向立方星高增益天线需求, 结合柔性碳纤维复合材料, 提出了一种卷绕收纳碳纤维反射面天线方案。该方案采用弹性欧拉梁理论, 给出了柔性碳纤维面和柱壳杆卷绕约束载荷分析方法。研制了 0.5 m 口径原理样机, 卷绕折叠试验和暗室测试结果验证了样机可应用于 Ka 频段。后续将进一步研究柔性碳纤维面长期卷绕收纳对展开后精度的影响, 从而为工程应用提供指导。

参考文献

- [1] 何慧东. 立方体卫星发展及应用分析[J]. 卫星应用, 2019(6): 45-50.
- [2] 兰志成, 林君毅, 崔新宇. CubeSat 太阳电池阵研究进展[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38: 154-160.
- [3] ABULGASEM S, TUBBAL F, RAAD R, et al. Antenna design for CubeSats: A review[J]. IEEE Access, 2021, 9: 45289-45324.
- [4] PERAL E, IM E, WYE L, et al. Radar technologies for Earth remote sensing from CubeSat platforms[J]. IEEE, 2018, 106(3): 404-418.
- [5] 王建晓, 尚社, 宋大伟, 等. 用于立方体卫星的高增益天线技术与发展趋势[J]. 空间电子技术, 2022, 19(5): 1-12. WANG Jianxiao, SHANG She, SONG Dawei, et al. Development trends of high-gain antennas technology for CubeSats[J]. Space Electronic Technology, 2022, 19(5): 1-12.
- [6] CHAHAT N, SAUDER J, HODGES R E, et al. The deep-space network telecommunication CubeSat antenna: Using the deployable Ka-band mesh reflector antenna[J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2017, 59(2): 31-38.
- [7] SAUDER J, CHAHAT N, HIRSCH B, et al. From prototype to flight: Qualifying a Ka-band parabolic deployable antenna(KaPDA) for CubeSats[C]//4th AIAA Spacecraft Structures Conference, 2017.
- [8] 吴明儿, 张晗, 牛超哲, 等. 0.5m 口径缠绕肋可展天线反射面精度分析与试验研究[J]. 载人航天, 2021, 27(2): 207-214. WU Minger, ZHANG Han, NIU Chaozhe, et al. Surface accuracy analysis and test on 0.5m diameter wrap-rib deployable antenna[J]. Manned Spaceflight, 2021, 27(2): 207-2014.
- [9] 张树新, 韩晓童, 于亦奇. 两级可重复展收立方星伞状天线机构设计与样机验证[J]. 机械工程学报, 2022, 58(7): 44-52. ZHANG Shuxin, HAN Xiaotong, YU Yiqi. Two-step repeatable deploying and furling mechanism design and prototype verification of a deployable umbrella antenna for CubeSat[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(7): 44-52.
- [10] RAHMAT-SAMII Y, MANOHAR V, HODGES R, et al. Design and measurements of a 1m Ka-Band mesh deployable reflector antenna for CubeSats[J]. IEEE, 2019: 1715-1716.
- [11] CHAHAT N, SAUDER J, LANE M, et al. Multi-Beam 1.6m Ka-band deployable mesh reflector antenna concept for INCUS[C]//. 2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, 2022: 165-166.
- [12] HODGES R E, CHAHAT N, HOPPE D J, et al. A deployable high-gain antenna bound for Mars: Developing a new folded-panel reflectarray for the first CubeSat mission to Mars[J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2017, 59(2): 39-49.
- [13] 刘洋, 王宏建, 张立芳. 星载反射阵天线形变对其辐射特性的影响[J]. 空间科学学报, 2020, 40(1): 117-125. LIU Yang, WANG Hongjian, ZHANG Lfang. Influence of deformation of spaceborne reflectarray antenna on its radiation characteristics[J]. China Journal of Space

- Science, 2020, 40(1): 117-125.
- [14] 李怡晨, 宋燕平, 胡飞. 面向空间天线的TWF复合材料性能研究[J]. 中国空间科学技术, 2020, 40(3): 25-35.
LI Yichen, SONG Yanping, HU Fei. Research on performance of TWF composite for space antenna[J]. Chinese Space Science and Technology, 2020, 40(3): 25-35.
- [15] TAN L, PELLEGRINO S. Ultra thin deployable reflector antennas[C]//45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, 2004.
- [16] REYNOLDS W D, MURPHEY T W, BANIK J A. Highly compact wrapped-gore deployable reflector[C]//52nd AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2011.
- [17] DATASHVILI L, BAIER H. Derivation of different types of antenna reflectors from the principle of highly flexible structures[C]//The 8th European Conference on Antennas and Propagation, 2014.
- [18] DUFOUR L, DATASHVILI L, GUINOT F, et al. Origami deployable reflector antenna for CubeSats[C]//AIAA Scitech 2021 Forum, 2021.
- [19] PARQUE V, SUZAKI W, MIURA S, et al. Packaging of thick membranes using a multi-spiral folding approach: Flat and curved surfaces[J]. Advances in Space Research, 2021, 67: 2589-2612.
- [20] SAKAMOTO H, NATORI M C, KADONISHI S, et al. Folding patterns of planar gossamer space structures consisting of membranes and booms[J]. Acta Astronautica, 2014, 94: 34-41.
- [21] 张赢杰, 孙蓓蓓, 王智磊, 等. 空间可展开结构复合材料薄壁圆管铰链多目标优化研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(19): 218-225.
ZHANG Yingjie, SUN Beibei, WANG Zhilei, et al. Multi-objective optimization for composite thin-walled circular tube hinge of space deployable structures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(19): 218-225.

[作者简介]

- 杨留义 1988年生, 博士, 高级工程师。
王力文 2000年生, 硕士研究生。
徐磊 1979年生, 硕士, 研究员。
刘越东 1981年生, 硕士, 研究员。
史永康 1979年生, 博士, 研究员。
刘昊 1976年生, 博士, 研究员。

(本文编辑: 杨秀丽)