

文章编号: 2095-4980(2025)02-0145-05

使用新型小型化软表面进行天线间去耦

乔健普^{1,2}, 冀航^{1,2}, 吴为军^{1,2}, 曾宪亮^{1,2}

(1. 海洋装备电磁效应及安全全国重点实验室, 湖北 武汉 430064; 2. 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064)

摘 要: 设计了一种小型化条带型软表面结构, 该结构在经典条带型软表面基础上增加了开口环设计。通过波导传输法, 对软表面抑制表面波的能力进行仿真, 通过对加载开口环前后的 S 参数及表面电流的分析, 证明了设计的软表面对表面波的抑制能力更强。此外, 仿真表明设计的软表面可在更低频段产生电磁传输抑制效应, 实现结构小型化。将提出的软表面加载于微带天线之间, 可用于抑制微带天线间耦合。新型小型化软表面在结构上高度对称, 且剖面高度较低, 可使两微带天线间的耦合在工作带宽内减小 7 dB 以上, 有效抑制了微带天线间表面波的传播, 实现了天线间去耦效果。

关键词: 开口环; 软表面; 表面波; 天线去耦

中图分类号: TN97

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023243

Mutual coupling reduction for microstrip antennas using novel miniaturized soft surface

QIAO Jianpu^{1,2}, JI Hang^{1,2}, WU Weijun^{1,2}, ZENG Xianliang^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Electromagnetic Effect and Security on Marine Equipment, Wuhan Hubei 430064, China;

2. China Ship Development and Design Centre, Wuhan Hubei 430064, China)

Abstract: This paper presents a compact strip-type soft surface structure, designed by introducing an aperture ring onto the foundation of the classical strip-type soft surface. Through guided wave transmission simulations, the capability of the soft surface to suppress surface waves is assessed. By analyzing the S-parameters and surface currents before and after incorporating the aperture ring, it is demonstrated that the designed soft surface in this study exhibits superior suppression capability against surface waves. Furthermore, simulations indicate the potential for electromagnetic transmission suppression at lower frequency bands, achieving structural miniaturization. When applied between microstrip antennas, the proposed soft surface can effectively suppress coupling between them. The novel miniaturized soft surface, featuring an added aperture ring on the basis of the classical strip-type soft surface, is highly symmetrical in structure with a low profile. This structure reduces the coupling between two microstrip antennas by more than 7 dB within the operating bandwidth, effectively suppressing the propagation of surface waves between the microstrip antennas and achieving decoupling effects.

Keywords: split ring; soft surface; surface wave; antenna decoupling

近年来, 具有高数据吞吐量, 且能保证传输稳定性的多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)天线系统已成为无线通信领域的研究热点。但 MIMO 系统中能安装设备的空间极其有限, 由此要求内部的 MIMO 天线必须排列紧凑。天线小型化以及紧密的排列必然会导致强烈的耦合^[1-2], 天线之间的强耦合不仅会引起天线的辐射特性, 还会导致通信传输效率降低。因此, 抑制 MIMO 天线间的电磁耦合方法变得尤为重要。

人工电磁材料因其独特的电磁特性以及对电磁波的调控机制^[3-4], 在短短十几年之间得到了高速发展^[5-7]。广义的人工电磁材料包括: 左手材料、复合左/右手材料、光子晶体、软表面等。由于具备对电磁波的灵活调控特性, 人工电磁材料在天线去耦领域具有广阔的应用前景。

收稿日期: 2023-09-02; 修回日期: 2023-11-25

Kildal 等^[8]在 1988 年提出了电磁软表面的概念, 即该结构可以在一定频率范围内阻止电磁波能量在其表面的传播。原始的电磁软表面是用横向波纹表面实现的, 当横向波纹的高度为工作频率所对应波长的 1/4 时, 由终端短路的传输线性质可得其阻抗为近似无穷大, 从而可得到磁边界的性质; 当波纹中金属板与金属板间的距离小于工作波长的 1/4 时, 每个金属板的上表面整体构成电边界。软表面只在一个方向上表现带阻特性, 可用阻抗变换理论来解释。Rajo-Iglesias 等^[9]在 2009 年提出了一种平面的条带型电磁软表面, 该方法是将经典波纹表面结构变形为水平波纹表面结构, 大大减小了电磁软表面结构的厚度, 此时要求条带宽度为 1/4 波长。由于软表面能抑制电磁波的传播, 故其具有较高的应用价值, 如抑制天线间的互耦。在 Rajo-Iglesias 模型的基础上, S Abushamleh 等^[10]在 2012 年提出一种边缘加载锯齿结构的软表面, 使其中心频率向低频移动, 从而实现小型化。2014 年, S Abushamleh 等在文献[11]中对之前的模型进行了改进, 将锯齿改为了相互交错的结构, 使软表面的工作带宽更宽, 同时工作的中心频率再一次降低, 更加小型化。2017 年, Huayan JIN 等^[12]通过在贴片天线间加载结构不对称的软表面, 使天线在 53.5~63.8 GHz 频段内的相互耦合降低了 3 dB, 但由于采用不对称结构, 去耦能力有限。2020 年, Ziyang WANG 等^[13]在耦合的两元件贴片天线上方放置由周期性圆形分裂环谐振器组成的超表面覆盖层, 在 5.58~6.0 GHz 的工作频带内, 将天线间的耦合从 -8 dB 降到小于 -20 dB。由于采用覆盖层结构进行去耦, 增加了天线的剖面高度。2022 年, S Bhattacharjee 等^[14]通过在贴片天线间插入电磁软表面结构充当电壁, 在 4.35 GHz 的谐振频率下将天线间交叉极化降低了 12.5 dB。

可以看出, 电磁软表面发展趋势为宽带、小型化, 且软表面可用于天线间的去耦。本文在 Rajo-Iglesias 模型的基础上, 在每个导电通孔周围增加了双开口谐振环狭缝。通过该方法, 使软表面工作的中心频率降低了 0.236 GHz, 实现了软表面的小型化。最后将该软表面放置于微带天线间, 两天线间的耦合降低了 7 dB 左右。

1 条带型软表面模型

经典的电磁软表面结构如图 1 所示, 该软表面为全金属结构, 表现为横向波纹形式。软表面的高度为其工作波长的 1/4, 由于高度限制, 故该软表面工作带宽较窄; 同时, 由于为全金属结构, 经典的电磁软表面并不适用于微带天线等天线间的表面波抑制。

该软表面的表面阻抗为:

$$Z = Z_c \times \frac{Z_L + jZ_c \tan(\beta d)}{Z_c + jZ_L \tan(\beta d)} \quad (1)$$

式中: Z_c 为波纹的特性阻抗; d 为波纹金属壁的高度

($d = \lambda/4$); β 为电磁波的相移常数; Z_L 为加载阻抗。地面加载为短路金属面, 因此 $Z_L = 0$, 可得:

$$Z = jZ_c \tan(\beta d) = jZ_c \tan \frac{\pi}{2} \gg \infty \quad (2)$$

将经典软表面结构进行变形即可得到如图 2 所示的条带型软表面, 此时, 软表面的高度没有了 1/4 波长的限制。经过图中的变形后, 大大降低软表面的剖面高度。之后通过接地圆柱, 即用短路销钉替换金属壁, 将水平波纹软表面变形为平面条带型软表面, 软表面有了用于微带天线间去耦的可能。

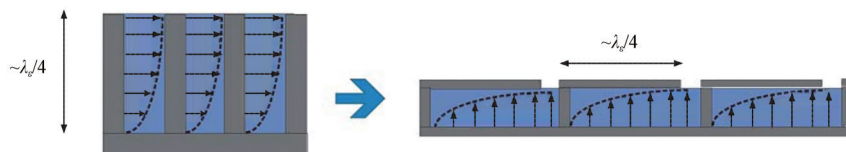


Fig.2 Deformation of classical soft surface structures
图 2 经典软表面结构的变形

对于条带型软表面, 主要有色散模式法和波导传输法两种仿真研究方法^[15]。本文采用波导传输法, 如图 3 所示, 为 3 个周期的条带型软表面。对 3 个周期的条带型软表面进行建模, Z 方向为电壁, Y 方向为磁壁, X 方向为开放边界条件。其中, 条带宽度、条带数量、条带间距、介质层厚度、金属柱间距等变量对条带型软表面带宽的影响在文献[11]中已有详细表述, 此处不再赘述。在其基础上, 本文在每个金属柱顶部增加一个双开口的谐振环, 如图 4 所示。条带宽度为 w , 条带间距为 g , 双开口谐振环的外径为 r_1 , 内径为 r_2 , 开口狭缝为 t , 金属柱高

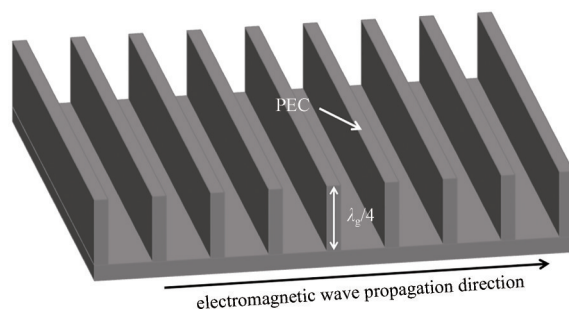


Fig.1 Typical soft surface structure
图 1 经典软表面结构

度为 h ，金属柱半径为 r_0 ，金属柱间距为 p 。理论上，在天线间距一定时，条带型软表面的周期数量越多，其去耦能力越好，但受限于 MIMO 天线间距，软表面的周期数量不能过多，否则将影响天线的辐射性能。故在使用波导传输法时，本文仅仿真 3 个周期数量下的条带型软表面。

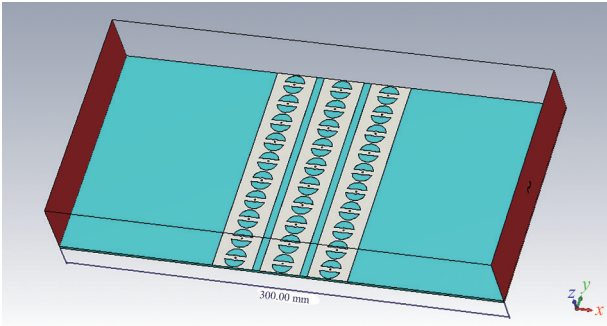


Fig.3 Example of simulation with two waveguide ports
图3 波导传输法仿真示例

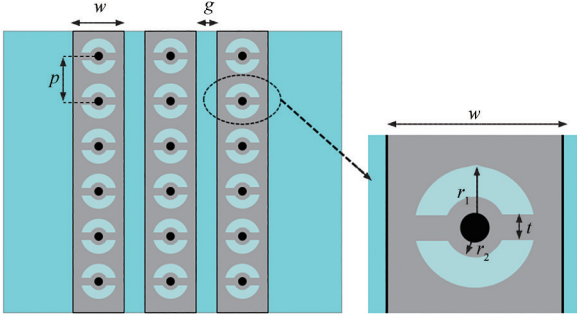


Fig.4 Soft surface with split resonator
图4 加载开口谐振环的软表面

2 仿真结果

提出的软表面几何参数如表 1 所示。其中，介质基板的相对介电常数为 4.3。图 5 为加载开口谐振环前后该软表面工作频带对比示意图。在软表面加载表 1 中尺寸的开口谐振环后，工作带宽几乎未发生变化，而工作中心频率从 2.412 GHz 向低频偏移到 2.176 GHz，降低了 0.236 GHz，实现了对经典条带型软表面的小型化。

表 1 软表面的参数(单位:mm)

Table1 Parameters for soft surface(unit:mm)							
w	g	r_1	r_2	t	h	r_0	p
27.1	5	7	2	1.6	2	0.5	15

图 6 为两种软表面上的电场变化对比示意图，仿真时的频点为软表面工作的谐振点。其中，图 6(a)为未加载开口环的经典条带型软表面上的电场，图 6(b)为加载了开口环的新型条带型软表面。如黑框中所示，图 6(b)中接近端口 2 的地方电场颜色更偏向蓝绿色，而图 6(a)中接近端口 2 的地方电场颜色仍为红色。显然加载有双开口谐振环的软表面上的表面波更难从端口 1 传播到端口 2，表明了提出的新型软表面对表面波的抑制能力更强。

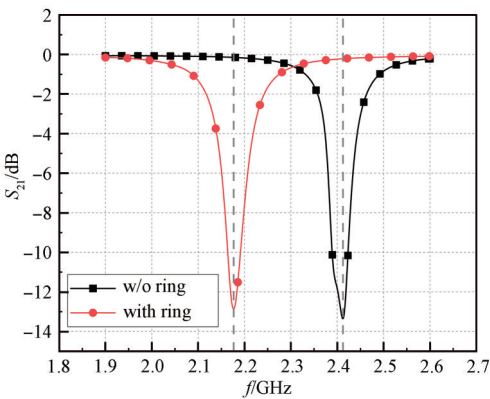


Fig.5 Comparison of S -parameters with and without rings
图5 加载开口环前后 S 参数对比

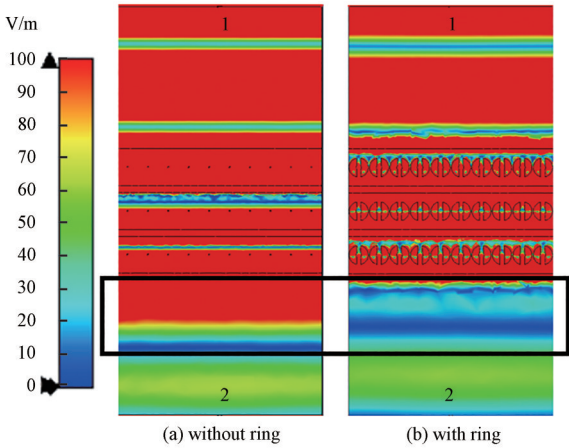
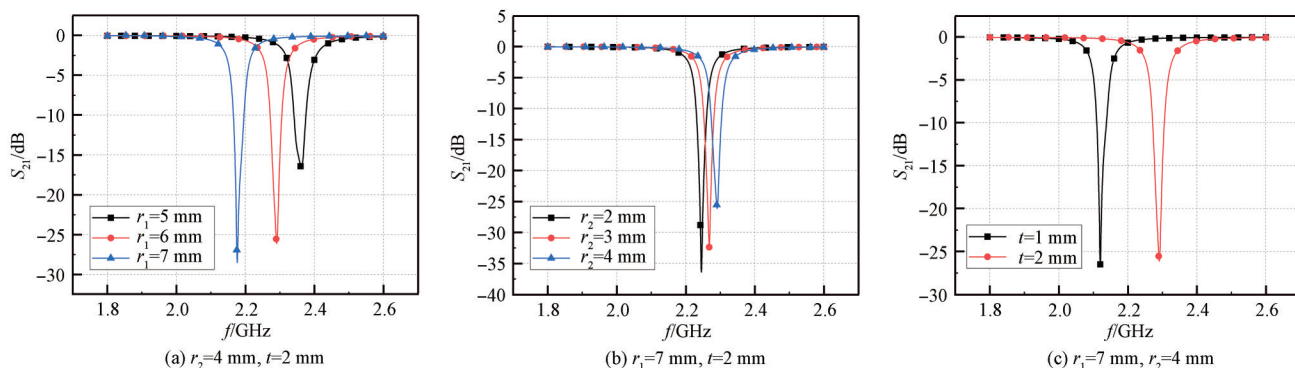


Fig.6 Electric field comparison
图6 电场对比

为表征环外径对软表面工作带宽的影响(此处的环外径 r_1 应小于金属柱间距 p 的一半)，仿真获取了不同环外径下的传输系数，如图 7 所示。由仿真结果可以看出，随着环外径的增大、环内径的减小以及开口宽度的减小，软表面工作的中心频率均向低频移动；且随着工作频带向低频移动， S_{21} 也变得更低，使该软表面在后续天线去耦时拥有更好的解耦能力。本部分研究参数对软表面去耦能力影响的过程中严格遵守控制变量法。

Fig.7 Effect of individual variable on soft surface S -parameters图7 各个变量对软表面 S 参数的影响

3 应用于天线间去耦

将本文设计的软表面加载于微带贴片天线间抑制表面波传播,从而降低天线间的耦合。天线与软表面一体化仿真示意图如图8所示,其中,两天线中心间距为180 mm,共加载了3个周期的软表面,软表面每个周期宽度 w 为27.1 mm,相邻2个软表面的间距 t 为1.6 mm,软表面上的开口环的外径 r_1 为7 mm,内径 r_2 为2 mm。

图9为加载软表面后的天线 S 参数结果。与未加载情况对比,本文设计的软表面可使两微带天线间的耦合在工作带宽内减小7 dB左右。由仿真结果可知,软表面的加入使微带天线的工作频率向高频处略有偏移,但仍在可忍受的范围内。由于时间关系,未能进行更好的优化仿真,但仿真结果仍表明了该软表面在微带天线间的去耦能力和对表面波的抑制能力。

为更有效地说明软表面对互耦的影响,减小两天线间的间距,为120 mm(减小了60 mm),其他参数与图8一致,在此基础上,同时减少一个周期的软表面,仿真结果如图10所示。加载软表面后,天线工作的中心频点偏移到2.152 GHz,在工作频带内,两天线的相互耦合至少降低了7 dB,最多可降低16 dB,在中心频点2.152 GHz处降低了11.65 dB。与图8和图9相比,天线距离减小后,软表面对天线间表面波的抑制能力和降低天线互耦的能力并没有降低,从而验证了本文提出的软表面具有抑制天线间电磁干扰的优异效果。

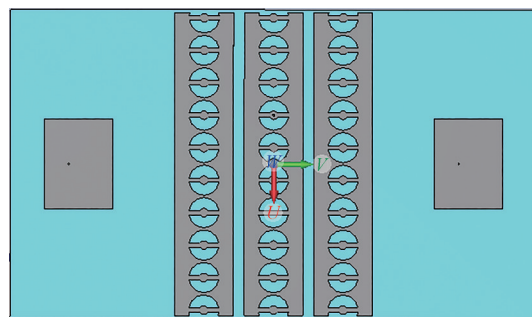


Fig.8 Decoupling of soft surface

图8 软表面去耦

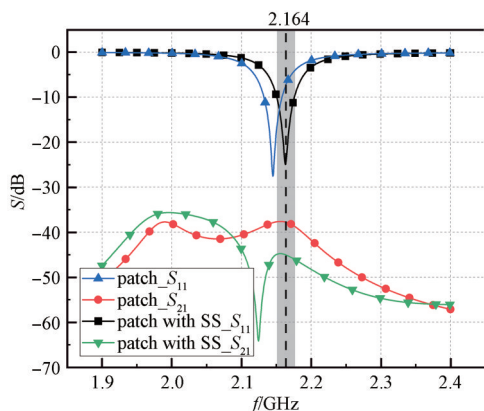


Fig.9 Comparison of decoupling effects

图9 去耦效果对比

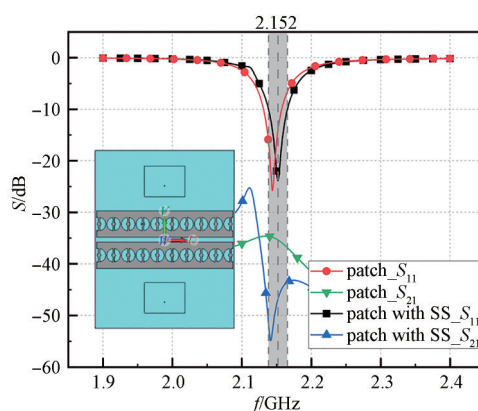


Fig.10 Comparison of decoupling effect when reducing antenna distance

图10 减小天线距离时的去耦效果对比

4 结论

本文通过对经典条带型软表面上加载双开口环使其表面阻抗产生变化,工作频带相比之前向低频偏移了0.236 GHz;通过表面电场变化示意图,表明了本文提出的新型软表面对于表面波的抑制能力更强。最后,本文将提出的新型软表面加载于两微带贴片天线之间进行仿真,结果表明本文提出的新型软表面使两天线耦合降低

了7 dB以上。本文提出的基于小型化软表面的电磁干扰抑制方法，在MIMO天线去耦、阵列天线高隔离度设计等领域具有较好的应用前景。

参考文献：

- [1] 王紫阳. 电磁耦合调控天线技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2018:1-3. (WANG Ziyang. Research on electromagnetic coupling control antenna technology[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2018:1-3.)
- [2] 师伟春, 王宏建. 基于尺寸渐变超表面宽带高增益低剖面天线[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023, 21(8): 1007-1013. (SHI Weichun, WANG Hongjian. Broadband high-gain low-profile antenna based on gradient size metasurface[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023, 21(8): 1007-1013.) doi:10.11805/TKYDA 2021101.
- [3] 沈仕远, 王元圣, 池瑶佳, 等. 基于编码超表面的双向太赫兹多波束调控器件[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021, 19(1): 1-6. (SHEN Shiyuan, WANG Yuansheng, CHI Yaojia, et al. Phase transition material based coding metasurface for two-way terahertz beam steering[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021, 19(1): 1-6.) doi:10.11805/TKYDA 2020090.
- [4] 陈晨, 田丽华. 基于电偶极共振的极化独立宽带吸收超材料[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18(6): 974-978. (CHEN Chen, TIAN Lihua. Polarization-insensitive broadband metamaterial absorber based on electric dipole resonance[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020, 18(6): 974-978.) doi:10.11805/TKYDA 2019307.
- [5] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11): 2075-2084. doi:10.1109/22.798002.
- [6] 许何秀. 超表面电磁调控机理与功能器件应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 3-14. (XU Hexiu. Research on the mechanism of metasurface electromagnetic regulation and the application of functional devices[M]. Beijing: Science Press, 2019: 3-14.)
- [7] 王光明, 蔡通, 梁建刚, 等. 电磁超构表面的设计与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020: 2-15. (WANG Guangming, CAI Tong, LIANG Jiangang, et al. Design and application of electromagnetic super-structured surface[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020: 2-15.)
- [8] KILDAL P S. Artificially soft and hard surfaces in electromagnetics[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1990, 38(10): 1537-1544. doi:10.1109/8.59765.
- [9] RAJO-IGLESIAS E, QUEVEDO-TERUEL Ó, INCLAN-SANCHEZ L. Planar soft surfaces and their application to mutual coupling reduction[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(12): 3852-3859. doi: 10.1109/TAP. 2009. 2024226.
- [10] ABUSHAMLEH S, AL-RIZZO H, KHALEEL H, et al. Enhancement of the strips electromagnetic soft surfaces using ledge edges[C]// Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. Chicago, IL, USA: IEEE, 2012: 1-2. doi: 10.1109/APS.2012.6349211.
- [11] ABUSHAMLEH S A, AL-RIZZO H M, KISHK A A, et al. Miniaturized thin soft surface structure using metallic strips with ledge edges for antenna applications[J]. Progress in Electromagnetics Research B, 2014(57): 221-232. doi:10.2528/PIERB13092601.
- [12] JIN H, CHE W, CHIN K S, et al. 60 GHz LTCC differential-fed patch antenna array with high gain by using soft-surface structures[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 65(1): 206-216. doi:10.1109/TAP.2016.2631078.
- [13] WANG Ziyang, LI Chenglei, YIN Yingzeng. A Meta-surface Antenna Array Decoupling(MAAD) design to improve the isolation performance in a MIMO system[J]. IEEE Access, 2020(8): 61797-61805. doi:10.1109/ACCESS. 2020.2983482.
- [14] BHATTACHARJEE S, MANDAL S, GHOSH C K, et al. Reduction of mutual coupling and cross-polarization of microstrip MIMO antenna using Electromagnetic Soft Surface(EMSS)[J]. Radio Science, 2022, 57(5): 1-10. doi:10.1029/2021RS007377.
- [15] 党晓杰. 人工电磁材料的对称性及计算方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011: 40-43. (DANG Xiaojie. Study on the symmetry of artificial electromagnetic materials and calculation methods[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2011: 40-43)

作者简介：

乔健普(1999-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁干扰抑制技术. email: whocareqiao@163.com.

吴为军(1985-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电磁兼容性设计.

冀航(1978-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为电磁兼容性设计.

曾宪亮(1990-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为电磁兼容性设计.