

频率选择性透波吸波电磁结构^{*}

麻哲义培¹ 李浩彤² 侯新宇³

(1. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200444; 2. 北京环境特性研究所, 北京 100854;
3. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200444)

摘 要: 提出的频率选择性透波吸波(FSTA)复合结构,是一种在保证天线正常工作性能的前提下,实现对带外电磁波吸收的新技术。该技术具有隐身频带宽,自身结构强度高,电子设备电磁兼容特性高等优势。分析了一些典型频率选择表面(FSS)单元的等效电路模型,推导出了FSTA复合材料的等效电路模型,实现了对新型结构的快速定性分析,并得到结构中各参数对结构性能的作用规律。通过仿真优化实现了低频透波高频吸波(LTHA)型电磁结构的设计。

关键词: 吸波透波电磁结构,等效电路法,模拟电路吸波结构,频率选择表面

Frequency Selective Transmission and Absorption Electromagnetic Structure

MA Zhe-yi-pei¹, LI Hao-tong², HOU Xin-yu³

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;
2. Beijing Institute of Environmental Characteristics, Beijing 100854, China;
3. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The multi-layer structure with frequency selective transmission and absorption properties is designed in this paper, which is a new technique to absorb out-of-band electromagnetic waves while the antenna is working normally. It has many advantages, such as wide stealth band, strong structural strength and high electromagnetic compatibility of electronic equipment. This paper analyzes the equivalent circuit model of some typical frequency selective surface (FSS) elements, and deduces the equivalent circuit model of the multi-layer structure with frequency selective transmission and absorption(FSTA) properties, in this way we obtain an efficient and quick identification of new structure and the rules of parameters' effects on structural behavior. By simulation and optimization, we obtain the structure of transmission at low frequency and absorption at high frequency(LTHA).

Key words: transmission and absorption electromagnetic structure, equivalent circuit method, analog circuit absorption structure, frequency selective surface

引 言

雷达散射截面(RCS)是衡量目标实现雷达隐身能力的重要指标,目标对雷达隐身的关键是有效减缩RCS。频率选择表面(FSS)雷达天线罩技术是天线系统RCS减缩的一种有效手段,从FSS隐身机理角度来看,传统FSS雷达天线罩工作在天线工作带外频段,雷达天线罩相当于被金属化^[1],将入射的威胁电磁波反射出去,从而用雷达天线罩的低RCS外形替代天线系统的高RCS外形;在天线工作带内

频段,雷达天线罩通过其透波特性和达到天线隐身的目的。

带外电磁波借助天线罩外形实现了电磁散射的空间再分布,但某方向上的RCS降低,必然伴随其它方向上的RCS增强,这对多/双站雷达探测是极其不利的;同时,天线罩外形主要受气动性能、天线设计原理和工作特点的限制,天线罩外形并非百分百低RCS设计,因此要想实现带内天线RCS的减缩,目前主要采取了天线阵面倾斜和附加吸波材料的方法^[2-3],这往往会对天线的辐射特性产生较大影

^{*} 收稿日期:2017-03-28;修回日期:2017-12-03

响。此外,在舰船上单采用 FSS 雷达天线罩技术可能存在电磁兼容性问题及多次散射问题,导致天线系统 RCS 减缩、但舰船整体 RCS 反而增强的问题。

透波与吸波一体化天线罩的概念早在 20 世纪中期就被许多研究者关注,但因加工条件限制这项技术在近些年才得到一定发展。国外, Costa^[4] 等人于 2012 年提出了一种适用于 2~7 GHz 工作频率的带通型雷达天线罩的吸波结构,但其吸波性能在 12~20 GHz 只能达到 -14 dB 的反射率; Motevasselian^[5] 等人于 2014 年提出了一种新型的吸波结构,在 3.7 GHz 的中心频率处具有 400 MHz 的通带带宽,而对 X 波段电磁波具有 10 dB 以上的吸收性能。国内研究此项技术较少,起步也较晚, Shen 等人^[6-8] 基于三维 FSS 提出了一些吸波透波结构,它们具有极好的入射稳定性,但其通带传输率 -1 dB 以上的带宽小于 1 GHz,吸波性能仅在 10 dB 左右才达最大 8 GHz 左右带宽。

本文提出的频率选择性透波吸波 (FSTA) 电磁结构,是一种在保证天线正常工作性能的前提下,实现对带外电磁波吸收的新技术。具有隐身频带宽,自身结构强度高,电子设备电磁兼容特性高等优势。本文分析了一些典型频率选择表面 (FSS) 单元的等效电路模型^[9],推导出 FSTA 复合材料的等效电路模型,实现了对新型结构的快速定性分析,并得到结构中各参数对结构性能的作用规律。通过仿真优化实现了低频透波高频吸波 (LTHA) 型电磁结构的设计。

1 FSTA 电磁结构的等效电路模型分析

吸波结构通过在接地平面之前放置电阻层或电阻性单元来获得吸波特性,这种结构在反射其它频率电磁波的同时吸收某个频率范围的电磁波。为了让该结构的频率反射特性转变为传输特性,将接地平面换成 FSS 金属层,就得到透波吸波的电磁结构。

首先对由阻抗型六边形环状 FSS 层与金属方形环状 FSS 层^[10]构成的吸波透波结构进行等效电路模型分析。结构组成如图 1(a) 所示,单元形式如图 1(b) 所示。其中单元周期为 P ,六边形环边长为 L_1 ,方环边长为 L_2 ,线宽均为 W ,三层介质^[11]厚度为 h_1, h_2, h_3 ,六边形环单元的面电阻为 R 。

该吸波透波结构的整体等效电路如图 2 所示。

图 2 中, X_1, B_1, R_1 分别代表六边形阻抗环带来的感抗、容抗和电阻; X_2, B_2 分别代表正方形金属环

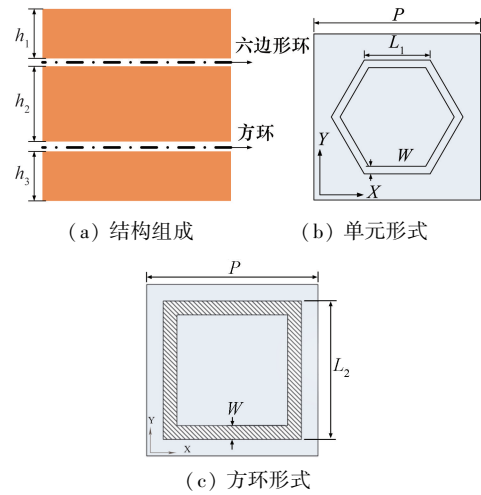


图 1 阻抗型六边形环状单元吸波透波电磁结构

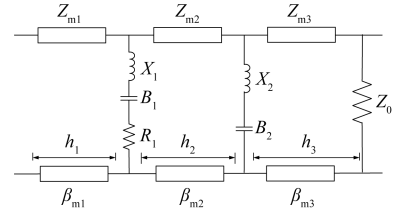


图 2 阻抗型六边形环状单元吸波透波电磁结构等效电路

带来的感抗和容抗; Z_{m1}, Z_{m2}, Z_{m3} 分别是厚度为 h_1, h_2, h_3 介质的等效阻抗; Z_0 为自由空间阻抗; $\beta_{m1}, \beta_{m2}, \beta_{m3}$ 分别是厚度为 h_1, h_2, h_3 介质中的传播常数。

等效电路图中的各参数:

$$\begin{cases} X_1 = 2L_1 F(P, 2W, \lambda) / P \\ X_2 = L_2 F(P, 2W, \lambda) / P \\ B_1 = 4\sqrt{3} L_1 \epsilon_{\text{reff}} F(P/2, P/2 - L_1, \lambda) / P \\ B_2 = 4L_2 \epsilon_{\text{reff}} F(P, P - L_2, \lambda) / P \end{cases} \quad (1)$$

两层周期结构的等效阻抗为:

$$\begin{cases} Z_{\text{RFSS}} = j(X_1 - 1/B_1) + R_{\text{reff}}/Z_0 \\ Z_{\text{FSS}} = j(X_2 - 1/B_2) \end{cases} \quad (2)$$

其中,

$$R_{\text{reff}} = R_1 P^2 / [(L_1 d - d^2 / \sqrt{3})(2 + 4/\sqrt{3})] \quad (3)$$

由传输线理论就可以求出整体结构的反射系数及传输系数。

下面,本文通过控制变量法仿真模拟的方式,对影响透波吸波电磁结构性能的结构参数进行分析。

对于介质层,随着最上层介质厚度 h_1 的增大,整体的传输特性几乎不变,但反射特性曲线会被相对“压缩”并且略向低频平移;中间层介质厚度 h_2 变化对于吸波透波电磁结构的传输特性几乎没有影响,但随着 h_2 厚度的增加反射曲线中吸波的中心频率向低频端移动;底层介质厚度 h_3 对于吸波透波电

磁结构的传输反射特性没有明显影响,但随着 h_3 的变大,反射率的首个“谷值”带宽略微变宽,而传输特性曲线中的谐振点完全没有变化,带宽只有微弱减小;每层都采用相同的介质,随着介质介电常数的增加,传输特性的谐振点向低频端移动,并且阻带带宽略有减小,而反射特性吸波的中心频率虽然没有明显偏移,但是首个阻抗匹配点明显地向低频端偏移,并且吸波带宽有所减小。

对于阻抗层,随着阻抗层的单元长度 L_1 增加,传输特性几乎没有变化,仅带宽略有增加,对于反射特性而言,阻抗层单元边长的增加,对于反射特性曲线的幅值影响较大;随着单元周期的增加,单元之间产生的感抗随之减小,导致传输特性的谐振点向高频移动(当周期增加到一定程度时谐振点不再变化),反射特性出现阻抗失配,反射特性曲线中吸波的中心频率与首个阻抗匹配点所对应的频率不变;随着阻抗层单元宽度 W 的增加,传输率曲线的阻带带宽略有增加,最小值也稍有上升,反射率曲线的中心频率缓慢上升,首个阻抗匹配点所对应的反射率有显著变化;随着阻值的增加,吸波透波电磁结构的传输曲线基本没有变化,带宽稍有减小,但阻抗失配之后反射特性曲线所体现出的吸波性能显著下降;随着金属层 FSS 单元长度的增加,传输曲线中的谐振频率会向低频端移动,不会改变反射曲线中吸波的中心频率,但是会引起首个吸波“谷值”向低频端偏移。

对于金属方形环状 FSS 层,它具备典型频率选择表面的通性。随着金属 FSS 单元宽度的增加,吸波透波电磁结构的传输特性曲线谐振点向高频移动,同时首个最接近阻抗匹配的频点也向高频移动。此外随着单元宽度的增加,传输特性曲线的阻带带宽有较明显的增加。

2 LTHA 电磁结构的设计和优化

2.1 宽带吸波结构的仿真设计和优化

本文选用六边形环状加载集总电阻元件所构成的单元作为模拟电路吸波体的阻抗层,这是由于加载集总电阻元件所构成的阻抗层可以提供更宽的吸波带宽,并且加工工艺简单、误差较小。为了得到较好的吸波效果,电阻元件的加载位置必须为单元谐振时电流振幅最大的位置,六边形环状单元在水平极化、垂直极化两种情况下谐振时的表面电流分布分别如图 3 中的(a)、(b)所示。

由图 3 可以看出,水平极化时单元的表面电流

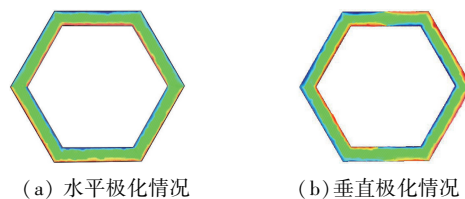


图 3 两种极化条件下六边形环状单元的表面电流分布

振幅最大的点位于上下两条平行边的中点,而垂直极化时单元两侧的表面电流最大。因此在设计中,将集总电阻元件加载到六边形环状单元的每一条边的中心位置,如图 4 所示。其中, P 为单元周期, L 为六边形单元长度, W 为单元贴片宽度, R 为集总元件电阻值。

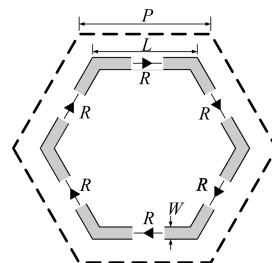


图 4 加载集总电阻元件的六边形环状单元

设计的模拟电路吸波结构如图 5 所示。其中 h_1 为最上层蒙皮厚度,蒙皮的主要作用是增强结构的强度与保护内层材料; h_2 为上层蜂窝结构厚度; h_3 为阻抗层两侧环氧树脂材料厚度; h_4 是下层蜂窝结构厚度,这一参数决定了有耗层与理想金属(PEC)接地层之间的距离,一般为谐振点波长的 $1/4$ 。

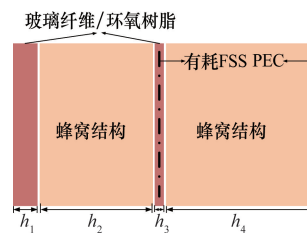


图 5 宽带吸波结构示意图

通过一系列的仿真及优化,最终确定的吸波结构各参数如表 1 所示,所得到的反射特性曲线与传输特性曲线(不加金属接地面)如图 6 所示。

表 1 宽带吸波结构各参数

P/mm	L/mm	W/mm	R/Ω
6	4.5	0.5	150
h_1/mm	h_2/mm	h_3/mm	h_4/mm
0.4	3.2	0.2	5.5

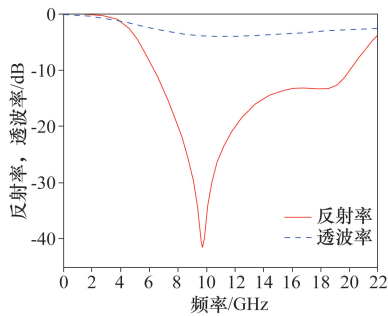


图 6 宽带吸波结构的反射特性曲线与传输特性曲线

由图 6 可以看出,本文所设计的吸波结构在6.2 ~20 GHz 具有-10 dB 以下的反射率;此外当撤去金属接地面后,结构在 2.3 GHz 以下具有-0.5 dB 以上的透波性能,而在 3.4 GHz 以下具有-1 dB 以上的透波率。

2.2 贴片型宽带 FSS 结构的仿真设计与优化

本文设计的宽带 FSS 为带阻型频选结构,因此采用的是六边形环状贴片单元。吸波透波电磁结构中金属 FSS 层的设计是基于阻抗层对于低频电磁波是透明的这一假设进行的,因此金属 FSS 单元结构如图 7 所示。

图中 P 为单元周期, L_1 为单元边长, W_1 为单元的贴片宽度; H 为玻纤/环氧介质的厚度。

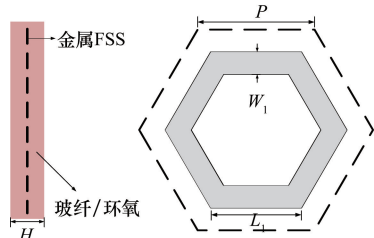


图 7 宽带带阻型 FSS 单元结构示意图

随着贴片宽度 W 的增加,阻带带宽增加的同时谐振点向高频端移动;而单元边长 L 的增加会使谐振点向低频移动,贴片宽度的增加与单元边长的增加会导致低频透波率下降;因此,在周期一定的情况下,通带的性能与阻带性能是一组相互制约的量。

表 2 给出的是周期相同条件下,金属 FSS 的谐振频率在 10 GHz 附近时的三种参数组合,其透波率曲线如图 8 所示。

表 2 金属 FSS 参数			mm
周期	边长	宽度	
6	5.5	1.5	
6	5.3	1.1	
6	5	0.8	

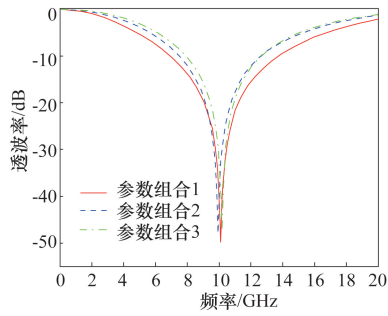


图 8 不同参数时的金属 FSS 透波率

从图 8 可以看出,宽度为 1.5 mm 时,阻带带宽明显较宽,但 1 GHz 以下的低频透波率显著降低;此外,还可以看出,同时减小边长与贴片宽度可以在保证谐振频率不变的前提下提升结构的低频透波性能,同时会导致阻带带宽减小。

图 9 所示是两种周期不同但谐振频率相同的 FSS 单元的透波率曲线,可以看出,增大单元周期并不能明显改善结构性能。此外,当 FSS 单元阵列小于 20×20 时,阵列性能与无限大阵列会有明显改变,因此,较小周期的单元 FSS 结构所适用的范围更加广泛,本文的设计选用周期较小的单元作为金属 FSS 结构,单元参数为: $H = 0.2$ mm, $P = 6$ mm, $L = 5.2$ mm, $W = 1$ mm。

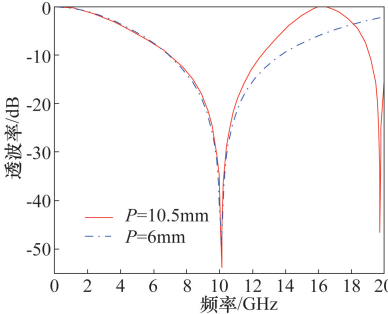


图 9 不同周期的 FSS 单元透波率

2.3 LTHA 型电磁结构

综合上述结果,经仿真优化得到最终的 LTHA 型吸波透波电磁结构。所设计的低通高吸型电磁结构是由多层六边形单元结构周期排列所构成,其单元结构如图 10 所示,主要由三部分构成:阻抗型 FSS 层,金属 FSS 层,蜂窝介质层。

结构参数如表 3 所示, LTHA 型电磁结构的传

表 3 LTHA 型电磁结构参数						mm
h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	P	
0.4	3.2	0.2	5.5	0.2	6	
W_1	L_1	W	L	R		
1	5.2	0.5	4.5	150		

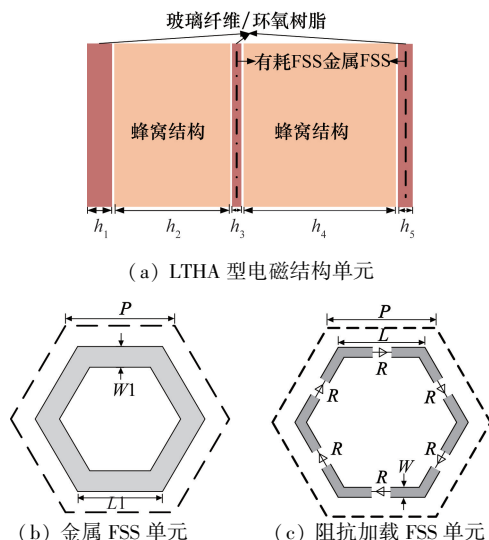


图10 低通高吸型电磁结构的单元组成

输/反射特性曲线如图11所示。

由图11(a)可以看出,本文设计的结构在垂直入射时9.1~15.4 GHz的频带内具有-10 dB以下的透波率,且具有-30 dB以下的反射率,此外,在1.95 GHz以下具有-1 dB以上的透波性能。对入射角为20°、40°和60°进行仿真,结果得出该结构在40°入射角时其反射率仍能达到-20 dB左右,入射角为60°时的吸收能力会有明显的劣化,但是即使在大角度入射情况下,其反射率在所设计的吸波频带内均明显低于-10 dB,优于前述文献中的结果;

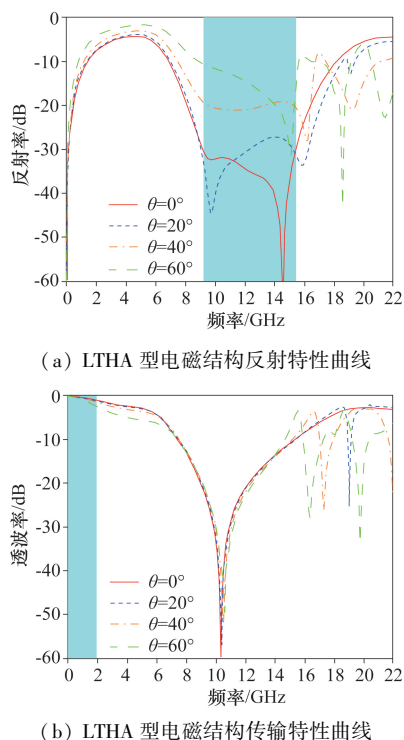


图11 LTHA型电磁结构反射特性曲线和传输特性曲线

同时,由图11(b)可以看出,入射角度40°以内的低频透波性能非常稳定,始终保持在1.95 GHz以下具有-1 dB以上的透波率。

3 结论

由以上仿真分析可知,本文设计了一种LTHA型的电磁结构,吸波性能主要由阻抗型FSS层结构决定,透波性能主要由金属型FSS结构决定。本文设计的FSTA复合结构材料,是一种新技术,它可在保证天线性能的前提下,实现对带外电磁波的吸收,从而既兼顾电子设备的电磁兼容特性,又实现宽频带隐身。这种透波吸波电磁结构同时具有隐身频带宽、自身结构强度高、电磁兼容特性好的优势,因此具有重要的潜在应用价值,特别是工作波段在低频范围的舰载雷达天线罩,其工作时俯仰角度范围较小,因此本结构既能很好地满足其在低频工作的要求,又可以减少不同工作频段通信系统之间干扰,同时起到很好的雷达隐身效果。

本文下一步的工作,第一,将不断完善量化等效电路模型分析的方法,准确控制透波吸波电磁结构的参数;第二,为实现更优秀的宽带隐身效果,一方面设计低频透波性能好且反射带宽更宽的金属FSS,另一方面设计吸波带宽更宽的阻抗加载型吸波结构;第三,将通过样件加工与实验测试,对本结构实际性能进行评估。

参考文献

- [1] 张强,周志鹏,何炳发,等. 金属天线罩及闭壳体电磁散射研究[J]. 微波学报,2012(S2): 98-101
Zhang Q, Zhou Z P, He B F, et al. Research on the scattering of metal radome and closure body[J]. Journal of Microwaves, 2012(S2): 98-101
- [2] Varadan V K, Vinoy K J, Jose K A, et al. Conformal fractal antennas and FSS for low RCS application[A]. SPIE-The International Society for Optical Engineering[C], 2000
- [3] 李志超,肖志河,侯新宇,等. FSS天线罩的RCS测量与分析[J]. 微波学报,2015,31(2): 50-54
Li Z C, Xiao Z H, Hou X Y, et al. RCS measurement and analysis of a FSS radome[J]. Journal of Microwaves, 2015, 31(2): 50-54
- [4] Costa F, Monorchio A. A frequency selective radome with wideband absorbing properties[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(6): 2740-2747

(下转第83页)

- cle[A]. International Symposium on Antennas Propagation & EM Theory[C], 2012. 612-615
- [5] Tsujita W, Inomata K, Hirai T. Development of dual leaky coaxial cable for intruder detection sensor[A]. 2014 IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security[C], 2014. 126-129
- [6] 王明吉,张勇,李玉爽,等. 单主机高精度周界入侵探测报警系统[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(12):23-24
Wang M J, Zhang Y, Li Y S, et al. Simple-alone high precision perimeter intruder location warning system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(12): 23-24
- [7] Hirai T, Inomata K, Miyake N, et al. Wide area intruder detection system with a pair of transceiver cables[A]. 2007 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security[C], IEEE Xplore, 2007. 76-80
- [8] 官乔,樊雪丰,刘洋,等. VHF 频段漏泄同轴电缆埋地传感器研究[J]. 微波学报, 2017, 33(4):16-20
Guan Q, Fan X F, Liu Y, et al. Research on VHF buried sensor using leaky coaxial cable techniques[J]. Journal of Microwaves, 2017, 33(4):16-20
- [9] Liu W Y, Ding H, Huang X T. Enhanced TOA estimation in IR-UWB ranging via baker coded pulse trains[A]. IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing[C], 2011. 1-5
- [10] 陈伯孝. 现代雷达系统分析与设计[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2012
Chen B X. Modern radar system analysis and design[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2012
- [11] 周晓明,杨凯,梅光. 用于电磁计算的中国数字化人体建模分析[J]. 深圳大学学报(理工版), 2009, 26(1): 57-60
Zhou X M, Yang K, Mei G. Analysis of the modeling of Chinese digital human body used in electromagnetic computation[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2009, 26(1): 57-60
- [12] 陶贵生. 全人体电磁模型及其在电磁场生物效应中的初步应用研究[D]. 杭州:浙江大学, 2004
Tao G S. Whole-body electromagnetic model and its preliminary application in electromagnetic field biological effect research[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004
- 刘洋** 男,1994年生,硕士生。主要研究方向:数字信号处理,漏泄同轴电缆。
E-mail: l. yang. mail@foxmail. com

(上接第78页)

- [5] Motevasselian A, Jonsson B L G. Design of a wideband rasorber with a polarization sensitive transparent window[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2012, 7(6): 747-755
- [6] Li B, Shen Z. Wideband 3D frequency selective rasorber[J]. IEEE Trans on Antennas Propag, 2014, 62(12): 6536-6541
- [7] Li B, Shen Z. 3D frequency selective rasorber: concept, theory, and design[A]. Proc Asia-Pacific Microw Conf[C], 2015. 1-3
- [8] Shen Z X, Wang J, Li B. 3-D frequency selective rasorber: concept, analysis, and design[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(10): 3087-3096
- [9] Costa F, Monorchio A, Manara G. Efficient analysis of frequency selective surfaces by a simple equivalent circuit model[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54(4): 35-48
- [10] 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 surfaces: theory and design[M]. Beijing: Science Press, 2009
- [11] 侯新宇,万伟,佟明安,等. 带有多层介质衬底 FSS 的损耗和带宽特性分析[J]. 微波学报, 1999, 15(4): 366-370
Hou X Y, Wan W, Tong M A, et al. Analysis on the loss and bandwidth properties of FSS with multi-layer dielectric substrates[J]. Journal of Microwaves, 1999, 15(S): 366-370
- 麻哲义培** 男,1993年生,硕士生。主要研究方向:频率选择表面与天线罩技术。
E-mail: mazheyipei@icloud.com
- 李浩彤** 男,1991年生,硕士生。主要研究方向:电磁散射、频率选择表面及特种电磁结构。
E-mail: 936778955@qq.com
- 侯新宇** 男,1969年生,博士,教授。主要研究方向:电磁散射、FSS、目标散射特性分析与控制、微波天线、雷达吸波结构、航空复合材料、半导体材料与器件等。
E-mail: houxy@shu.edu.cn