

·高功率微波技术·



频率选择表面结构的电子系统 K/Ka 波段电磁屏蔽分析

沈 宁, 闫丽萍, 谷智渊, 赵 翔

(四川大学 电子信息学院, 成都 610065)

摘 要: 电子设备和无线技术不断向 K/Ka 波段发展以及电子系统集成度的不断提高给电子系统的电磁屏蔽设计带来了严峻挑战。提出一种将频率选择表面(FSS)用于电子系统屏蔽的新方法,可以替代传统散热孔阵,在满足通风散热性能的同时确保电子系统在 5G 毫米波段的电磁屏蔽性能。基于金属腔中心点屏蔽效能和全局屏蔽效能,分析了 FSS 孔阵排布方式、电磁波极化与入射角度对金属外壳电磁屏蔽效能(SE)的影响。结果表明:FSS 孔阵排布方式对金属腔屏蔽性能的影响较小,并且 SE 不受入射电磁波极化方式影响;含 FSS 通风孔阵的金属外壳在 23.0~25.5 GHz 范围内屏蔽效能约为 30 dB,比含传统散热孔阵金属腔屏蔽效能提高 15 dB。

关键词: 金属腔; 5G 毫米波; 频率选择表面; 通风孔阵; 屏蔽效能

中图分类号: O441.4

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210043

Electromagnetic shielding analysis of electronic systems containing frequency selective surface structure in K/Ka band

Shen Ning, Yan Liping, Gu Zhiyuan, Zhao Xiang

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

Abstract: The frequency continuous extension to K/Ka band for electronic devices and wireless technology, as well as the fast development of integrated electronic system have made the electromagnetic shielding design of electronic systems increasingly challenging. In this paper, a new shielding method which incorporates frequency selective surface (FSS) into electronic systems to replace the conventional heat dissipation holes array is proposed. The proposed shielding method can meet the requirements of both ventilation and electromagnetic shielding performance at 5G millimeter wave band. Based on the shielding effectiveness (SE) at the center point in the enclosure and the global shielding effectiveness, the influences of the arrangement of FSS cells and the polarization and incident angle of electromagnetic waves on SEs of the metallic enclosure are analyzed. The results show that the arrangement of FSS cells have little effects on the shielding performance of the metallic enclosure, and SE hardly changes with the polarization of the electromagnetic waves. The shielding effectiveness of the metallic enclosure with the FSS is about 30 dB in the frequency range of 23.0–25.5 GHz, which is 15 dB higher than that of the enclosure with the conventional heat dissipation holes array. This demonstrates that the method proposed in this paper has better electromagnetic shielding while keep good ventilation at the same time.

Key words: metallic enclosure; 5G millimeter wave; frequency selective surface; vent holes array; shielding effectiveness

电磁屏蔽技术是提高电子系统电磁兼容性的主要措施之一。通常使用金属外壳将潜在的干扰源或敏感设备隔离起来,以减少电磁波的传输和泄漏,从而起到电磁屏蔽作用^[1-2]。然而由于通风散热、线缆连接等需求,电子设备的金属屏蔽外壳上不可避免地开有各种孔缝。外界电磁波可以通过这些孔缝耦合进入电子系统产生干扰,导致电子系统或设备性能下降甚至损毁。关于开孔金属腔体的屏蔽性能,研究人员已经开展了大量工作,例如,孔的数量、形状等对金属屏蔽腔屏蔽效能的影响以及提高金属腔屏蔽效能的方法等^[3-7],这些研究对于电子系统的电磁防

* 收稿日期:2021-02-04; 修订日期:2021-05-07

基金项目:国家自然科学基金项目(61877041);成都市科技项目(2020-GH02-00061-HZ)

作者简介:沈 宁(1997—),女,硕士研究生,主要从事电磁屏蔽和计算电磁学方面的研究。

通信作者:闫丽萍(1972—),女,教授,主要从事电磁兼容建模分析与电磁环境效应评估方面的研究。

护具有重要参考意义。然而随着信息通信系统工作频率的不断提高^[8]和无线技术对 5G 毫米波段的使用^[9],电磁波长与散热孔径几乎同数量级,因此更易耦合进入电子系统内部产生干扰,导致开有通风散热孔的金属外壳屏蔽性能大大下降甚至丧失。另一方面,高速电子设备的集成度越来越高导致其对电磁环境更为敏感。因此,迫切需要提出一种既能保证通风散热又能有效提高 5G 毫米波段金属腔屏蔽效能的方法。

频率选择表面(FSS)因其可以有效控制电磁波的反射和传输特性,为该问题的解决提供了一条可行途径。近年来频率选择表面(FSS)结构作为空间滤波器已被广泛应用于电磁屏蔽领域^[10-13],但这些研究多注重于 FSS 结构的设计,很少考虑 FSS 结构应用于电子系统金属屏蔽外壳后的屏蔽性能。因此本文用 FSS 结构替代传统通风散热孔阵应用于金属屏蔽腔以提高 5G 毫米波段的电磁屏蔽效能,并研究了 FSS 结构不同布局方案对金属腔屏蔽效能(SE)的影响。

1 FSS 单元结构和 SE 评估方法

1.1 FSS 单元结构

为了既能保持良好的通风效果,又能有效提高电子系统的电磁屏蔽性能,这里采用如图 1 所示的开有通风散热孔的 FSS 单元结构^[14]。该结构在厚度为 t 的方形介质中央开有半径 $r=2\text{ mm}$ 的圆柱型散热孔,四条中间开槽的金属导带环绕该孔。介质基底采用相对介电常数为 4.3、损耗正切为 0.025 的 FR-4 材料。图 1 中各结构参数的具体取值和该 FSS 结构在不同入射角度不同极化方式下的电磁屏蔽效能详见文献 [14]。该 FSS 结构在 24~30 GHz 频率范围内电磁波垂直入射时的电磁屏蔽效能可达到 20 dB。本文将使用由上述单元周期性排列构成的 FSS 孔阵结构替代传统通风孔阵用于金属屏蔽外壳,以提高毫米波段金属外壳的电磁屏蔽效能。

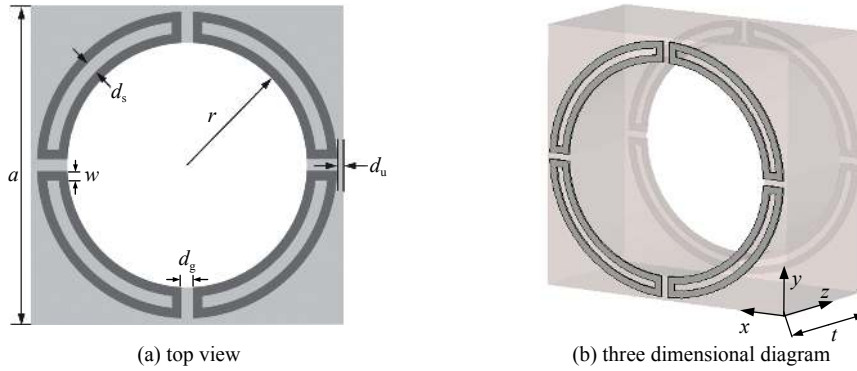


Fig. 1 Structure of the FSS unit cell

图 1 FSS 的单元结构

1.2 电磁屏蔽效能 (SE) 评估方法

传统电磁屏蔽效能定义为在没有屏蔽外壳和有屏蔽外壳两种情况下,空间中同一位置(通常为屏蔽外壳的中心点)电场或磁场的比值,即

$$SE = 20 \lg \frac{|E_0|}{|E|} \text{ (dB)} \quad (1)$$

式中: $|E_0|$ 和 $|E|$ 分别为没有屏蔽外壳和有屏蔽外壳时的电场模值。

然而当敏感电子元件不在屏蔽外壳的中心位置时,采用中心点的 SE(CSE)将难以准确、全面地反映整个外壳的屏蔽性能,因此本文在 CSE 计算基础上,同时采用了全局屏蔽效能(GSE)来评估屏蔽外壳的屏蔽性能^[15]。GSE 表示在没有屏蔽外壳和有屏蔽外壳时电场或磁场能量的比值,即

$$GSE = 20 \lg \frac{\int_{V_{enc}} |E_0| dV}{\int_{V_{enc}} |E| dV} \text{ (dB)} \quad (2)$$

式中: V_{enc} 为屏蔽外壳的体积。

由于在仿真计算中,腔内部为均匀网格剖分,且入射波为均匀平面波,则 GSE 为有无屏蔽腔时腔内部所有网格上电场均值之比。相比于腔体中心点的屏蔽效能 CSE, GSE 代表了腔内屏蔽效能的平均水平,更具合理性。考虑到计算成本,本文只计算了 22, 24, 26, 28 和 30 GHz 这 5 个频点处的 GSE。

2 含 FSS 结构的金属腔 SE 分析

将前文所提的 FSS 结构替代传统散热孔阵用于金属屏蔽外壳,通过分别计算含 FSS 结构和含传统散热孔阵金属腔的 SE,对比说明将传统通风散热孔替换为工作在 24~30 GHz 的带阻 FSS 结构,可以有效提高金属外壳的屏蔽性能。计算中,传统散热孔孔径与 FSS 结构孔径相同,且以相同周期排布在金属腔壁上。FSS 结构/通风散热孔阵总面积的大小(即单元或散热孔的数量)决定了其屏蔽效能和通风散热能力,因此,本文分别从孔阵所占腔壁的比例(R_{VS})、孔阵的长宽比(R_{LW})、孔阵所处腔壁的位置以及平面波的入射方式四个方面分析了含 FSS 结构的金属腔屏蔽效能。

2.1 含 FSS 金属腔与传统散热孔阵金属腔 SE 对比

计算模型如图 2 所示,尺寸为 $W \times H \times L = 300 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的金属腔由理想导体构成,正面包由 27×11 个单元构成的 FSS 散热孔阵。入射平面波的方位角为 ϕ ,俯仰角为 θ ,极化角为 α 。基于全波分析法计算了水平极化($\alpha = \pi/2$)电磁波垂直入射时腔体中心点的屏蔽效能 CSE,并与传统散热孔阵金属腔屏蔽效能进行比较,同时根据公式(2)得到在 22, 24, 26, 28, 30 GHz 这 5 个频点下金属腔的全局屏蔽效能 GSE,结果分别如图 3 和表 1 所示。注意,在计算中传统散热孔阵和 FSS 孔阵在金属腔壁上的位置以及它们的面积均保持一致。

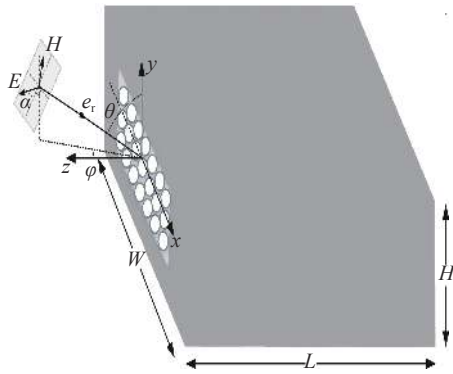


Fig. 2 Calculation model of an enclosure with FSS panel

图 2 含 FSS 结构的金属腔计算模型

由于所用金属腔在 22~30 GHz 频段范围内为电大腔,其模式数密度从 22 GHz 时的 2722 个/GHz 增长为 30 GHz 时的 4619 个/GHz,因此腔内的场分布相对于谐振腔较为均匀,SE 随频率变化的整体趋势较为平缓,正如图 3 结果所示,这也与文献 [16] 中电大腔 SE 随频率变化的情况相一致。但由于在电大腔数值计算过程中腔内场完全衰减为零将导致海量的计算时间,出于计算成本的考虑,所得 SE 结果与理想值之间会存在微小的差距,但整体变化趋势基本一致。

由图 3 可以看出,采用 FSS 结构的金属腔相比于传统散热孔阵金属腔,其 CSE 在 22~26.3 GHz 范围内明显提升了约 15 dB,在 23~25.5 GHz 频段内达到 30 dB 左右,当频率高于 28 GHz 后,含 FSS 腔体的 CSE 略低于传统散热孔阵金属腔。与文献 [14] 中无限大 FSS 结构相比,安装有有限个相同 FSS 单元金属腔的 $SE \geq 30 \text{ dB}$ 频段有所降低。这表明 FSS 结构应用在金属腔上仍能提供较好的屏蔽特性,但屏蔽频段因金属腔的加载而发生偏移。从表 1 给出的 5 个频点下腔体的全局屏蔽效能 GSE 可以看出,含 FSS 结构的腔体 GSE 在 22, 24, 26 GHz 频点都高于传统开孔金属腔的 GSE,与 CSE 结果基本一致。由于 GSE 反映的是腔体内部的平均屏蔽效能,因此进一步证明了采用 FSS 结构可以在确保通风散热能力不变的情况下提高金属腔的屏蔽性能。需要注意的是,当频率高于 28 GHz 后,含 FSS 结构腔体的 GSE 明显低于传统散热孔阵金属腔,这是由于原 FSS 结构的阻带范围因金属腔加载向低频偏移导致的。

2.2 孔阵相对腔壁面积占比对 SE 的影响

FSS 结构的面积将影响金属腔的通风散热能力,为了探究孔阵占腔壁的比例对屏蔽性能的影响,这里定义面

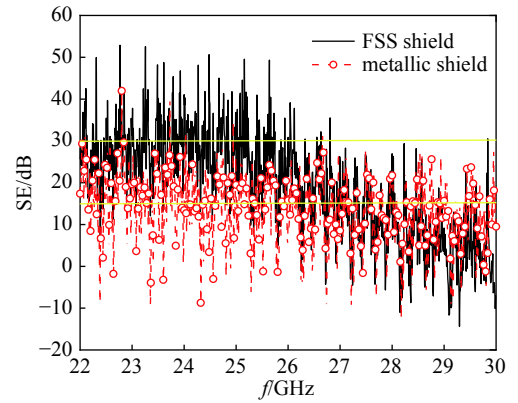


Fig. 3 Comparison of CSE between enclosure with FSS and conventional metallic enclosure

图 3 含 FSS 金属腔与传统金属腔 CSE 对比

表 1 含 FSS 金属腔与传统金属腔 GSE 对比

Table 1 Comparison of GSE between the enclosure with FSS and the conventional metallic enclosure

f/GHz	$GSE_{\text{FSS}}/\text{dB}$	$GSE_{\text{PEC}}/\text{dB}$
22	25.04	23.04
24	31.41	13.57
26	28.98	13.67
28	16.77	20.44
30	5.36	16.52

积占比(R_{VS})为 FSS 结构面积与其所在腔壁面积之比。分别计算了 $R_{VS}=20\%$ (27×11 个单元)、 $R_{VS}=40\%$ (40×15 个单元)、 $R_{VS}=60\%$ (47×19 个单元)和 $R_{VS}=80\%$ (54×22 个单元)四种情况的 SE, 并与同等情况下含传统散热孔阵的金属腔 SE 进行对比。其他计算参数同 2.1 节, 计算结果如图 4 所示。

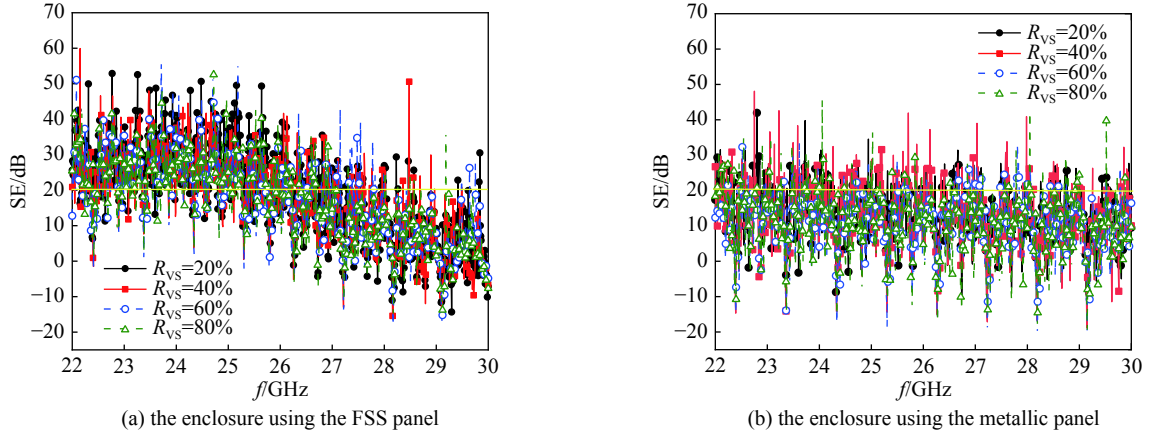


Fig. 4 Comparison of CSE between enclosure with FSS and conventional metallic enclosure under four R_{VS} conditions

图 4 四种 R_{VS} 情况下含 FSS 金属腔与传统金属腔的 CSE 对比

由图 4(a)和(b)可知, 四种不同占比情况下, 含 FSS 结构金属腔和传统散热孔阵金属腔的 CSE 随频率变化趋势均基本一致, 且总体而言 CSE 随 R_{VS} 的升高变化不大, 同等情况下含 FSS 结构金属腔的 CSE 在 22.5~25.5 GHz 频段内相较于传统金属腔高约 15 dB, 当频率升高至 28 GHz 后, 超过了 FSS 结构在金属腔上表现阻带特性的频段范围, 此时电磁波透射介质板的能力增强, 导致含 FSS 结构金属腔的屏蔽效能接近并略低于传统金属腔。

表 2 给出了 22, 24, 26, 28, 30 GHz 这 5 个频点处两种金属腔的全局屏蔽效能 GSE。可以看出, 含 FSS 结构的腔体在四种占比情况下的 GSE 随频率变化趋势一致, 均在 24 GHz 时达到最大 ($GSE > 30$ dB), 而在 28 GHz 和 30 GHz 处, 含 FSS 结构金属腔 GSE 低于传统散热孔阵金属腔 GSE, 产生这种现象的原因同前。值得注意的是, 当 $f=26$ GHz 时, $R_{VS}=60\%$ 和 80% 时的 SE 较 $R_{VS}=20\%$ 和 40% 时降低 10 dB 左右, 这也反映了在 FSS 孔阵占比的增加过程中金属腔的频率敏感性。但总的来说, FSS 孔阵占比对金属腔 SE 影响相对较小, 在 22~26 GHz 频段下含 FSS 的金属腔屏蔽效能均高于含传统散热孔阵的金属腔屏蔽效能。这进一步说明了 FSS 结构在保持通风散热能力的同时, 可以提高金属腔的电磁屏蔽效能。

表 2 四种 R_{VS} 情况下含 FSS 金属腔与传统金属腔体的 GSE 对比

Table 2 Comparison of GSE between enclosure with FSS and conventional metallic enclosure under four R_{VS} conditions

f/GHz	GSE/dB							
	$R_{VS}=20\%$		$R_{VS}=40\%$		$R_{VS}=60\%$		$R_{VS}=80\%$	
	FSS	PEC	FSS	PEC	FSS	PEC	FSS	PEC
22	25.04	23.04	20.23	18.86	18.26	19.17	27.38	17.54
24	31.41	13.57	30.77	17.68	31.73	13.9	33.66	18.46
26	28.98	13.67	30.29	11.17	19.35	15.21	15.19	7.73
28	16.77	20.44	7.99	19.78	13.01	19.38	13.44	15.69
30	5.36	16.52	1.70	17.24	0.63	17.1	-0.20	16.42

2.3 孔阵长宽比 (R_{LW}) 对 SE 的影响

为了探究 FSS 单元排布方式对屏蔽效能的影响, 保持 FSS 结构孔阵的总面积不变, 改变孔阵的长宽比研究 SE 的变化。上节分析结果表明 FSS 结构面积占比对 SE 随频率的变化相对影响不大, 考虑到计算成本, 这里以 $R_{VS}=20\%$ 时的模型为例, 分别计算了四种不同长宽比: $R_{LW}=1.0$ (17×17 个单元), $R_{LW}=1.5$ (21×14 个单元), $R_{LW}=2.0$ (25×12 个单元), $R_{LW}=2.5$ (27×11 个单元)时的 SE, 结果如图 5 所示, 相应的 GSE 见表 3。

由图 5 可以看出, FSS 孔阵长宽比对腔体中心点屏蔽效能的影响微乎其微。而表 3 中的 GSE 值在整个频段下与 CSE 变化趋势基本一致, 屏蔽大小也相差不大。这与其 FSS 结构的周期性有着密切关系, 当 FSS 孔阵已满足周期排列时, 长边和宽边上的 FSS 单元个数在小范围内的变化对其屏蔽特性的影响很小。因此, 在通风散热孔阵面积相同

的情况下,不同 R_{LW} 的 FSS 阵列加载下的金属腔屏蔽性能差别不大,在 23~25.3 GHz 频段范围内 $SE \geq 30$ dB,在 28~30 GHz 频段内 SE 约为 10 dB。

2.4 FSS 结构在腔壁的位置对 SE 的影响

在上述分析中,FSS 结构均位于腔壁中心区域,而实际应用中散热孔阵根据需求分布在腔壁的不同位置处,故本节以 $R_{VS}=20\%$ (21×14 个 FSS 单元)时的情况为例,分别计算了图 6 所示四种情况下的腔体屏蔽效能,其中腔体中心点(见图 6(c)中 P 点)的屏蔽效能如图 7(a)所示,孔阵面所对应中心点(见图 6(c)中 P_1 点)的屏蔽效能如图 7(b)所示,腔体的全局屏蔽效能如表 4 所示。

从图 7(a)中可以看出,当 FSS 结构位于腔壁的左侧(图 6(c)(d))时,腔体中心点(P 点)的 SE 相比其位于中部(图 6(a)(b))时偏高;而由图 7(b)中的结果可知,四种不同孔阵分布时的 P_1 点 SE 几乎无差别。但在 22~26 GHz 范围内, P 点 SE 几乎稳定在 30 dB 附近;而 P_1 点 SE 在 23~24 GHz 范围内约为 35 dB,在 25.5~26 GHz 约为 25 dB,

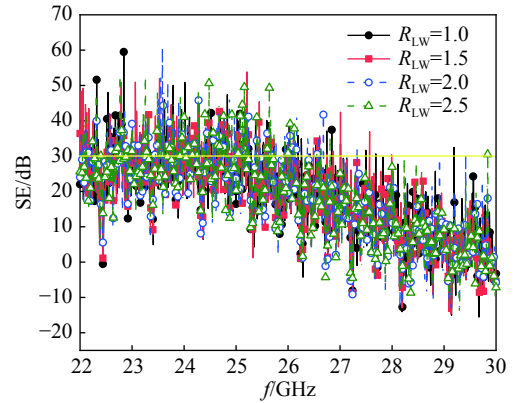


Fig. 5 Comparison of CSE for the metallic enclosure with four different R_{LW} of FSS

图 5 四种不同 FSS 孔阵长宽比下金属腔 CSE 对比

表 3 四种不同 FSS 孔阵长宽比下金属腔的 GSE 对比

Table 3 Comparison of GSE for the metallic enclosure with four different R_{LW} of FSS

f/GHz	GSE/dB			
	$R_{LW}=1.0$	$R_{LW}=1.5$	$R_{LW}=2.0$	$R_{LW}=2.5$
22	32.02	22.83	24.34	25.04
24	34.18	35.33	33.55	31.41
26	27.13	27.84	24.65	28.98
28	13.41	15.15	13.95	16.77
30	2.82	5.3	3.99	5.36

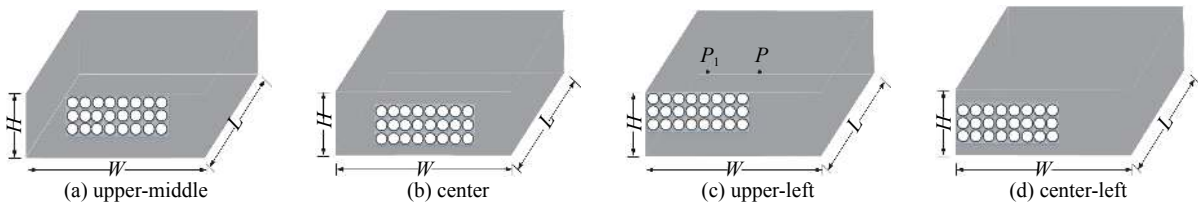


Fig. 6 Four kinds of positions distribution of the vent hole array on the enclosure surface

图 6 孔阵在腔壁的四种位置分布

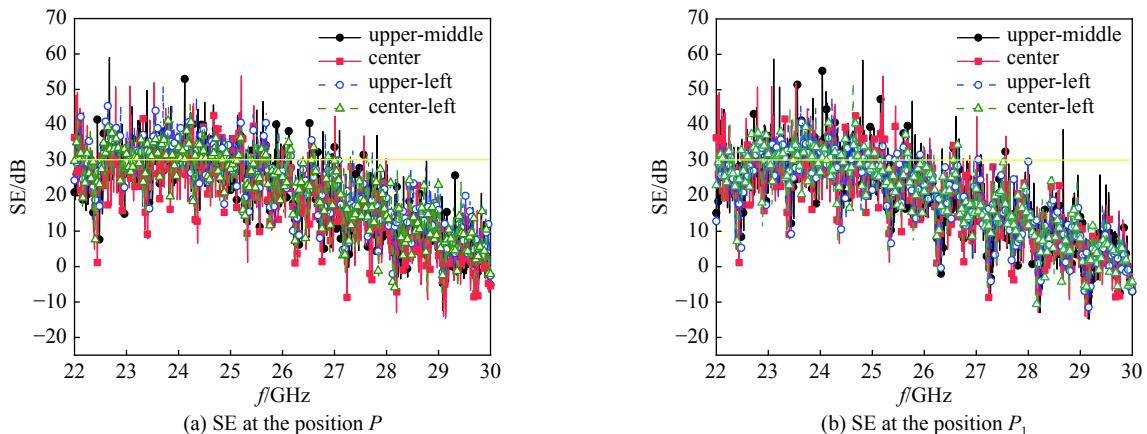


Fig. 7 Comparison of shielding effectiveness for different positions of FSS panel

图 7 孔阵位于腔壁不同位置时屏蔽效能的比较

表 4 孔阵位于腔壁不同位置时的全局屏蔽效能

Table 4 Global shielding effectiveness of the enclosure for different positions of FSS panel

f/GHz	GSE/dB			
	upper-middle	center	upper-left	center-left
22	14.77	22.83	13.35	21.22
24	32.34	35.33	33.45	34.39
26	26.32	27.84	23.09	27.53
28	12.92	15.15	13.84	17.82
30	3.78	5.30	2.43	3.93

呈现出一定的波动性。从表 4 展示的腔体全局屏蔽效能 GSE 可以看出, 除 22 GHz 频点外, 四种布局下的 GSE 值基本一致。总的来说, 无论 FSS 孔阵处于腔壁的哪个位置, 耦合进腔体内的电磁能量相差不大, 观测点(P 点)相对于孔阵方位的不同会影响观测点处 SE 的变化。所以在电子系统屏蔽外壳的设计中应考虑将 FSS 孔阵放在远离敏感工作器件的位置上, 这样可以既保证通风散热, 又可降低敏感器件处的干扰场。

2.5 平面波入射角度与极化方式对 SE 的影响

考虑到屏蔽腔受到的电磁干扰可能来自不同方向, 这里分别计算了含 FSS 结构的金属腔和含传统散热孔阵金属腔两种结构在不同极化方式的电磁波垂直入射、和相同极化方式电磁波以不同角度入射时的屏蔽效能。仍以 $R_{VS}=20\%$ (21×14 个单元) 时的模型为研究对象, 首先保持方位角 $\varphi=0$ 和俯仰角 $\theta=\pi/2$ 不变, 改变平面波的极化角由 $\alpha=\pi/2$ (水平极化波) 到 $\alpha=0$ (垂直极化波), 计算得 SE 如图 8 所示。可以看出, 改变电磁波的极化方式对上述两种金属腔的屏蔽效能几乎没有影响, 这是由于 FSS 结构与圆形散热孔本身均为对称结构, 具有较好的极化稳定

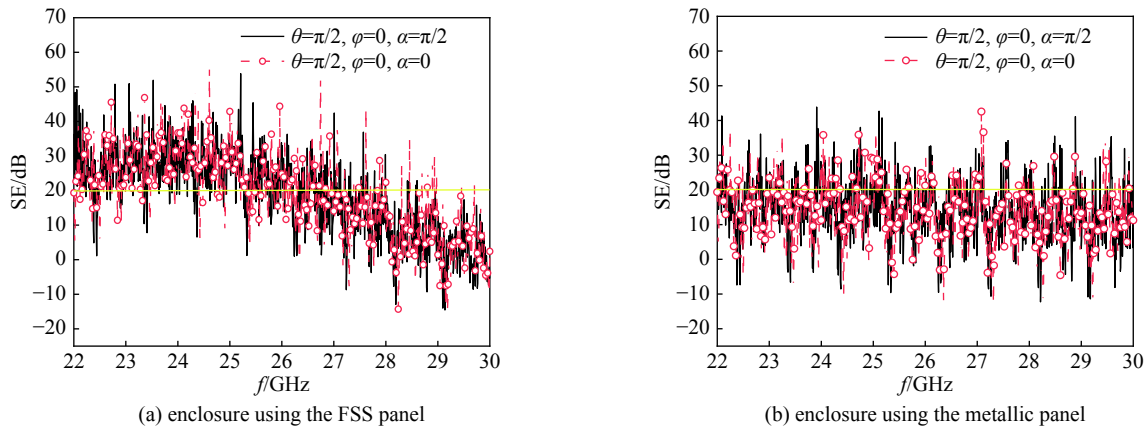


Fig. 8 Comparison of CSE between enclosure with FSS and conventional metallic enclosure with respect to the polarization of electromagnetic wave

图 8 不同极化电磁波照射下含 FSS 金属腔与传统金属腔的 CSE 对比

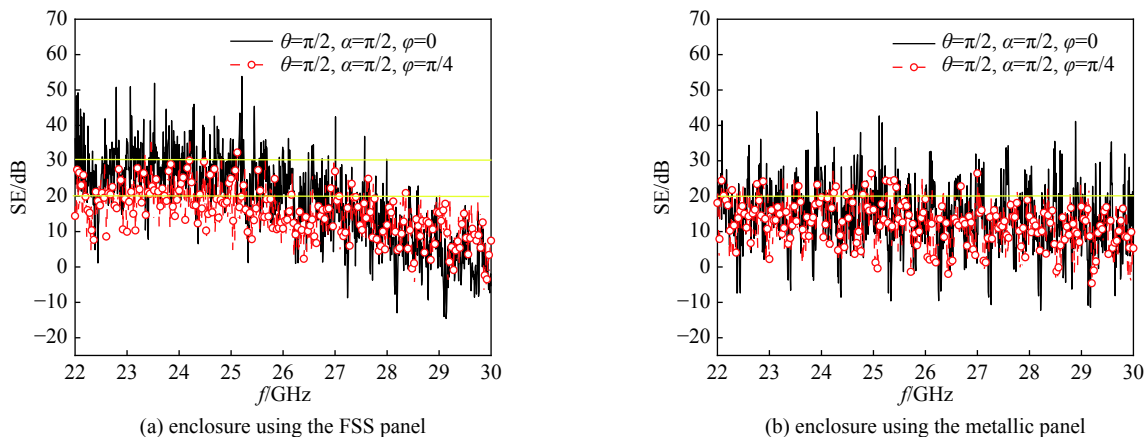


Fig. 9 Comparison of CSE between enclosure with FSS and conventional metallic enclosure with respect to the incidence of electromagnetic wave

图 9 不同电磁波入射角度下含 FSS 金属腔与传统金属腔的 CSE 对比

性。图 9 给出了保持俯仰角 $\theta=\pi/2$ 和极化角 $\alpha=\pi/2$ 不变, 改变方位角 φ 时的屏蔽效能。由图 9(a) 可知当电磁波由垂直入射($\varphi=0$)变为斜入射($\varphi=\pi/4$)时, 在 22~27 GHz 频段下腔体的屏蔽效能有所降低, 而 28~30 GHz 频段内 SE 有所升高, 这是由原 FSS 结构随入射角度的变化决定的。由于通风散热孔限制了 FSS 单元尺寸无法小型化, 导致其阻带谐振点随入射角度有一定偏移, 但整体电磁屏蔽性仍能保持在 20 dB 以上, 且在 22~26 GHz 频段下较图 9(b) 中的含传统散热孔阵金属腔的屏蔽效能高 5 dB 左右, 当频率大于 28 GHz 后, 屏蔽效能开始略低于传统散热孔阵金属腔 SE。总的来说, 在以上不同极化方式和入射角度电磁波的照射下, 采用 FSS 结构都能在保证通风散热的前提下提高金属腔的屏蔽效能。

3 结 论

本文通过计算腔体中心点屏蔽效能(CSE)和全局屏蔽效能(GSE)对含 FSS 通风孔阵的电子系统金属外壳的电磁屏蔽性能进行了评估。大量的计算分析结果表明在 23.0~25.5 GHz 频段下含 FSS 结构的金属腔屏蔽效能可以达到 30 dB, 比含相同散热孔的传统金属腔屏蔽效能高约 15 dB。需注意的是, 受 FSS 结构阻带频段影响, 当频率大于 28 GHz 后, 其 SE 低于传统孔阵金属腔屏蔽效能。本文研究证明了采用 FSS 结构可以在保证通风散热的前提下提高金属腔的屏蔽性能, 且在设计用于金属腔屏蔽的 FSS 结构时, 应考虑腔体加载带来的频率偏移影响。

参考文献:

- [1] Celozzi S, Araneo R, Lovat G. Electromagnetic shielding[M]. Hoboken: John Wiley and Sons, 2008.
- [2] Paul C R. Introduction to electromagnetic compatibility[M]. Hoboken: John Wiley and Sons, 2006.
- [3] 范颖鹏, 杜正伟, 龚克. 不同形状孔阵屏蔽效应的分析[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(11): 1441-1444. (Fan Yingpeng, Du Zhengwei, Gong Ke. Analysis of shielding effect of different shape hole array[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(11): 1441-1444)
- [4] 吴刚, 邵小亮, 孙靖虎, 等. 有孔双层矩形金属机壳屏蔽效能[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 103219. (Wu Gang, Shao Xiaoliang, Sun Jinghu, et al. Shielding effectiveness of double-layer rectangular metal enclosure with holes[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 103219)
- [5] 罗静雯, 杜平安, 任丹, 等. 基于BLT方程的双层腔体屏蔽效能计算方法[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 113201. (Luo Jingwen, Du Ping'an, Ren Dan, et al. Calculation method of shielding effectiveness of double-layer enclosure based on BLT equation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 113201)
- [6] 程二威, 陈亚洲, 刘卫东, 等. 无人机外壳屏蔽效能测试方法[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29: 113201. (Cheng Erwei, Chen Yazhou, Liu Weidong, et al. Test method of shielding effectiveness of UAV enclosure[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29: 113201)
- [7] 刘箴阳, 闫丽萍, 赵翔. 基于机器学习的开孔加载金属腔电磁屏蔽效能评估[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31: 083201. (Liu Zhengyang, Yan Liping, Zhao Xiang. Evaluation of electromagnetic shielding effectiveness of open hole loaded metal enclosure based on machine learning[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31: 083201)
- [8] Flintoft I D, Parker S L, Bale S J. Measured average absorption cross-sections of printed circuit boards from 2 to 20 GHz[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016, 58(2): 553-560.
- [9] 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. 5G millimeter wave focus band (26 GHz) global research trends and prospects[J]. Telecommunications Technology, 2018, 58(3): 356-362)
- [10] Aghabarati A, Moini R, Fortin S, et al. Electromagnetic shielding analysis of spherical polyhedral structures generated by conducting wires and metallic surfaces[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59(4): 1285-1293.
- [11] Sampath S S, Sivasamy R, Kumar K J J. A novel miniaturized polarization independent band-stop frequency selective surface[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(5): 1678-1681.
- [12] Li Da, Li Tianwu, Zhang Yaojiang, 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.
- [13] 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.
- [14] 许留留, 闫丽萍, 赵翔. 适用于5G电磁屏蔽的介质开孔型频率选择表面设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(4): 616-620. (Xu Liuli, Yan Lipin, Zhao Xiang. A dielectric open-hole frequency selective surface design for 5G electromagnetic shielding[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information, 2019, 17(4): 616-620)
- [15] Celozzi S. New figures of merit for the characterization of the performance of shielding enclosures[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(1): 142.
- [16] Hill D A, Ma M T, Ondrejka A R, et al. Aperture excitation of electrically large, lossy cavities[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1994, 36(3): 169-178.