

文章编号: 2095-4980(2019)04-0666-06

全金属频率选择表面设计与验证

江 涛^{1,2}, 侯沁芳^{1,2}, 斯 扬^{1,2}, 俞笔奇^{1,2}, 阎鲁滨^{1,2}

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

摘 要: 为解决星体资源有限导致天线安装数量受限问题, 针对K/Ka/EHF三频共用反射面天线的关键部组件——基于频率选择表面(FSS)的副反射器进行研究。概述了三频共用反射面天线系统的基本架构, 选择双曲面型带通全金属FSS作为天线系统的副反射器; 采用Floquet原理与有限元分析结合的方法, 利用Ansys HFSS15作为分析工具进行仿真设计, 仿真结果表明通带插损小于0.3 dB, 2个模式的幅度差小于0.2 dB, 相位差小于2.5°, 带外抑制大于25.9 dB。最后对加工生产的副反射器进行了性能测试, 测试结果与仿真分析结果一致, 为星载反射面天线三频共用提供了技术支持。

关键词: 三频共用; 全金属频率选择表面; 性能测试; 星载反射面天线

中图分类号: TN821

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201904.0666

Design and experimental verification of an all-metal Frequency Selective Surface

JIANG Tao^{1,2}, HOU Qinfang^{1,2}, SI Yang^{1,2}, YU Biqu^{1,2}, YAN Lubin^{1,2}

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

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

Abstract: In order to remove the restrictions on the number of antennas resulting from limited resources on satellites, the key components of the tri-band reflective antenna—Frequency Selective Surface(FSS) based sub-reflectors are studied. Firstly, the basic architecture of the tri-band reflective antenna system is summarized, then the hyperboloid type band-pass all-metal FSS as the sub-reflector is selected. By using the Floquet principle and Finite Element method, Ansys HFSS is chosen as the analysis tool to simulate and design. The results show that the insert loss is less than 0.3 dB, the amplitude difference between the two modes is less than 0.2 dB and the phase difference is less than 2.5°. The out-band rejection is better than 25.9 dB. Finally, the sub-reflector is fabricated and the performance is tested. The test results are in good agreement with the simulation results, which provides technical support for the tri-band reflective shared-aperture antenna system.

Keywords: tri-band; all-metal Frequency Selective Surface; performance test; spaceborne reflector antenna

卫星星体资源有限, 导致可以安装的天线数量有限。多频共用天线可以减少星上天线数量, 满足不同频段的使用要求, 是天线系统紧凑化设计的有效手段。对于反射面天线, 解决多频共用问题常用的途径之一是研制多频馈源。但当频带范围跨度较大时, 馈源的设计、加工和生产变得困难, 且为了兼顾各个频段的使用, 无法在多个应用频段范围内将馈源的性能做到最优。

频率选择表面(FSS)是一种空间滤波器^[1-2], 与电磁波相互作用表现出明显的带通或带阻的滤波特性, 通常被用于通信^[3-4]、雷达罩^[5]、副反射器^[6]等。它是由周期性排列的金属贴片单元^[7-9]或金属屏上周期性的开孔单元构成的一种二维周期阵列结构, 因其具有特定的频率选择作用而广泛用于微波、红外直至可见光波段。

本文针对 K/Ka/EHF 三频共用反射面天线关键部件基于 FSS 的副反射器进行研究。副反射器采用全金属 FSS^[10-12]设计, 空间环境适应性强, 有效避免了介质型 FSS 副反射器长期工作后性能变化的问题, 大大提高了可

靠性。对双曲面型带通全金属 FSS 副反射面进行仿真设计与优化并加工生产,并对加工的产品进行电性能测试。测试结果表明产品性能良好,为星载反射面天线三频共用提供了技术支持。

1 频率选择表面设计

1.1 天线系统简述

K/Ka/EHF 三频共用反射面天线系统采用卡塞格伦式偏馈双反射面天线形式,天线工作频率为 20/30/45 GHz。馈源系统采用 K/Ka 和 EHF 两套馈源分别馈电的方案。副反射器采用全金属 FSS,利用 FSS 的频率选择特性,设计 EHF 频带为通带、K/Ka 频带为阻带,共用主反射器,最终实现 K/Ka/EHF 三频共用。图 1 为 K/Ka/EHF 三频共用反射面天线系统方案示意图。

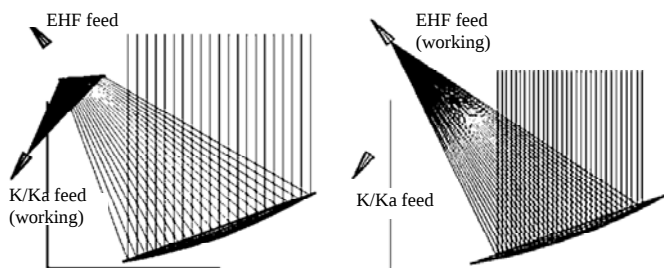


Fig.1 Diagram of K/Ka/EHF tri-band reflective antenna system
图1 K/Ka/EHF三频共用反射面天线系统方案示意图

1.2 双曲面型全金属FSS设计

FSS 可采用等效电路方法^[13-14]进行分析,但其又是一种周期性结构,分析周期性结构最重要、最基础的理论是 Floquet 定理。对于一个无限大周期结构阵列,当用平面波照射均匀表面时,由于结构的周期性,导致它附近的场幅度分布具有同样的周期性。但在相位上,通常馈电相位呈线性分布或随平面波的斜入射而具有规律的相位差;在时域上,则表现为有规律的延时。

一维周期性表面如图 2 所示,对于给定的传输模式,在给定的频率下,任一截面内的场与相距周期长整数倍的另一截面内的场分布函数相同,只相差一个相位因子 e^{-jmk_0D} ,其中 k_0 为传播常数^[1]。

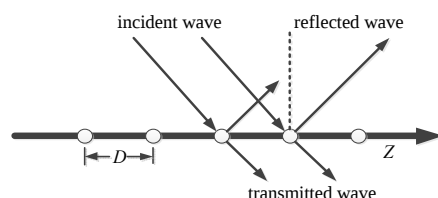


Fig.2 Diagram of 1D period surface
图2 一维周期表面示意图

对双曲面型全金属 FSS 的分析采用 Floquet 原理与有限元分析结合的方式,采用 ANSYS HFSS15 对其性能进行仿真计算与优化。

根据 K/Ka/EHF 三频共用反射面天线系统方案要求,副反射器设计 EHF 频段为通带,中心频率为 44.5 GHz。由图 1 可以看出,馈源波束相对副反射器有较大的入射角^[15],实际上此入射角的范围在 $24^\circ \sim 38^\circ$ 之间,入射角度较大。考虑副反射器的工作频带以及入射角范围,通过比较不同形式的单元后选择矩形单元作为最终设计。副反射器外形与单元尺寸见图 3。初始设计尺寸如下: $D_1=0.57\lambda, D_2=0.54\lambda, d=0.54\lambda$ 。

为减小加工难度,设置 $R=0.54\lambda$ 。调整 D_1, D_2 和 d ,对副反射器的透射性能和反射性能进行优化。设置激励为 FloquetPort1(TE₁₀),Floquetport2(TM₁₁),最终得到的优化结果如图 4~图 7 所示。

根据仿真结果可以得到:

1) 阻带 K/Ka 频段透射信号的幅度分别为 -41.6 dB 和 -25.9 dB;反射的 TE 模和 TM 的最大幅度差为 0.003 dB,最大相位差为 3° ,即对于圆极化入射波,反射波的轴比约为 0.45 dB;

2) 入射角为 24° 时,通带 EHF 频段透射的 TE 模和 TM 模最大相位差小于 1° ,最大幅度差为 0.05 dB;入射角为 38° 时,通带 EHF 频段透射的 TE 模和 TM 模最大相位差为 2.5° ,最大幅度差为 0.2 dB;即对于圆极化入射波,透射波的轴比约为 0.51 dB。

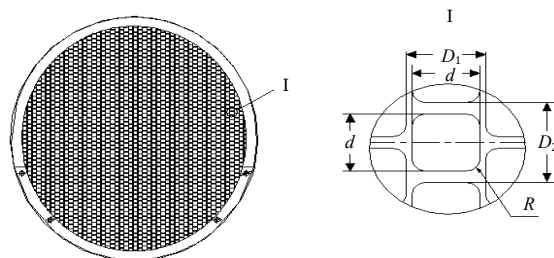


Fig.3 Sub-reflector and cell dimension
图3 副反射器外形及单元尺寸

2 实测结果讨论

该全金属 FSS 副反射器最高工作频段为 EHF 频段,工作频段较高,物理尺寸相对较小,特别是侧壁的厚度很薄,对加工和装配的精确度要求很高。经容差分析,其敏感尺寸的加工公差应控制在 0.02 mm 以内。实际加工过程中使用了高精度的数控机床、电火花、线切割等方法来保证加工精确度。

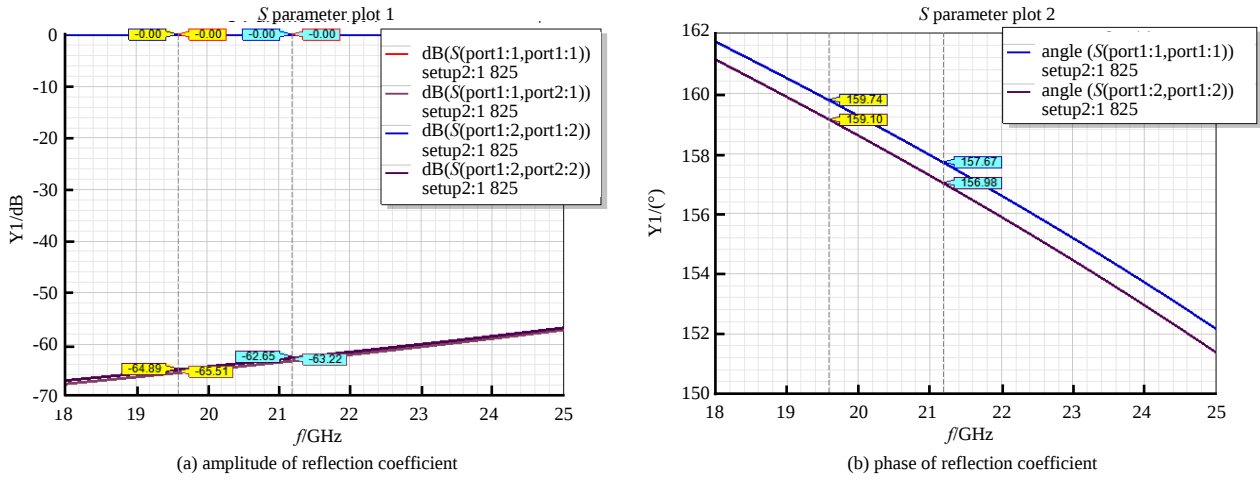


Fig.4 Simulated results of K-band reflective performance

图 4 K 频段反射性能仿真结果

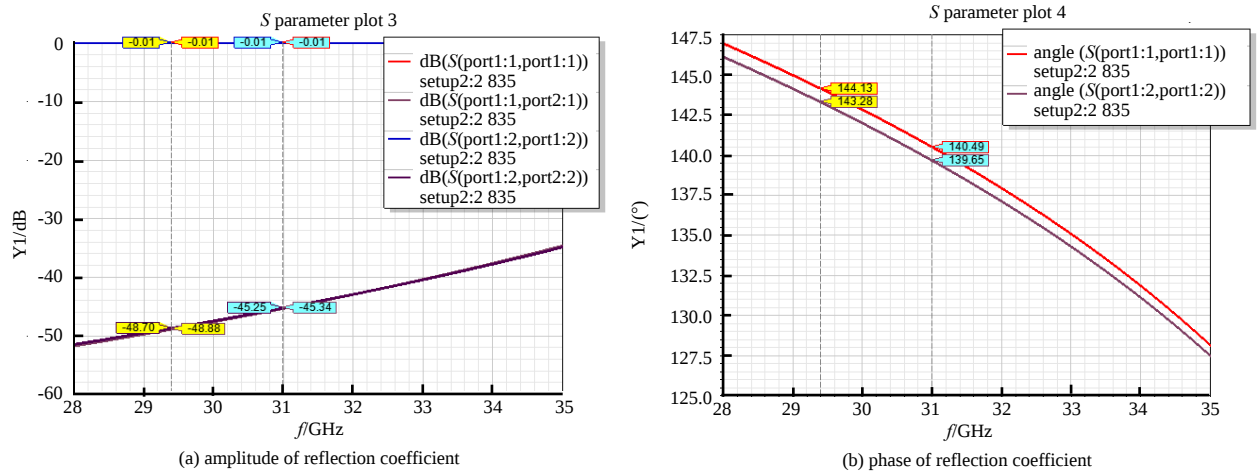


Fig.5 Simulated results of Ka-band reflective performance

图 5 Ka 频段反射性能仿真结果

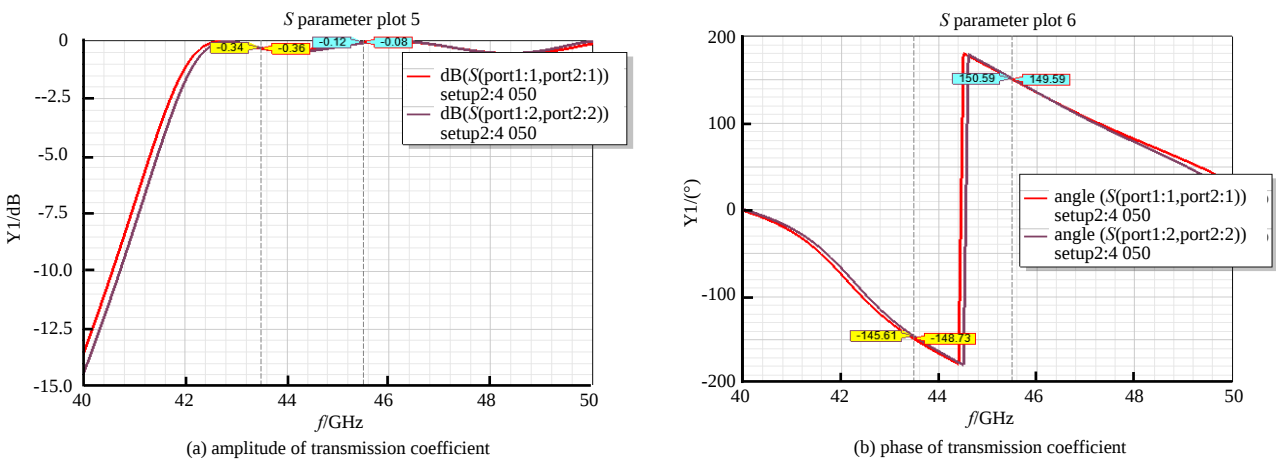


Fig.6 Simulated results of EHF-band transmission performance(incidence angle 24°)

图 6 EHF 频段透射性能仿真结果(入射角 24°)

由于该天线工作频段较高,对测试场地提出了较高的要求,最终选择了具备 EHF 频段测试能力的平面近场进行了测试。

设计验证采用对比的方法进行, EHF 频段馈源采用右旋圆极化入射,具体操作是:首先进行 EHF 频段波纹馈源辐射性能测试;然后将馈源与副反射器装配至天线系统的使用状态,测试此时的馈源辐射性能;最后对测试结果进行对比。详细的对比如图 8、图 9 所示。

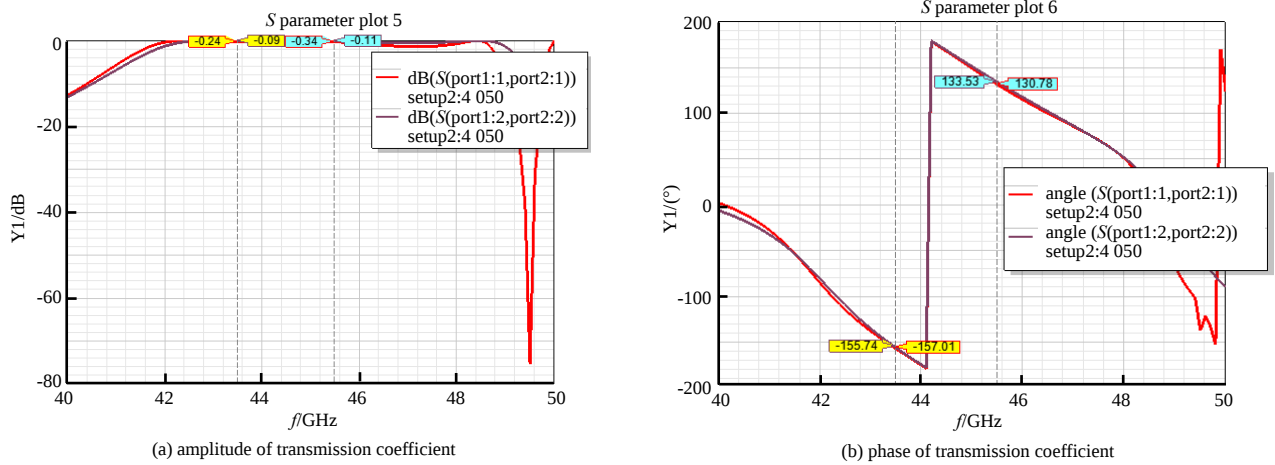
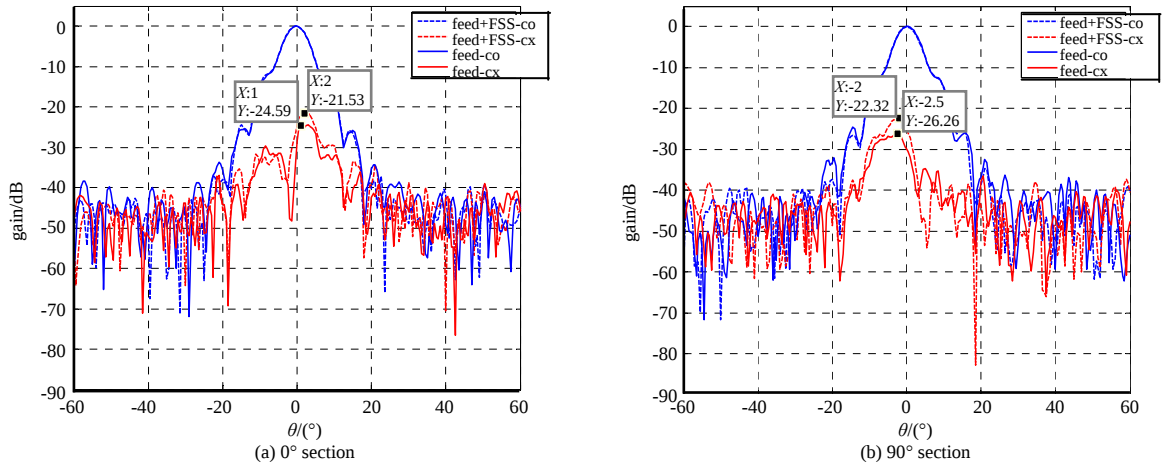
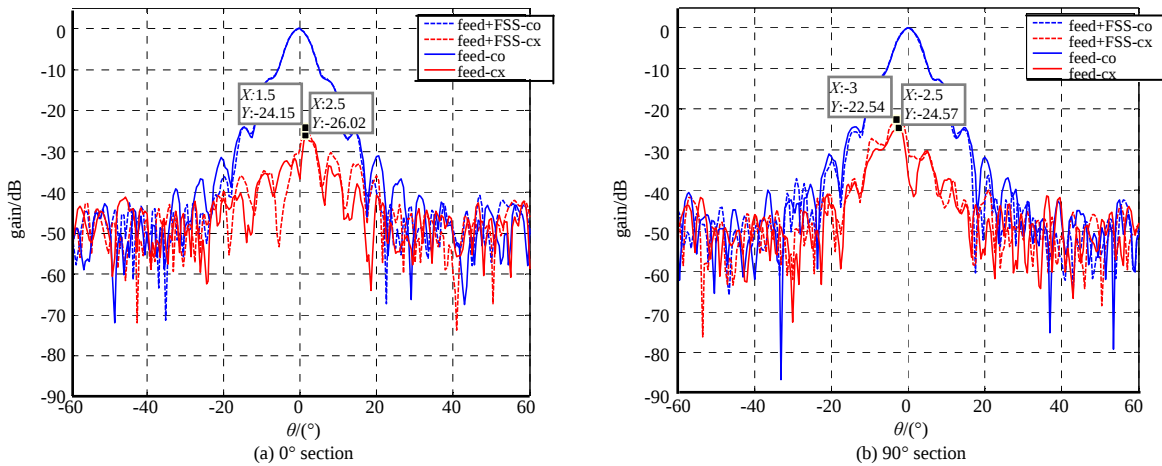


Fig.7 Simulated results of EHF-band transmission performance(incidence angle 38°)

图 7 EHF 频段透射性能仿真结果(入射角 38°)

Fig.8 Comparison of test results between feed-only and feed+FSS($f=43.5$ GHz)图 8 馈源与馈源+FSS 测试结果比较($f=43.5$ GHz)Fig.9 Comparison of test results between feed-only and feed+FSS($f=45.5$ GHz)图 9 馈源与馈源+FSS 测试结果比较($f=45.5$ GHz)

通过比较单馈源测试结果与带副反射器的馈源测试结果可得：

- 1) 单馈源测试结果与带副反射器的馈源测试结果主极化吻合性良好；
- 2) 单馈源测试结果与带副反射器的馈源测试结果其交叉极化最大差别为 4 dB。

产生以上差别的原因分析：单馈源交叉极化为 -26.3 dB，通过测试极化器的性能得到，极化器水平与垂直极化的幅度差约为 0.05 dB，相位差约为 85°，转换为交叉极化指标为 -27.2 dB，与测试结果基本一致。增加副反射

器后,考虑到副反射器为双曲面型,引入附加幅度差 0.2 dB,相位差 3° ,计算得交叉极化约为 -22.9 dB,与测试结果吻合性良好,证明了仿真设计的正确性。

该全金属 FSS 相比介质型频率选择表面质量有所增加,但由于其全金属结构,空间环境适应性增强,可有效避免介质型频率选择表面长期工作后的性能变化问题,可靠性得到大幅提升,可作为星载三频共用反射面天线系统的副反射器使用。

3 结论

介绍了双曲面型全金属 FSS 的基本设计方法并使用该方法设计了一种副反射器,设计和实测结果表明其可以覆盖需要的工作频段范围,带副反射器的馈源交叉极化小于 -21.5 dB,可作为星载高性能反射面天线的副反使用,为多频共用反射面天线设计提供了参考。

参考文献:

- [1] MUNK B A. 频率选择表面理论与设计[M]. 北京:科学出版社, 2009. (MUNK B A. Frequency Selective Surface:theory and design[M]. Beijing:Science Press, 2009.)
- [2] DASILVA M R. Dual-polarized band-stop FSS spatial filters using vicsek fractal geometry[J]. Microwave Optical Technical Letters, 2013,55(1):31-34.
- [3] TEO P T,LUO X F,LEE C K. Frequency Selective Surfaces for GPS and DCS1800 mobile communication[J]. IET Microwave Antenna Propagation, 2007(2):314-321.
- [4] FUCHI K,TANG J. Origami tunable frequency selective surfaces[J]. IEEE Antenna Wireless Propagation Letters, 2012(11): 473-475.
- [5] 侯新宇,张澎,卢俊,等. 一种双曲率雷达罩的频率选择表面分片设计[J]. 弹箭与制导学报, 2006,26(1):123-125. (HOU Xinyu,ZHANG Peng,LU Jun,et al. A novel Frequency Selective Surfaces patch design for double curved radome[J]. Journal of Projectiles,Rockets, Missiles and Guidance, 2006,26(1):123-125.) DOI:10.3969/j.issn.1673-9728.2006.01.041.
- [6] PASIAN M,MONNI S. Frequency Selective Surfaces for extended bandwidth backing reflector functions[J]. IEEE Transaction on Antenna Propagation, 2010,58(1):43-50.
- [7] 王秀芝,高劲松,徐念喜. 一种 Ku 波段/毫米波波段独立双通带微型化频率选择表面[J]. 红外与毫米波学报, 2014, 33(3):241-247. (WANG Xiuzhi,GAO Jinsong,XU Nianxi. A novel miniaturized element Frequency Selective Surface with two independent pass-bands at Ku-band and millimeter-wave frequency[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2014,33(3):241-247.) DOI:10.3724/SP.J.1010.2014.00241.
- [8] 李由,刘梅林,王文松,等. 多层缝隙耦合贴片型频率选择表面研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2016,48(5):656-661. (LI You,LIU Meilin,WANG Wensong,et al. Multi-layer Frequency Selective Surface with aperture coupled patches[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016,48(5):656-661.) DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.05.007.
- [9] 贾宏燕,李田泽,杨淑连,等. 开口圆环单元带通频率选择表面的仿真与测试[J]. 电子元件与材料, 2015(12):77-80. (JIA Hongyan,LI Tianze,YANG Shulian,et al. Simulation and test of split ring element band-pass Frequency Selective Surface[J]. Electronic Components & Materials, 2015(12):77-80.) DOI:10.14106/j.cnki.1001-2028.2015.12.019.
- [10] BESSO P,BOZZI M,FORMAGGI M,et al. Feasibility study of the upgrade to K band of ESA deep space antennas[C]// IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. San Diego,CA,USA:IEEE, 2008:7-12.
- [11] VASSALLO E,MARTIN R,MADDE R,et al. The European space agency's deep-space antennas[J]. Proceedings of the IEEE, 2007,95(11):2111-2131.
- [12] BESSO P,BOZZI M,PERREGRINI L,et al. Deep space antenna for Rosetta mission:design and testing of the S/X band dichroic mirror[J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 2003,51(3):388-394.
- [13] GHOSH S,SRIVASTAVA K V. An equivalent circuit model of FSS-based metamaterial absorber using coupled line theory[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2015(14):511-514.
- [14] DUBROVKA R. Analysis of ring and rectangular slot FSS using a new equivalent circuit method[C]//2005 5th International Conference on Antenna Theory and Technique. Kyiv,Ukraine:IEEE, 2005:417-420.

(下转第 680 页)