

文章编号: 2095-4980(2019)04-0616-05

适用于 5G 电磁屏蔽的介质开孔型频率选择表面设计

许留留, 闫丽萍, 赵 翔

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 5G 通信技术的迅速发展和产业化进程给电子设备的电磁屏蔽设计带来了严峻挑战。5G 通信中 24 GHz 以上的电磁波极易通过电子设备屏蔽外壳上的各种孔缝耦合进入电子设备内部, 影响设备的正常工作。针对常规散热孔设计难于适应 5G 通信发展需求, 提出了一种介质开孔型频率选择表面(FSS)结构。该结构在不影响设备通风散热的条件下, 实现对 28 GHz 频段信号的电磁屏蔽。经过全波分析方法仿真, 所设计的 FSS 结构在 28 GHz 频段电磁屏蔽效能(SE)达 30 dB 以上, 带宽大于 2 GHz。无论是 TE 还是 TM 极化电磁波, 在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 入射范围内具有良好的电磁屏蔽稳定性。

关键词: 5G 通信; 电磁屏蔽; 频率选择表面; 通风散热; 性能稳定

中图分类号: TN03

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201904.0616

Design of a Frequency Selective Surface with vent holes through substrate for 5G electromagnetic shielding

XU Liuliu, YAN Liping, ZHAO Xiang

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: The rapid development and industrialization of 5G communication technology has brought big challenges to the electromagnetic shielding design of electronic systems. Electromagnetic waves operating above 24 GHz in 5G communication can easily couple into the electronic systems through various vent apertures/holes on shielding enclosures. It undoubtedly degrades the system performance. To solve this problem, an electromagnetic shielding structure based on Frequency Selective Surface(FSS) with vent holes through substrate is proposed. The proposed FSS structure meets the requirements of electromagnetic shielding at 28 GHz band without affecting the ventilation. The optimally designed FSS structure through a number of full-wave simulations achieves Shielding Effectiveness(SE) greater than 30 dB at 28 GHz with a bandwidth over 2 GHz. Moreover, the proposed FSS-based shielding structure is not sensitive to the TE or TM polarization of electromagnetic wave in the incident angle range from 0° to 60° .

Keywords: 5G communication; electromagnetic shielding; Frequency Selective Surface; ventilation; stable performance

5G 通信技术的迅速发展和产业化进程为电子设备的电磁屏蔽设计带来了严峻挑战。在使用原有 6 GHz 以下频段的基础上, 5G 通信增加了 24 GHz 以上的频段, 如以美国联邦通信委员会为代表的国家已采用 28 GHz 进行实验^[1]。这些高频信号波长接近 1 cm, 很容易通过电子设备金属屏蔽外壳上的孔缝耦合进入电子设备内部, 影响设备的正常工作。Chikando 等采用时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)法对电子设备金属屏蔽外壳上几种常见尺寸的通风孔阵进行了研究^[2], 发现散热孔的截止频率(即在此频率下, 即使增加金属板厚度也无法提高屏蔽效能)与孔径尺寸有关。如工程上常用的孔径为 5 mm 和 4 mm 的散热孔截止频率分别为 30 GHz 和 37.5 GHz。由此可见, 这些散热孔对于 5G 通信高频段信号的电磁屏蔽效能(SE)大大降低, 必须采用新思路设计能够同时满足散热需求和屏蔽 5G 通信高频信号的电磁屏蔽结构。

频率选择表面(FSS)作为一种无限大周期阵列结构, 可以在特定频段反射或透射电磁波, 因此也被称为空间滤波器^[3]。FSS 已用于电磁屏蔽设计^[4-9], 如十字缝隙单元 FSS 结构在广播卫星电视常用的 Ku 波段(12~12.7 GHz)

实现了 10 dB 的电磁屏蔽^[4]。锚形环单元构成的小型化 FSS 用于屏蔽 2.4 GHz 和 5.0 GHz 的 WLAN 信号, 分别在 230 MHz 和 300 MHz 带宽内 SE 达到 20 dB, 且在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 入射角范围内具有良好的稳定性^[5]。由交叉偶极子和金属圆环构成的单层 FSS 实现了 6.5~14 GHz 范围内 20 dB 的屏蔽^[6]。利用矩形金属贴片开缝单元构成的 FSS, 在 2.4~2.483 5 GHz 和 5.15~5.825 GHz 两个频段上 SE 达到 10 dB^[7]。基于纸板构成的 0.55 mm 超薄 FSS 用于屏蔽 930 MHz 和 1 720 MHz 信号, SE 达到 18 dB 的带宽分别为 100 MHz 和 173 MHz^[8]。有源器件加载的 FSS 可实现调谐功能, 其阻带响应频率可以在 0.54~2.50 GHz 之间变化, 且 SE 达到 20 dB 的带宽为 1.28 GHz^[9]。可以看出 FSS 结构在电磁屏蔽领域的应用多围绕通信频段, 其普遍要求是在满足带宽的情况下 SE 尽可能高, 且屏蔽性能对入射角和极化方式不敏感。5G 通信的商用化进程已经开始, 而适用于 28 GHz 频段电磁屏蔽的 FSS 结构鲜有报道, 目前工作在 28 GHz 频段的 FSS 结构主要用于实现 28 GHz 频段带通^[10]或改善手机天线性能^[11]。因此, 研究基于 FSS 结构的适用于 28 GHz 频段且满足通风散热需求的电磁屏蔽结构设计具有重要意义。

本文提出了一种介质开孔型 FSS 结构, 用于屏蔽 28 GHz 频段的 5G 信号。无论电磁波以 TE 或 TM 极化方式入射, 入射角在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围内, 28 GHz 处电磁屏蔽效能大于 30 dB, 且 30 dB 屏蔽带宽大于 2 GHz。相较于传统金属外壳和已有基于 FSS 结构的电磁屏蔽方法, 本文所提的介质开孔型结构在满足电磁屏蔽的同时还满足通风散热需求。该结构不仅可用作电子设备的屏蔽外壳, 也可作为屏蔽隔断直接加载在电子系统中。

1 基于 FSS 的电磁屏蔽结构设计

1.1 常规散射孔的电磁屏蔽效能

为满足 28 GHz 频段电磁屏蔽和通风散热要求, 同时避免散热孔径尺寸过小容易积灰, 削弱电子设备的散热性能, 采用工程上常用的通风孔尺寸 4 mm^[2]。首先分析在金属外壳上周期性开缝和圆孔 2 种情况下 (见图 1) 的 SE。图 1(a) 给出了在厚度为 2.5 mm, 边长 $P=5$ mm 的方形金属单元上开有长 $\times$ 宽 $=a \times b$ 的矩形缝。将该结构作为周期结构单元, 以 P 为周期, 当 a 分别为 3.6 mm, 3.8 mm 和 4 mm, $b=0.35$ mm 时, 其 SE 随频率的变化如图 2(a) 所示。

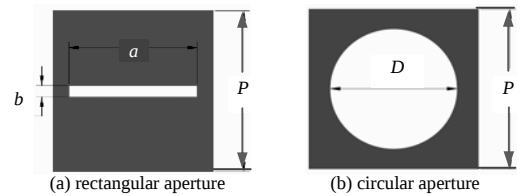


Fig.1 Metal unit with aperture

图1 开孔金属单元

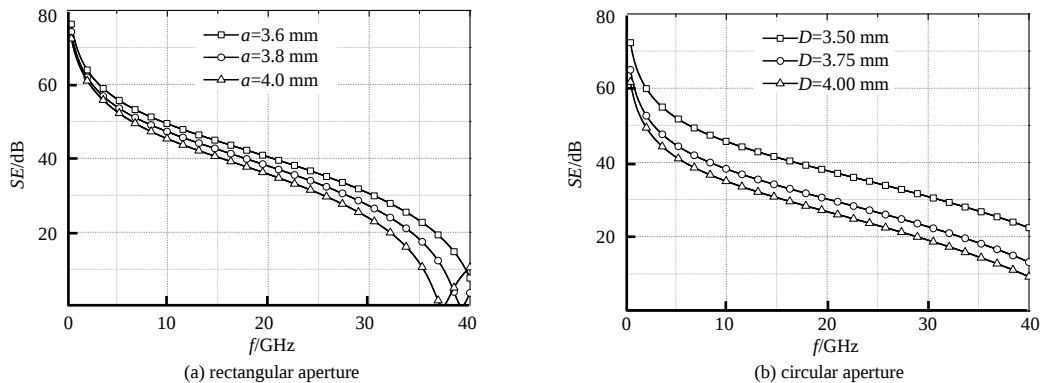


Fig.2 SE of the metal plate

图2 金属板的屏蔽效能

SE 定义为有无屏蔽时空间中同一位置的电场强度之比^[12]:

$$SE = 20 \lg \frac{|E_0|}{|E_s|} \quad (1)$$

式中: SE 表示屏蔽效能; E_0 表示没有屏蔽时空间某个位置的电场值; E_s 则表示屏蔽存在时该位置的电场值。

由图 2(a) 可知, 在 35 GHz 范围内, 随频率增大, 该结构的电磁屏蔽性能逐渐变差, 且在 28 GHz 处 SE 随缝隙长度 a 变大而减小。将矩形散热孔改为图 1(b) 中孔径为 D 的圆形孔, 其他条件不变, 由图 2(b) 可知 SE 随频率和孔径增加同样减小。频率 $f=28$ GHz 处, 矩形孔长度 $a=4$ mm 时, $SE=27.8$ dB, 圆形孔 $D=4$ mm 时, $SE=20.7$ dB, 均小于 30 dB。为能确保通风散热, 提高 28 GHz 处的 SE 到 30 dB 以上, 本文采用 FSS 结构设计电磁屏蔽层。

1.2 FSS 模型设计

散热孔尺寸的限制要求 FSS 单元间距应大于 4 mm。FSS 结构栅瓣出现的频率依赖于入射角度和单元间距, 入

射角度不变时,单元间距越小,栅瓣出现的频率越高^[3],因此单元间距不宜过大,且减小单元间距会降低FSS对极化方式与入射角度的敏感性^[13]。为了开4 mm的通风散热孔,在尽可能减小单元间距的同时留有足够面积支撑金属层,选择在方形介质单元上开圆形孔。已有研究表明,金属圆环构成的FSS结构对入射角度变化更不敏感,且传输特性类似带阻滤波器^[14],如图3所示,因此采用金属圆环作为屏蔽28 GHz频段信号的FSS基本单元结构。

当图3(a)中内半径 $r=2$ mm,线宽 $w=0.13$ mm的金属圆环,安放在厚度为2.5 mm,介电常数 $\epsilon_r=1$ 的介质上,以周期 $a=4.91$ mm构成FSS结构时,根据Floquet端口计算获得的 $|S_{21}|$ 曲线如图4所示。可以看出,该结构在25 GHz处产生谐振,谐振波长与该金属环的周长相对应,符合金属环的谐振理论^[15]。

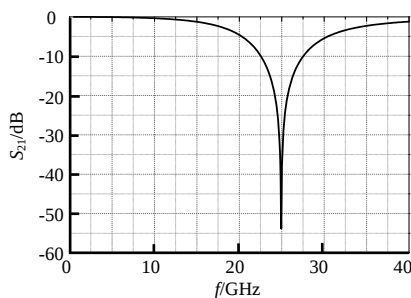


Fig.4 Transmission coefficient of the periodically arranged metal ring
图 4 金属圆环的传输特性曲线

介质基板介电常数增加,会导致该FSS结构的谐振点向低于25 GHz的频率偏移。由于散热孔的限制,金属圆环的最小半径为4 mm。为使介电常数为4.3时FSS结构工作在28 GHz,将该金属圆环均匀分割为4等份。为增强相邻单元的耦合,使得FSS性能对入射角度不敏感,在增加金属带的宽度同时开槽,最终得到如图5所示的FSS结构。

该结构由一块开有柱状孔的方形介质和前后两层金属环构成,厚度为 t 的介质基板采用介电常数为4.3、损耗角正切为0.025的FR-4材料,每层金属环由4个子结构构成,其中 a_1 表示散热孔半径, w 表示金属导带线宽(本结构中,所有金属线宽都相同), l_g 表示2个金属子结构之间的间距, l_s 表示每个金属子结构中内外环金属导带之间的间距, d 表示金属子结构到单元边界的最小间距的2倍,各参数的具体值见表1。

2 结果与分析

采用基于全波分析方法的仿真软件对平面波入射该结构进行大量仿真,分别研究不同极化方式和不同入射角度下 a_1, w, l_g, l_s, d, t 这6个结构参数对电磁屏蔽效能的影响,并最终确定优化结构。在此基础上,给出不同极化方式的平面波以不同角度入射时的电磁SE。

2.1 几何参数对屏蔽效能的影响

对6个结构参数变化对该FSS结构电磁屏蔽效能的影响进行研究,这里仅给出垂直入射情况的计算结果。由于所提结构为对称结构,TE和TM两种极化方式下的电磁屏蔽性能曲线一样,因此下面结果不区分极化方式。在仿真中,每个参数变化时,其他参数取值为表1中的数值。

图6(a)给出了介质开孔半径对SE的影响。参数 a_1 决定了金属环的最小内半径,由图中可以看出,随着 a_1 增大,FSS阻带中心频率向低频偏移。当 a_1 从1.95 mm变化至2.05 mm时,SE=30 dB的带宽变化微小,由3.48 GHz减小为3.31 GHz。这说明开孔半径 a_1 对谐振点影响较大,即对28 GHz处SE起决定性作用,而对带宽的影响较小。

结构参数 w, l_g, l_s, d 分别代表金属线宽或线间距,考虑到一般加工的最小尺寸是4 mil(约为0.127 mm),因此这4个参数取相同的变化范围:0.10 mm至0.20 mm,间距为0.05 mm,并同时仿真0.127 mm时的SE。0.10 mm是目前不能加工到的尺寸精确度,将最小值设定为0.10 mm,是为了方便变化间距设定以及观察该FSS结构可获得

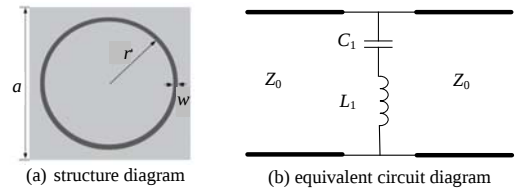


Fig.3 Metal ring structure
图 3 金属圆环结构

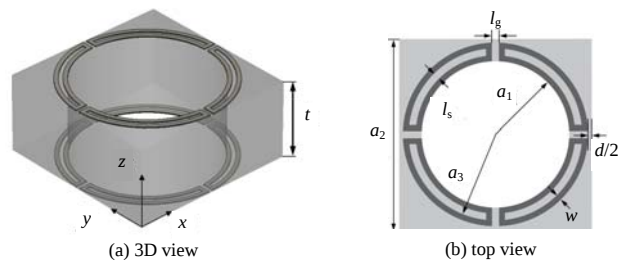


Fig.5 Structure diagram of the unit
图 5 单元的物理结构图

表 1 本文 FSS 结构参数值(单位: mm)

Table1 Parameter values of the proposed FSS(unit:mm)			
parameter	value	parameter	value
a_1	2.000	w	0.127
a_2	4.889	l_g	0.127
a_3	2.254	l_s	0.127
t	2.500	d	0.127

的最优性能,因为 0.127 mm 时的结果可能不是最优值。由图 6(b)可以看出,随着 w 增大,阻带中心频率向低频偏移,且 28 GHz 处的 SE 从 41.4 dB 减小为 31.8 dB,而 $SE=30$ dB 的带宽从 3.28 GHz 增大至 3.73 GHz。这说明金属线宽 w 对中心频率处的 SE 和带宽都有影响,并且在带宽增大时 SE 减小。参数 l_g, l_s, d 为所提 FSS 结构中不同位置的金属线间距。由图 6(c)可以看出,当金属子结构间距 l_g 增大时, FSS 结构的阻带向高频逐渐偏移,且在 l_g 取值介于 0.1~0.127 mm 之间时, 28 GHz 处 SE 最大。同一金属子结构中金属导带间距 l_s 的增大将导致阻带向低频偏移(见图 6(d)),且谐振点的 SE 从 41.4 dB 减小至 31.1 dB。而参数 d 的增大对 28 GHz 处的 SE 影响较小(见图 6(e))。这 3 个结构参数 l_g, l_s, d 的变化对 $SE=30$ dB 带宽的影响基本相同,即间距增大时带宽略有减小,分别从 3.45 GHz, 3.45 GHz 和 3.48 GHz 减小至 3.28 GHz, 3.23 GHz 和 3.17 GHz。

由于介质板需要开孔以确保散热,因此其厚度不能太薄以免机械性能差,如果太厚则影响其在系统中的安装。本文研究了 $t=2.1$ mm, 2.3 mm, 2.5 mm 时 FSS 结构的 SE 变化,如图 6(f)所示。可以看出,随着厚度 t 增大,阻带谐振频率基本不变,而 28 GHz 处的 SE 从 35.4 dB 增大到 39.9 dB, $SE=30$ dB 的带宽从 3.14 GHz 增大为 3.38 GHz。这表明一定程度上增加介质板厚度对增大 SE 和带宽有积极作用。

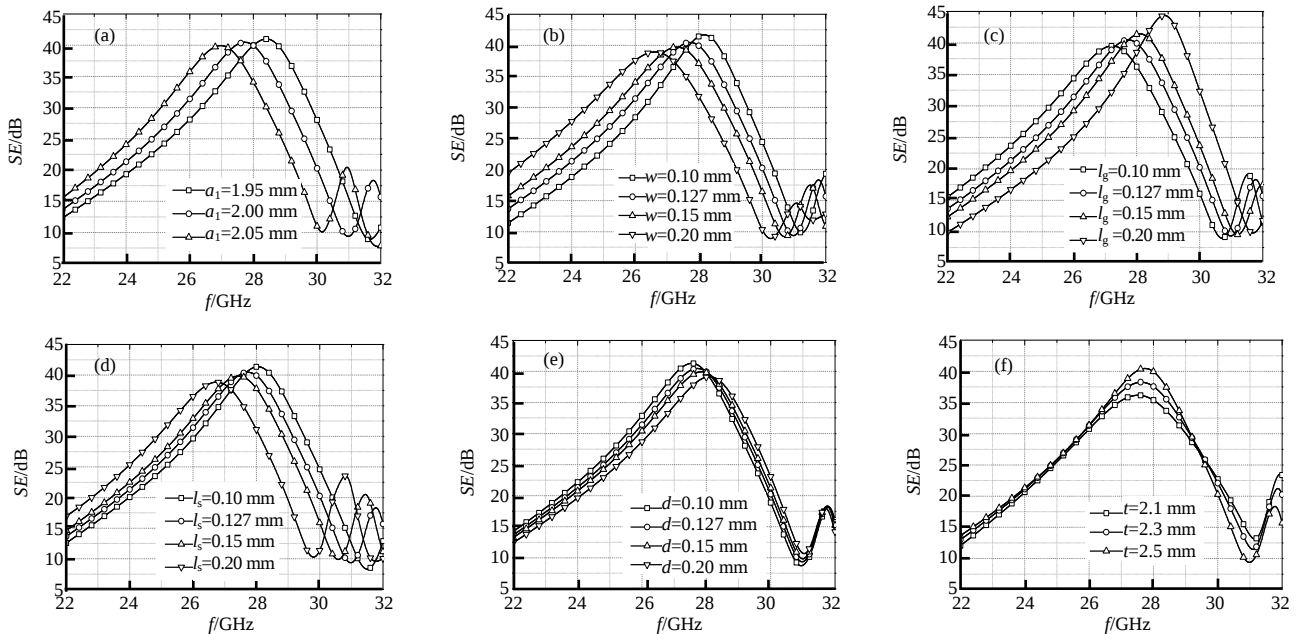


Fig.6 Effects of parameters on the Shielding Effectiveness

图 6 每种参量变化对电磁屏蔽效能的影响

2.2 入射角和极化方式对屏蔽效能的影响

在经过大量仿真计算确定 FSS 结构参数优化取值(见表 1)的基础上,分析计算了不同极化方式平面波以不同角度入射到该 FSS 结构时的电磁屏蔽效能,结果如图 7 所示。可以看出无论电磁波是以 TE 极化还是 TM 极化方式入射,当入射角不大于 60° 时, 28 GHz 处的 SE 大于 30 dB,且 $SE=30$ dB 的带宽大于 2 GHz。当入射角大于 60° ,以 TM 极化方式入射时 SE 达到 30 dB 的带宽会变得很小,需慎重使用本结构。

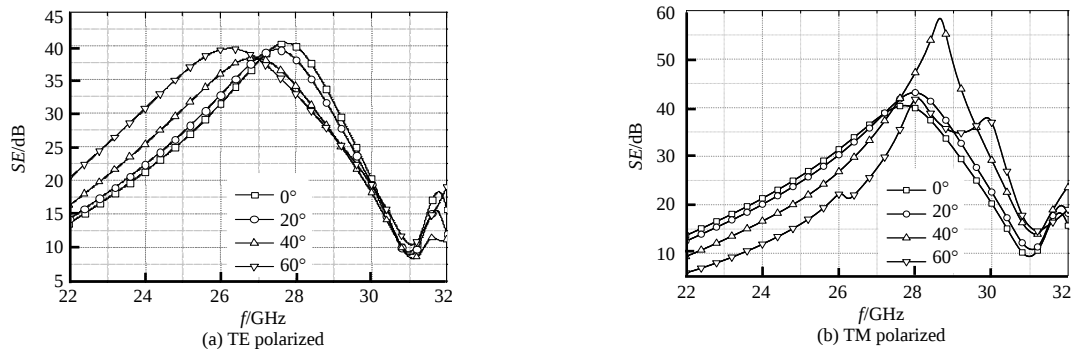


Fig.7 Effect of incident angle on Shielding Effectiveness for different polarizations

图 7 不同极化方式下入射角度对电磁屏蔽效能的影响

3 结论

本文针对常规散热孔的电磁兼容问题,提出了一种介质开孔型频率选择表面结构,解决了散热和电磁屏蔽的矛盾。尽管相比于金属开孔屏蔽结构在机械性能上有一定欠缺,但在确保不影响通风散热条件下,实现了对 5G 通信中 28 GHz 频段信号的良好电磁屏蔽,这对电子设备电磁屏蔽方案设计具有一定参考意义。

参考文献:

- [1] 王坦,何天琦. 5G 毫米波焦点频段(26 GHz)全球研究动态与展望[J]. 电讯技术, 2018,58(3):356–362. (WANG Tan, HE Tianqi. Global research trends and prospects of 5G hotspot millimeter wave frequency band(26 GHz)[J]. Telecommunication Engineering, 2018,58(3):356–362.)
- [2] CHIKANDO E, BODETTE E, CONNOR S, et al. Vent hole size analysis for high-frequency systems chassis design[C]// IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Fort Lauderdale: IEEE, 2010: 813–818.
- [3] MUNK B A. Frequency Selective Surfaces: theory and design[M]. New York: Wiley, 2000.
- [4] SIVASAMY R, MOORTHY B, KANAGASABAI M, et al. A wideband frequency tunable FSS for electromagnetic shielding applications[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018,60(1):280–283.
- [5] YAN M, QU S, WANG J, et al. A miniaturized dual-band FSS with stable resonance frequencies of 2.4 GHz/5 GHz for WLAN applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014(13):895–898.
- [6] SYED I S, RANGA Y, MATEKOVITS L, et al. A single-layer Frequency Selective Surface for ultrawideband electromagnetic shielding[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014,56(6):1404–1411.
- [7] SILVA S F C G, CAMPOS A L P S. Compact frequency selective surface with dual band response for WLAN applications[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2015,57(2):265–268.
- [8] SIVASAMY R, MURUGASAMY L, KANAGASABAI M, et al. A low-profile paper substrate-based dual-band FSS for GSM shielding[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016,58(2):611–614.
- [9] GHOSH S, SRIVASTAVA K V. Broadband polarization-insensitive tunable Frequency Selective Surface for wideband shielding[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018,60(1):166–172.
- [10] LI D, LI T, LI E, et al. A 2.5-D angularly stable Frequency Selective Surface using via-based structure for 5G EMI shielding[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018,60(3):768–775.
- [11] MOLOGNI J F, RIBAS J C, SODRE A C, et al. Investigation on the deployment of FSS as electromagnetic shielding for 5G devices[C]// 2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference(IMOC). Aguas de Lindoia: IEEE, 2017: 1–5.
- [12] SHUBITIDZE P. Numerical study of the coupling of transient fields of ESD into a cavity[C]// Proceedings of III International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory. Tbilisi, Georgia: IEEE, 1998: 108–110.
- [13] 王海峰, 庄光磊. 应用于 GSM1800 屏蔽的小型化频率选择表面设计[J]. 遥测遥控, 2015,36(2):61–64. (WANG Haifeng, ZHUANG Guanglei. Miniaturized frequency selective surface for GSM1800 applications[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2015,36(2):61–64.)
- [14] RAMEZANI VARKANI A, HOSSEIN FIROUZEH Z, ZEIDAABADI NEZHAD A. Equivalent circuit model for array of circular loop FSS structures at oblique angles of incidence[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2018,12(5):749–755.
- [15] 刘小明, 俞俊生, 陈晓东. 太赫兹波段频率选择表面的设计与测试[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(6):853–858. (LIU Xiaoming, YU Junsheng, CHEN Xiaodong. Design and measurement of terahertz Frequency Selective Surface[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(6):853–858.)

作者简介:



许留留(1994–), 男, 南京市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为频率选择表面在电磁兼容设计中的应用. email: 18782091460@163.com.

闫丽萍(1972–), 女, 河北省张家口市人, 教授, 主要研究方向为电磁兼容建模与分析、电磁环境效应评估、电磁场数值计算、统计电磁学等。

赵翔(1973–), 女, 四川省西昌市人, 教授, 主要研究方向为电磁兼容建模与分析、电磁环境效应评估、统计电磁学、电磁场数值计算等。