

文章编号: 2095-4980(2022)01-0080-05

宽波束宽角轴比四臂螺旋天线设计

董楠^{1,2}, 赵香妮^{1,2}

(1.北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2.北京电磁兼容与天线测试工程技术研究中心, 北京 100094)

摘要: 为解决复杂星体环境多径干扰问题, 同时满足卫星在轨高速数据传输对测控信道能力的需求, 设计了一种带扼流圈的两臂等幅、相位相差 90° 馈电的四臂螺旋天线。该天线工作在S频段, 具有半空间波束覆盖、主向增益高、宽角圆极化性能优异、体积小、质量轻等特性。实测数据表明, 该天线圆极化轴比在 $\pm 110^\circ$ 范围内小于3 dB, 仿真与实测结果一致性好。本文还针对多径干扰问题对特定方向的增益和轴比性能进一步调整优化, 以满足不同的使用需求。

关键词: 测控天线; 四臂螺旋; 圆极化; 多径抑制

中图分类号: TN823^{+.31}

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020645

Design of a quadrifilar helical antenna with wide beam and wide angle axial ratio

DONG Nan^{1,2}, ZHAO Xiangni^{1,2}

(1.Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

2.Beijing Engineering Research Center of EMC & Antenna Test, Beijing 100094, China)

Abstract: A quadrifilar helical antenna equipped with chokes is designed in order to solve the problem of multipath interference in the complex satellite surface electromagnetic environment, and to meet the requirements of satellite high-speed data transmission for telemetry, track and command system. This antenna has two arms at equal amplitude and the feed at 90° phase difference. It works in the S-band, with half-space beam coverage, high gain, wide-angle circular polarization, small size, and light weight. The simulation and measurement results show that the circular polarization axis ratio of the antenna is less than 3 dB in the range of $\pm 110^\circ$ and the simulation results are in good agreement with measurement. A solution to the problem of multipath interference is also proposed in this paper. The gain and axis ratio of specific direction are adjusted to meet different requirements.

Keywords: TT&C antenna; quadrifilar helical antenna; circular polarization; multipath mitigation

航天测控系统是航天工程不可或缺的重要组成部分, 测控天线是卫星测控分系统的主要组成部分, 其任务是与地面测控天线一道建立一个满足预定要求的、稳定可靠的无线电传输通道, 保证星地无线遥测、遥控与跟踪信息的发射、接收与传输。简而言之, 航天器测控天线用于接收地面站发射给航天器的遥控信号, 向地面站发射航天器的遥测信号^[1-2]。

测控天线通常安装在卫星表面, 多采用收发共用模式, 要求具有半空间波束覆盖。常用的测控天线有螺旋、微带和振子天线形式, 其中四臂螺旋天线具有小型化、宽波束、圆极化特性, 在遥感、导航、通信等领域使用广泛^[3-5]。随着越来越多的卫星测控系统增加了在轨高速数据传输的功能, 对测控天线不仅要求宽波束, 还需有较高的主向增益。且星表电磁环境复杂, 为减小同旋矢量叠加, 还要求测控天线具有优异的圆极化性能。

测控天线要经历严酷的力学和空间环境, 除电性能要求外, 还需考虑环境因素带来的一些对机械结构、材料特性和热特性的特殊要求, 如冲击、振动、冷热交变、空间带电粒子辐射等。另外, 测控天线从卫星发射到卫星在轨连续工作, 设计时还需考虑真空放电和微放电问题。

本文根据实际使用要求, 设计了一种星载 S 频段四臂螺旋天线, 该天线采用模块化设计, 易于批产, 在测控

频带内具有半空间波束覆盖,且广角圆极化性能好,主向增益高。针对复杂星体环境的多径干扰问题,提出了解决方案,可进一步实现对特定方向增益和轴比性能的调整优化,以满足不同的使用需求。本文采用有限元法进行分析计算,并与实际测试数据进行比较,测试与仿真结果吻合良好。

1 四臂螺旋和扼流圈

四臂螺旋天线由 4 根螺旋臂组成,每根螺旋臂长度为 $M\lambda/4$ (M 为整数)。四臂螺旋天线可看成是由空间正交 90° 馈电的两组双线螺旋组成,见图 1。可以形成心形圆极化方向图,辐射方向图的最大指向为轴向方向。

根据环偶极子模型对该天线工作原理进行理论分析。单组双线螺旋的辐射场可表示为:

$$\mathbf{E}_{\theta 1} = K e^{-jkr} (-\cos\phi + j\sin\phi \cos\theta) \quad (1)$$

$$\mathbf{E}_{\phi 1} = K e^{-jkr} (-\cos\theta \sin\phi + j\cos\theta) \quad (2)$$

同理,另一组双线螺旋的辐射场可表示为:

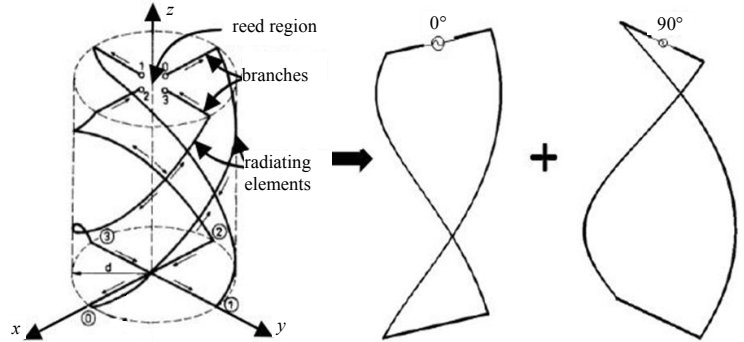


Fig.1 Physical geometry of each of the QHA branches together with a complete QHA body

图 1 双线螺旋组成四臂螺旋

$$\mathbf{E}_{\theta 2} = K e^{-j(kr-\frac{\pi}{2})} (-\sin\phi + j\cos\phi \cos\theta) \quad (3)$$

$$\mathbf{E}_{\phi 2} = K e^{-j(kr-\frac{\pi}{2})kr} (\cos\theta \cos\phi + j\sin\phi) \quad (4)$$

式中: K 为一个在远场固定位置时与 ϕ 和 θ 无关的量; $k=2\pi/\lambda$, 四臂螺旋归一化的总辐射场可表示为:

$$\mathbf{E}_{\theta} = \mathbf{E}_{\theta 1} + \mathbf{E}_{\theta 2} = (1 + \cos\theta) e^{-j\phi} \quad (5)$$

$$\mathbf{E}_{\phi} = \mathbf{E}_{\phi 1} + \mathbf{E}_{\phi 2} = (1 + \cos\theta) e^{-j(\phi-\frac{\pi}{2})} \quad (6)$$

当 \mathbf{E}_{θ} 与 \mathbf{E}_{ϕ} 幅度相等,相位相差 90° 时,就可实现圆极化。但仅靠四臂螺旋,还不能同时满足在轨高速数据传输和复杂星体环境下抗多径干扰问题。本文通过在螺旋背面增加扼流圈的方式,进一步提升天线性能。扼流圈是一种改变电磁波沿表面传播性能的周期性结构,使用一组沿径向布局的同心圆环来遏制结构的表面电流^[6]。常见的扼流圈按照结构的不同,大致可分为单槽深扼流圈结构、双槽深扼流圈结构和三维扼流圈结构^[7]。本文采用双槽扼流圈结构,可以将扼流圈的圆环高度方向近似看作短路传输线,当高度接近 $\lambda/4$ 时,呈表面开路状态,起到阻挡表面电流的作用,表面的各向异性同时阻止了 TM 波和 TE 波,即扼流圈的所谓“软”表面特性^[8-9]。

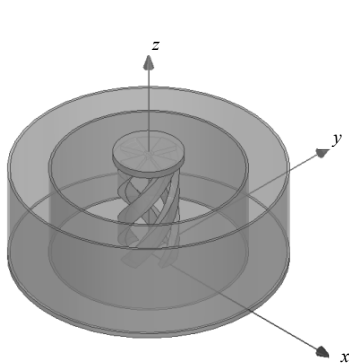


Fig.2 HFSS model of the QHA with chokes
图 2 带扼流圈的四臂螺旋天线仿真模型

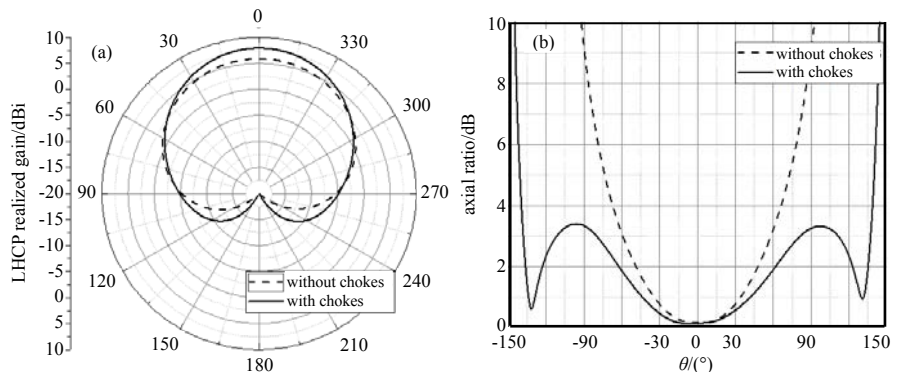


Fig.3 Simulated (a) radiation patterns and (b) axis ratio of QHA with and without chokes(2 GHz)
图 3 增加扼流圈前后(a) 天线方向图; (b) 轴比仿真曲线(2 GHz)

天线采用基于有限元法(Finite Element Method, FEM)的 Ansys HFSS 软件仿真,仿真模型如图 2 所示,四臂螺旋由金属柱绕制而成,无侧壁介质支撑材料,避免引入额外的介质损耗,仅在顶部用少许介质材料进行局部结构加强。通过仿真确定了最终参数,增加扼流圈前后仿真结果如图 3~图 5 所示。螺旋带直径 24 mm,螺距 90 mm, $1/2$ 圈,采用等高度的两圈扼流圈,扼流圈高度为 40 mm,最大直径为 110 mm。天线旋向为左旋圆极化,由仿真结果可见,增加扼流圈后,四臂螺旋天线宽角圆极化性能明显提升,轴比在 $-110^\circ \sim +110^\circ$ 范围内均小于 4 dB,

左旋圆极化增益在 2 GHz 时为 7.9 dBi, 在 2.3 GHz 时达到 8.2 dBi, 回波损耗在工作频带内大于 12.5 dB。

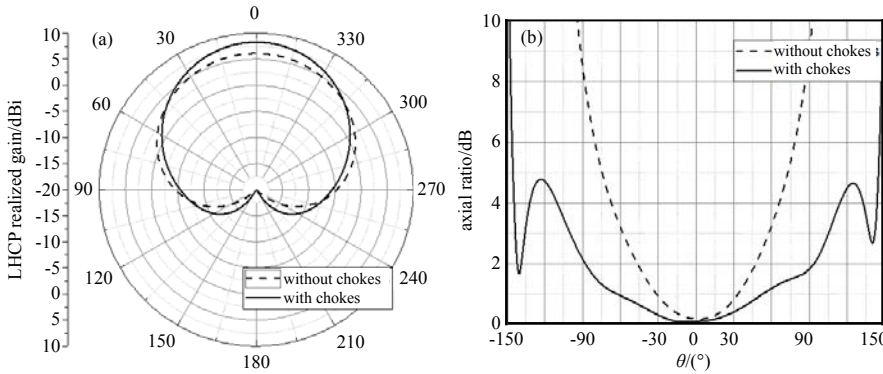


Fig.4 Simulated (a) radiation patterns and (b) axial ratio of QHA with and without chokes(2.3 GHz)
图4 增加扼流圈前后(a) 天线方向图; (b) 轴比仿真曲线(2.3 GHz)

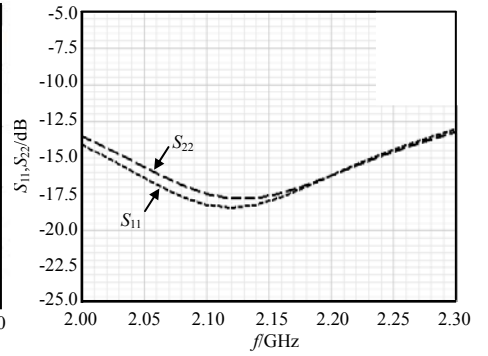


Fig.5 Simulated S_{11} and S_{22}
图5 S_{11} 和 S_{22} 仿真曲线

2 馈电网络

四臂螺旋天线有 3 种馈电方法, 包括自相移方法、加载没有相移的馈电网络、带相移的功分馈电网络。本文设计的四臂螺旋天线可看作是两组双线螺旋分别馈电, 相位分别为 0° 和 90° , 采用带 90° 相移的功分馈电网络。带 90° 相移的功分馈电网络可选择微带结构或同轴结构, 考虑到该天线所处的恶劣空间环境, 综合比较性能、尺寸、可靠性和批次一致性, 选择空气介质宽边耦合带线作为馈电网络方案。S B Cohn^[10]利用奇、偶模对这种耦合电路进行分析, 如图 6 所示, 并给出奇、偶模特性阻抗的近似计算公式:

$$Z_{oe} = \frac{188.3/\sqrt{\epsilon_r}}{\frac{w/b}{1-(s/b)} + \frac{C'_{fe}}{\epsilon}}, \quad Z_{oo} = \frac{188.3/\sqrt{\epsilon_r}}{\frac{w/b}{1-(s/b)} + \frac{w}{s} + \frac{C'_{fo}}{\epsilon}} \quad (7)$$

式中:

$$\frac{C'_{fe}}{\epsilon} = 0.4413 + \frac{1}{\pi} \left[\ln \left(\frac{1}{1-(s/b)} \right) + \frac{s/b}{1-(s/b)} \ln \frac{b}{s} \right] \quad (8)$$

$$\frac{C'_{fo}}{\epsilon} = \frac{b/s}{\pi} \left[\ln \left(\frac{1}{1-(s/b)} \right) + \frac{s/b}{1-(s/b)} \ln \frac{b}{s} \right] \quad (9)$$

上式必须满足条件 $w/s \geq 0.35$, 且 $(w/b)/(1-s/b) \geq 0.35$ 。同时, 公式是将带线导体厚度设为“零”来对待的, 对于有厚度的带线导体, 边缘电容会比式(8)~(9)给出的更大, 带线和平行板之间的电容也会增加。

馈电网络仿真模型如图 7 所示, 仿真结果如图 8 所示。由仿真结果可见, 在 2~2.3 GHz 频率范围内, 馈电网络的损耗均小于 0.3 dB, 并且端口间的相位差为 93° 。

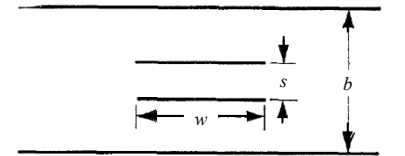


Fig.6 Cross-section dimensions of broadside-coupled strips
图6 宽边耦合带线横截面结构

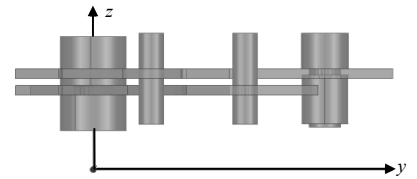


Fig.7 HFSS model of feed network
图7 馈电网络仿真模型

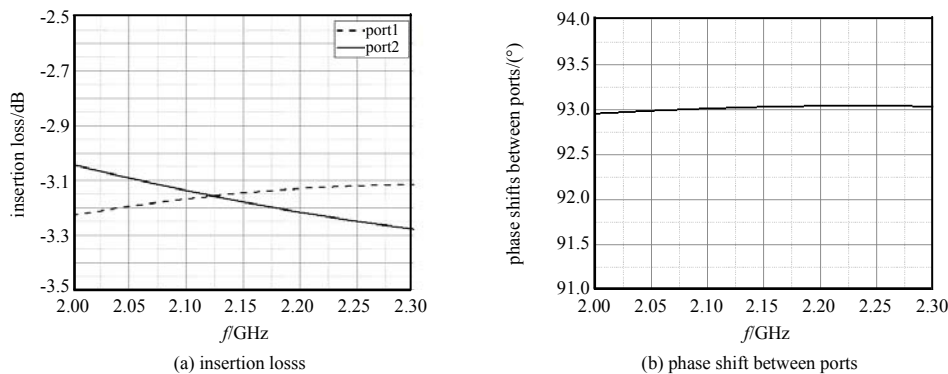


Fig.8 Simulation of feed network
图8 馈电网络仿真曲线

3 测试结果

通过优化仿真确定最终参数, 天线实物照片如图 9 所示。天线表面喷涂热控白漆, 质量不超过 350 g, 直径不大于 110 mm。天线实测和仿真增益方向图和轴比曲线见图 10 和图 11, 实测电压驻波比在工作频带范围内小于 1.25, 见图 12。由实测结果可见, 该天线左旋圆极化增益在 $-90^{\circ}\sim+90^{\circ}$ 范围内大于 -5 dBi, 最大增益在 2 GHz 为 7.3 dBi, 在 2.3 GHz 为 7.8 dBi。圆极化轴比在 $-110^{\circ}\sim+110^{\circ}$ 范围内小于 3 dB, 在 $\pm 20^{\circ}$ 范围内小于 1 dB, 仿真和实测结果一致性好。



Fig.9 Physical view of the antenna
图 9 天线实物照片

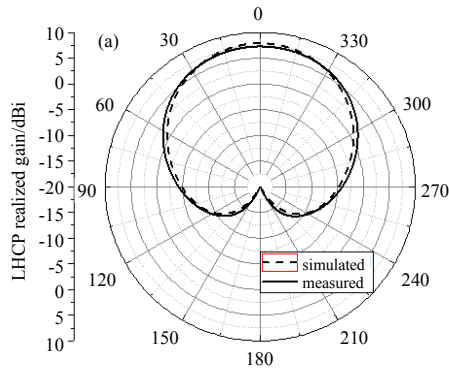


Fig.10 (a) Measured/simulated radiation patterns and (b) axial ratio(2 GHz)
图 10 (a) 实测和仿真方向图与(b) 轴比曲线(2 GHz)

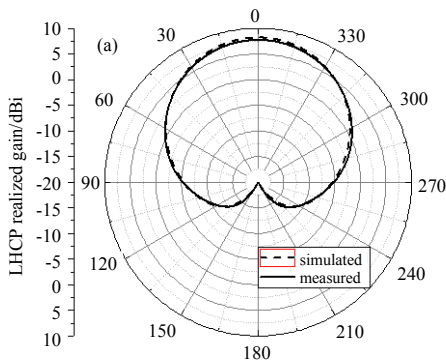
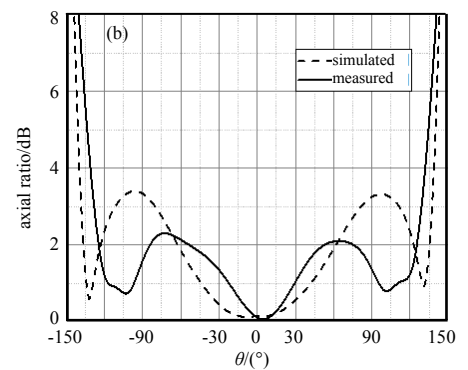


Fig.11 (a) Measured/simulated radiation patterns and (b) axial ratio(2.3 GHz)
图 11 (a) 实测和仿真方向图与(b) 轴比曲线(2.3 GHz)

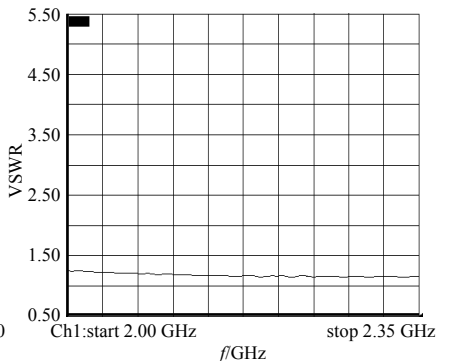
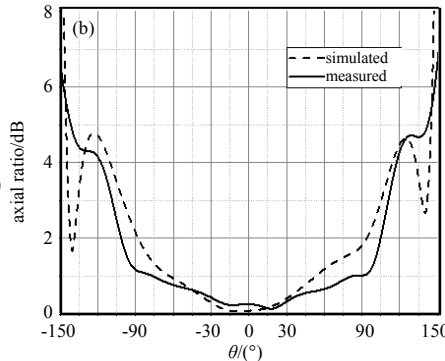


Fig.12 Measured VSWR of antenna
图 12 带内电压驻波比实测曲线

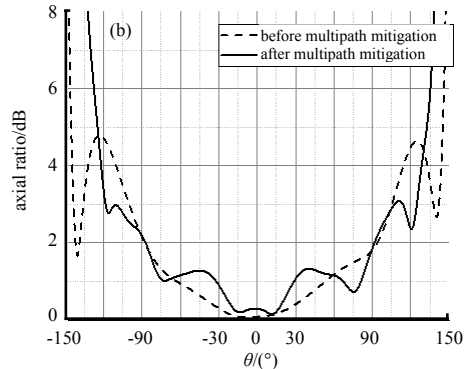
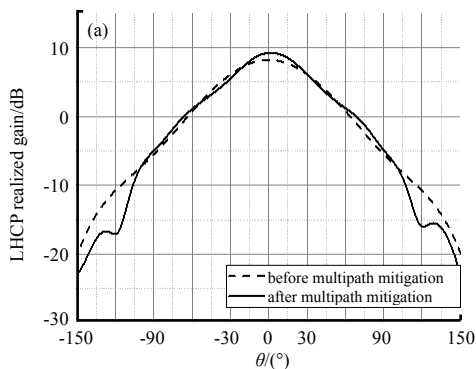


Fig.13 Simulated radiation patterns and axial ratio before and after adding multipath mitigation
图 13 增加多径抑制措施前后(a) 天线方向图; (b) 轴比仿真曲线

针对特定方向的多径干扰, 还可以通过调整扼流圈的方式, 进一步改善特定角度增益或轴比性能的结果。例如, 为了减小来自与天线轴向夹角 $\pm 110^{\circ}$ 到 $\pm 120^{\circ}$ 范围内的多径干扰, 需要进一步提高天线主向增益, 同时降低 $\pm 110^{\circ}\sim\pm 120^{\circ}$ 范围内的增益和轴比。因此, 在上文天线的基础上进一步调整扼流圈参数, 可以有效减小天线受特定方向多径效应的影响。增益和轴比仿真比对曲线见图 13, 与上文天线相比, 主向增益提高了 1 dB, $\pm 110^{\circ}\sim\pm 120^{\circ}$

范围内增益最多下降了 7 dB, 轴比也显著减小, 均小于 3.1 dB。实测增益和轴比曲线见图 14, 测试与仿真结果吻合良好。

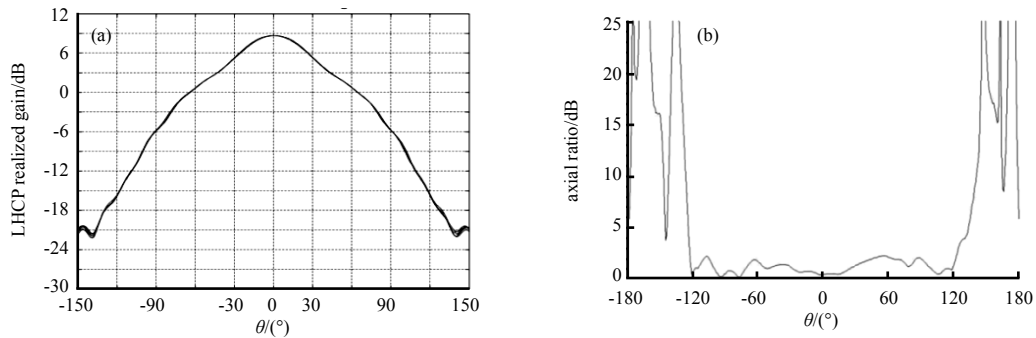


Fig.14 (a)Measured radiation patterns and (b) axial ratio
图 14 (a) 实测方向图和 (b) 轴比曲线

4 结论

本文介绍了一种宽波束宽角轴比 S 频段四臂螺旋天线, 由四臂螺旋、扼流圈和馈电网络组成, 尺寸小, 质量轻, 可靠性高, 易于批产。实测结果表明, 该天线在工作频带内有良好的性能, 具有宽波束、超广角圆极化、高增益等特点, 既满足了卫星在轨高速数据传输对测控信道能力的需求, 又为复杂星体环境带来的多径干扰问题提出了解决方案, 并给出了应用实例。

参考文献:

- [1] 谭维炽, 胡金刚. 航天器系统工程[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2009. (TAN Weichi, HU Jingang. Spacecraft systems engineering[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2009.)
- [2] 尤睿, 高文军, 吴春邦, 等. 航天器天线工程设计技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018. (YOU Rui, GAO Wenjun, WU Chunbang, et al. Spacecraft antenna engineering design technology[M]. Beijing: BIT Press, 2018.)
- [3] 崔灵菲, 吴秉琪, 刘长军. 一种用于 GPS 卫星导航的四臂螺旋圆极化印刷天线[J]. 应用科技, 2019, 46(6): 16-19. (CUI Lingfei, WU Bingqi, LIU Changjun. Design of a quadrifilar helical circularly polarized printed antenna for GPS[J]. Applied Science and Technology, 2019, 46(6): 16-19.)
- [4] 王晓明, 李亚军, 芮锡, 等. 一种新型高增益小型化四臂螺旋天线[J]. 电讯技术, 2019, 59(7): 842-846. (WANG Xiaoming, LI Yajun, RUI Xi, et al. A novel high gain miniaturized quadrifilar helix antenna[J]. Telecommunication Engineering, 2019, 59(7): 842-846.)
- [5] 李荣, 吴景峰, 马志慧, 等. S 波段宽波束圆极化天线设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(4): 625-629. (LI Rong, WU Jingfeng, MA Zhihui, et al. Design of an S-band wide beam circular polarized antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, 15(4): 625-629.)
- [6] SAWYER D J, DAS S, DIAMANTI N, et al. Choke rings for pattern shaping of a GPR dipole antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(12): 6781-6790.
- [7] 赵泽方, 杜平, 邵玉. 小型化 3D 扼流圈天线设计[J]. 中国科技论文, 2016, 11(14): 1605-1608. (ZHAO Zefang, DU Ping, SHAO Yu. Design of a miniaturized 3D choke ring antenna[J]. CHINA SCIENCE PAPER. 2016, 11(14): 1605-1608.)
- [8] KILDAL P S. Artificially soft and hard surfaces in electromagnetics[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1990, 38(10): 1537-1544.
- [9] STESHENKO S, KIRILENKO A A, BORISKIN A V, et al. Advanced modeling of choke ring antennas for mm-wave applications[C]// 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation. Prague, Czech Republic: IEEE, 2012: 650-654.
- [10] COHN S B. Characteristic impedance of broadside-coupled strip transmission lines[J]. IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1960, 8(6): 633-637.

作者简介:

董楠(1979-), 女, 硕士, 高级工程师, 从事卫星天线及射频产品设计与开发. email: natalie_d@126.com.

赵香妮(1985-), 女, 硕士, 高级工程师, 从事卫星天线及射频产品设计与开发.