

U型立绒立体周期结构频率选择织物的性能

肖红¹,程焕焕²,施楣梧¹,关福旺²,王亚静²,王群³,唐章宏³

1. 中国人民解放军总后勤部军需装备研究所,北京 100082

2. 东华大学纺织学院,上海 201620

3. 北京工业大学材料学院,北京 100124

摘要 采用立绒织造方式,以银纤维纱线作为导电结构单元材料,制备了基于U型立绒单元的立体周期结构频率选择纺织品。与具有U型底部长度同样尺寸的平面偶极子周期结构织物相比,U型立绒在偶极子两个端点沿Z轴向空间延伸。U型立绒立体周期结构织物在2~18 GHz内具有双频点谐振效应;谐振频率随着U型底部连通长度增加向低频移动,在同样的底部长度下,U型个数不影响谐振频率;银纤维构成的结构单元织物比不锈钢纤维纱线具有更加尖锐的谐振峰。进一步实现了基于银纤维纱线的、簇集U型立绒构成的十字体结构单元频率选择织物,表明立体周期结构织物具有丰富的灵活可设计性。

关键词 U型立绒;立体周期结构;频率选择织物;立体纺织品

结合人工电磁媒质的周期结构,采用纺织加工手段,以导电纤维和常规纤维纱线分别作为导电结构单元和介质单元,制备具有特殊电磁功能的轻质柔性电磁纺织材料^[1],将电磁学和纺织材料学结合起来,不仅具有重要的科学研究意义,且在雷达吸波材料、通信窗、织物天线、柔性功能服装等应用领域具有实用价值^[2,3]。2012年以来,基于周期结构的频率选择织物(FSF)得到了关注,国内外几乎同时开展了相关研究。采用丝网印刷^[4,5]、机织^[6]、纬编针织加工^[7,8]、刺绣^[9,10]、选择性化学镀^[10]、喷墨打印^[11,12]等纺织加工技术手段,制备了各种具有带通或带阻特性的平面周期结构纺织品(2D FSF),并对其频率响应特性进行了初步研究。

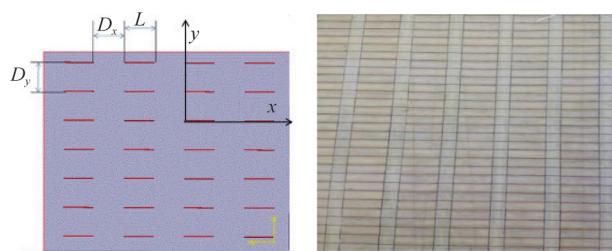
上述研究都集中于平面纺织材料。与二维周期结构电磁媒质相比,三维周期结构电磁媒质具有更好的角度稳定性、多频响应特性和灵活可设计性,目前基本采用金属和硬质材料制备^[13-16]。2013年初,施楣梧课题组提出了电磁功能纺织材料的研究思路^[1],同步开展了基于平面和立体周期结构纺织品的研究^[17],提出了制备立体周期结构频率选择织物(3D FSF)的方法和基本思路^[18-20]。基于前期研究,结合纺织加工技术特点,本文对比U型立绒立体周期结构织物和平面偶极子周期结构织物的差异,探讨立绒周期结构中织物U型底部结构、结构单元所用材料及其细度对频率响应特性的影响,以实现基于簇集U型立绒的十字体立体周期结构织物的

制备。

1 实验设计

1.1 偶极子平面和U型立绒立体周期织物的样品比较

为了比较平面偶极子周期结构和独立U型立绒立体周期结构织物的差异,采用裸铜丝模拟真实织物结构,制备了平面偶极子周期结构模型样品,其模型及样品如图1所示。采用对应的结构参数和材料模拟立绒织物结构,制备立体U型周期结构,其模型及样品如图2所示。制备样品的具体参数见表1。



(a) 平面偶极子织物模型示意

(b) 偶极子平面织物模型样品

图1 平面偶极子模型示意及样品

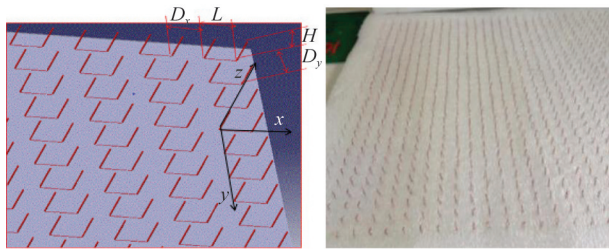
Fig. 1 Diagram and sample of planar dipole unit fabric model

收稿日期:2016-01-09;修回日期:2016-04-20

基金项目:军队后勤重点科研项目(BX113C004),国家自然科学基金项目(51403232)

作者简介:肖红,高级工程师,研究方向为电磁功能纺织材料,电子信箱:76echo@vip.sina.com

引用格式:肖红,程焕焕,施楣梧,等. U型立绒立体周期结构频率选择织物的性能[J]. 科技导报,2016, 34(18): 47-53;doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.18.004



(a) 独立U型立绒织物模型示意图 (b) 独立U型立绒织物模型样品

图2 独立U型立体结构模型示意及样品

Fig. 2 Sketch and sample of single U velvet 3D periodic structure fabric model

表1 基于裸铜丝的织物模型样品参数

Table 1 Parameters of fabric model samples based on bare copper wire

样品编号	单元长度 L/mm	间距 $D_x=$ D_y/mm	单元高度 H/mm	基质	结构单元	所用材料
Tp-L1-#	6	6	0	纸板	偶极子	裸铜丝
Tp-L2-#	9	6	0	纸板	偶极子	裸铜丝
Tp-L3-#	12	6	0	纸板	偶极子	裸铜丝
TL-1-#	15	6	0	纸板	偶极子	裸铜丝
TL-2-#	20	6	0	纸板	偶极子	裸铜丝
TL-3-#	25	6	0	纸板	偶极子	裸铜丝
TL-1-#	6	6	6	纸板	独立U型	裸铜丝
TL-2-#	9	6	6	纸板	独立U型	裸铜丝
TL-3-#	12	6	6	纸板	独立U型	裸铜丝

不同于传统的金属周期结构采用的刻蚀方法,纺织织造的特点在于需要以连续性的纱线在织物的不同方向进行交织,并通过一定的方式或紧密度对交织进行固结,保证结构的稳定。当需要在平面织物上形成偶极子单元(图1(a))时,导电纱线在织物反面需要被剪断,才能在 x 方向形成具有一定间距的偶极子结构单元(图1(b)),否则将在织物的 x 方向形成连续性的导电线。当在此基础上形成立体结构时,容易形成的是由偶极子的两个端点向 z 轴方向延伸,形成绒毛高度为 H 的U型立绒结构(图2(a))。而当由金属构成的平面偶极子结构发展为立体结构时,容易形成的是偶极子在整个长度上、沿 z 轴方向叠加或延伸。

1.2 独立U型立绒立体周期结构织物样品

对于独立U型立绒的立体周期结构织物,研究结构尺寸、周期结构在 x 轴和 y 轴方向上的间距、绒毛高度、电磁波入射角度等对该织物的频率响应特性的影响^[21,22]。采用立绒织造方式制备的3D FSF,U型结构单元在基底介质底部有多种不同的变化(图3)。其中,图3(a)表示U型底部可以被剪断,图3(b)表示独立U型单元可以形成不同的连续性单元,其底部连通方式分别为单U、双U和三U型,图3(c)表示U型单元底部长度可以变化。

以簇绒地毯复合基布作为基底介质,金属纤维纱线作为U型结构单元材料,普通涤纶粗纱作为支撑材料,根据设计尺寸调节织机的针迹长度、针距、绒高等,使用簇绒地毯小样织机织造的U型立绒3D FSF样品实物如图4所示,样品参数见表2。

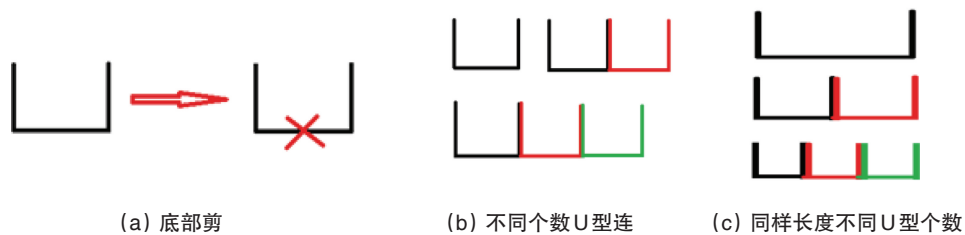


图3 U型连通方式示意

Fig. 3 Different U connectings



图4 U型立绒3D FSF样品正面(左)、反面(右)

Fig. 4 Positive and negative of U velvet 3D FSF

表2 U型立绒3D FSF 样品参数
Table 2 Parameters of 3D FSF samples

样品编号	单元长度 L/mm	间距 $D_x=D_y/\text{mm}$	单元高度 H/mm	连通方式	其他立绒支撑材料	所用结构材料	线密度/dtex
Zd-1-#	6	6	9	单U	普通涤纶	镀银长丝	1630
Zd-2-#	12	6	9	双U	普通涤纶	镀银长丝	1630
Zd-3-#	18	6	9	三U	普通涤纶	镀银长丝	1630
Zd-4-#	9	6	9	单U	普通涤纶	镀银长丝	1630
Zd-5-#	18	6	9	双U	普通涤纶	镀银长丝	1630
Zd-6-#	12	6	9	单U	普通涤纶	镀银长丝	1630
Zd-T1-#	9	6	9	单U	普通涤纶	镀银长丝	1005
Zd-T2-#	9	6	9	单U	普通涤纶	镀银长丝	2255
Y-h1-#	6	6	3	单U	普通涤纶	镀银长丝	1630
Z-1-#	6	6	9	单U	普通涤纶	不锈钢纱线	1630

1.3 十字体立体结构样品

1.2节中的U型结构单元,是通过一束纱线或一根纱线形成的较小的、有独立单个U型立绒构成的导电结构单元。实际使用中,还需要形成其他特定形状的结构单元,比如立柱、正方体、十字体等。初步尝试采用镀银纤维(图5中黑色部分)和普通锦纶纱线(图5中白色部分)形成了具有较大尺寸的、由簇集U型立绒构成的十字体导电单元的3D FSF(图5)。



图5 十字体立绒周期结构织物样品正面(左)、反面(右)
Fig. 5 Positive and negative of velvet 3D FSF with cross-shape unit

1.4 测试方法

采用透射系数表征各样品的频率响应性能。发射和接收天线(均为1~18 GHz喇叭天线),分别连接信号发生器(安捷伦E8257D, 250 kHz~40 GHz)和频谱分析仪(E7405AEMC, 100 Hz ~ 26.5 GHz),吸波屏放置在两个天线中间位置,反射天线、接收天线及材料放置台的中心位置在同一高度上对齐。电磁波沿样品z轴、垂直x、y平面方向入射。测试系统俯视图如图6所示。

放置样品时的接受功率和不放样品时的接受功率的差值,即为透射系数。计算公式为

$$S_{21} = 10 \lg \frac{10^{P_1/10}}{10^{P_2/10}} = P_1 - P_2 \quad (1)$$

式中, P_1 为放置样品时的接收功率,单位为 dBm; P_2 为空置时的接收功率,单位为 dBm; S_{21} 为透射系数,单位为 dB。

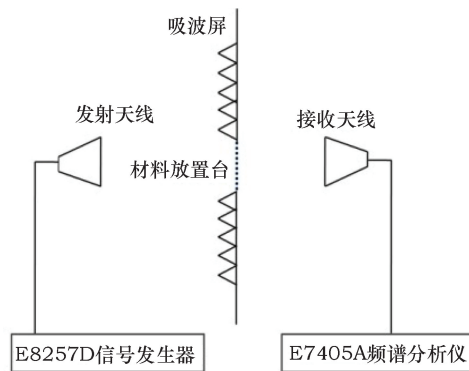


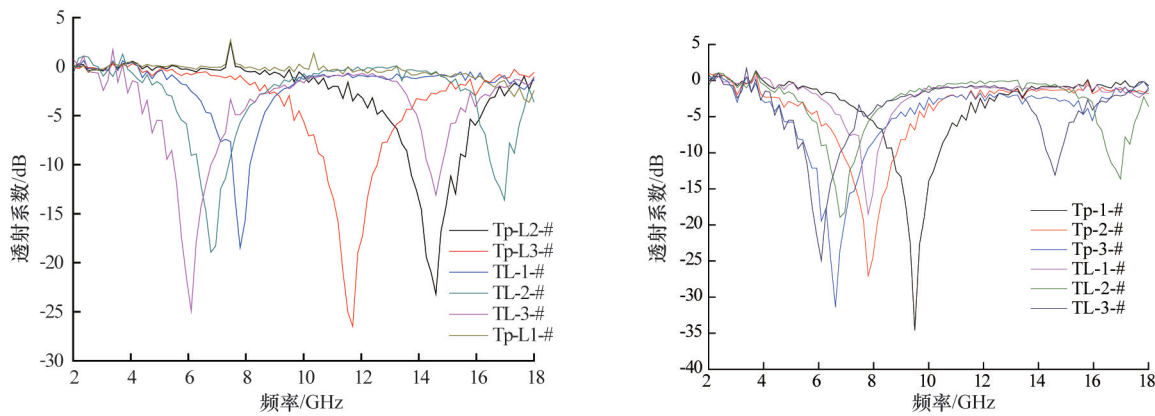
图6 透射系数测试系统侧视图
Fig. 6 Side view of the testing system for transmission coefficient

2 结果及分析

2.1 平面偶极子和U型立绒3D FSF的对比分析

将偶极子频率选择平面织物模型、U型底部长度与偶极子单元长度一致的独立U型立绒3D FSF织物模型进行测试,结果如图7(a)所示。从表1可知, T_p-L 平面系列高度为0 mm,单元间距 $D_x=D_y=6$ mm,单元长度分别为6、9、12 mm; $T_L-#$ 立体模型系列单元高度为6 mm,其他参数同 T_p-L 系列。根据经验计算,制作与 $T_L-#$ 系列相似谐振频率下的平面样品,如 $T_p-#$ 系列,单元长度分别为15、20、25 mm,如图7(b)所示。

从图7可看出,基于织物织造方式构成的平面偶极子织物模型和U型立绒3D FSF模型样品,随着单元长度 L 的增加,谐振频率均向低频移动。但两者也表现出显著差异:(1) 出现同样的谐振点时,两者存在单元结构尺寸差异,在同样的谐振频点7 GHz时,平面样品单元长度为25 mm,立体样品



(a) 相同底部长度的平面和立体结构对比

(b) 不同底部长度的平面和立体结构对比

图7 平面和立体周期结构样品频响特性对比

Fig. 7 Comparison of frequency response characteristics of 2D and 3D periodic structure samples

单元长度为 9 mm, 高度为 6 mm, 且立体周期结构在 17 GHz 产生了第二谐振频点; (2) 单位长度相同时, 谐振点存在差异, 当平面和立体样品单元长度 L 都为 6 mm 时, 平面周期结构在 1~18 GHz 频段没有发生谐振, 而立体周期结构在 8 GHz 时出现明显的谐振现象; (3) 当平面和立体周期结构样品单元长度 L 同为 9 mm 时, 立体周期结构分别在 7 GHz 和 17 GHz 产生谐振, 平面周期结构在 15 GHz 发生谐振, 处于该立体周期结构的两个谐振频点的中间; (4) 当平面和立体周期结构样品的单元长度同为 12 mm 时, 立体周期结构分别在 6 GHz 和 15 GHz 产生谐振, 而平面周期结构在 12 GHz 产生谐振。

由此可见, 当平面偶极子周期结构沿两个端点向 z 轴延伸成空间 U 型周期结构时, 其谐振频点往低频移动并出现多频点谐振, 平面周期结构样品的谐振频率处于立体周期结构样品的两个谐振频点中间。

2.2 U型底部连通状态对频响性能的影响

2.2.1 底部连通状态对频响性能的影响

为验证 U 型单元底部连通性对 3D FSF 的频率选择性能的影响, 使用表 2 中的 Y-h1-# 样品测试其底部剪断前和剪断后的透射系数, 结果如图 8 所示。可以看出, U 型底部被剪断后对电磁波基本呈现透通性, 没有出现明显的谐振频点, 这意味着底部连接对频率响应性能至关重要。前期研究已经证实, 绒毛高度会明显的影响结构的频率响应性能^[2], 因此, 可推断该立绒周期结构织物中, 完整的 U 型单元与电磁波发生了谐振效应。

2.2.2 U型连通个数对频响性能的影响

研究的织物样品为独立结构单元, 其 U 型底部长度相同但连通个数不同 (如图 3(b) 所示), 透射系数曲线的变化规律如图 9 所示。当单个结构单元由不同个数的相同 U 型立绒构成时, 结构单元的底部长度随 U 型个数的增加而增加, 导致更易与低频波发生谐振。图 9 中几条曲线的第二谐振频点在

10.5~13.5 GHz 范围内, 随着 U 型连接个数增加, 谐振频率向低频移动。

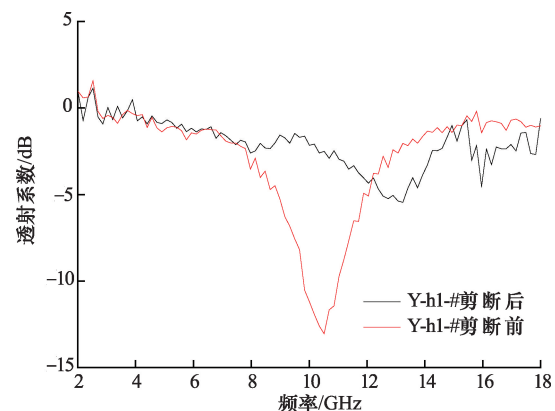


图8 U型立绒底部剪断前后的透射系数对比

Fig. 8 Transmission coefficients of samples with U velvet before and after bottom cut

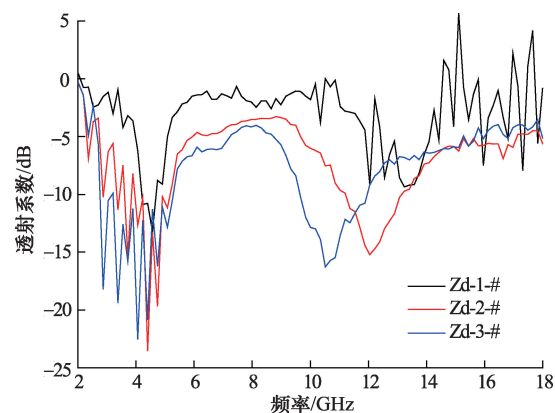


图9 不同U型连通个数的透射系数

Fig. 9 Transmission coefficients of samples with different U number

2.2.3 单元底部连通长度相同、不同U型个数的影响

导电结构单元底部长度为 12 mm, 分别制作单 U 型和双 U 型织物样品 Zd-6-# 和 Zd-2-#; 保持底部长度 18 mm, 分别制作双 U 和三 U 连接的样品 Zd-5-# 和 Zd-3-#, U 型底部连通

情况如图 3(c) 所示。4 个样品的透射系数如图 10 所示, 当保持结构单元底部长度一定时, U 型连通个数几乎不会影响到结构的谐振频率。U 型立绒结构底部的连续长度对频率响应性能影响显著。

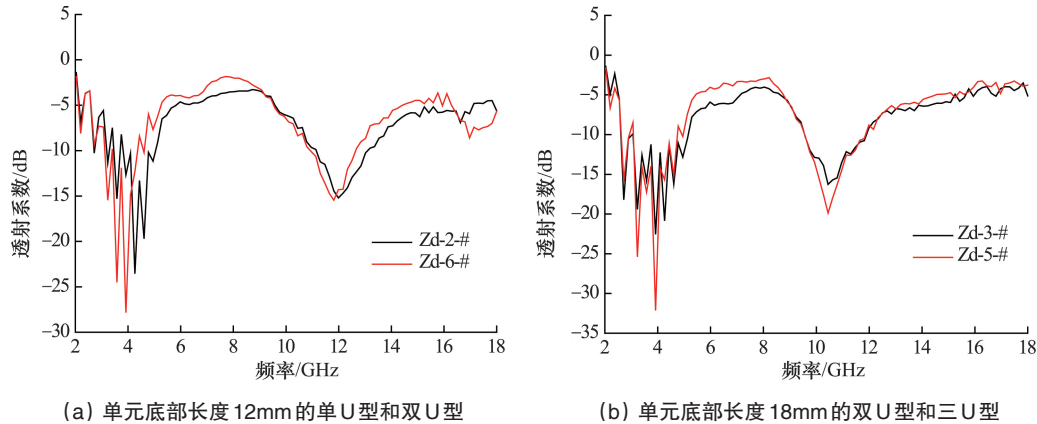


图 10 底部长度一定时不同 U 型连通个数的透射系数

Fig. 10 Transmission coefficients of samples with different U numbers with same bottom length

2.3 金属纱线材料对频响性能的影响

使用不锈钢/棉混纺纱线作导电材料, 制作织物样品 Z-1-#; 使用镀银长丝做导电材料, 制作织物样品 Zd-1-#。图 11 为两者的透射系数曲线。可以看出, 导电性能好的材料 (如镀银纤维) 会使得 3D FSF 的谐振处的峰值绝对值较大, 但不会影响到谐振频率的变化。而磁导率相对较好的不锈钢材料则使得谐振处的带宽增加。在织物中, 还有一部分支撑材料为普通涤纶粗纱, 对电磁波呈现通透性, 不会影响电磁波的传播。

品 Zd-T1-#, Zd-4-# 和 Zd-T2-#。透射系数曲线如图 12 所示。纱线细度的变化会引起谐振频率轻微的变动: 细度增加, 谐振频率先向高频移动, 后向低频移动, 且带宽也有少许改变; 周期单元尺寸不变, 纱线细度增大, 则绒毛行距 D , 会有减小。根据前期实验结论, 随着绒毛行距 D 的减小, 产生的谐振频率向高频缓慢移动, 带宽也将逐渐变窄。但是, 细度增大, 周期单元尺寸也将略有增大, 使得谐振频率左移。图 12 中曲线变化趋势是多种因素共同影响的结果, 关于更细微的变化关系后续还需大量实验补充说明。

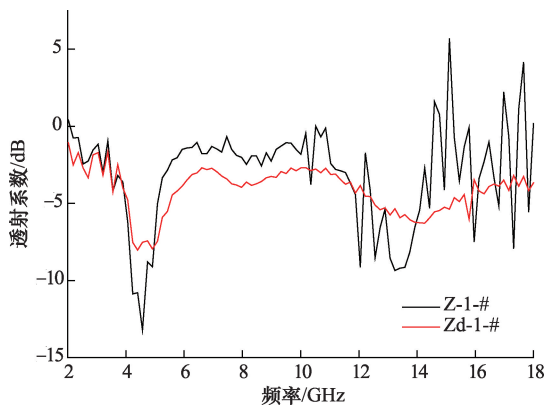


图 11 不同导电材料样品的透射系数

Fig. 11 Transmission coefficients of samples with different conductive materials

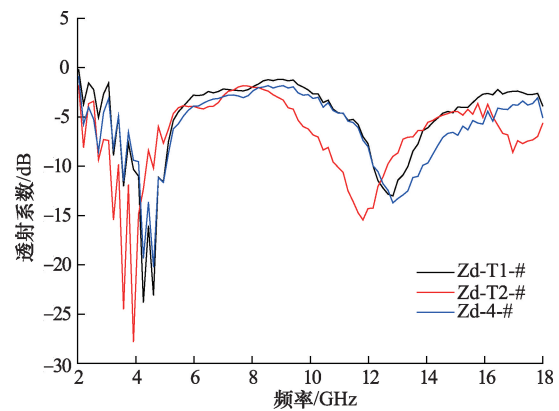


图 12 不同细度纱线样品的透射系数

Fig. 12 Transmission coefficients of samples with different linear densities of yarns

2.4 纱线细度对频响性能的影响

使用细度为 1005 dtex (10 股)、1630 dtex (16 股)、2255 dtex (22 股) 的镀银长丝作为导电结构单元材料, 分别制作样

2.5 簇集 U 型立绒十字体 3D FSF

以单个 U 型立绒为基础织造而成的、由多个簇集 U 型立绒构成的十字体立体导电结构单元织物 (图 5), 同样具有良好的频率选择通透性, 如图 13 所示。该结构与图 4 所示的独

立U型立绒结构不同。图4由单个U型立绒作为导电结构单元周期排列而成;而图5则是由许多U型立绒簇集排列而形成的较大尺寸的立绒周期结构,并可以形成预定的单元结构,如圆柱体、正方体等单元结构。已有实验验证了采用U型立绒结构制备各种不同单元结构的3D FSF的可行性。

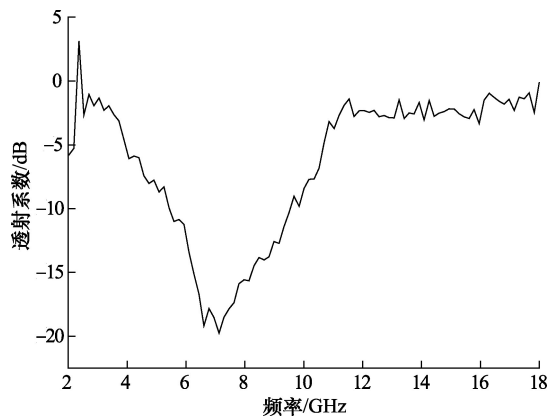


图 13 簇集U型立绒十字形样品的透射系数

Fig. 13 Transmission coefficients of U velvet samples with cross-shape periodic structure

3 结论

1) U型立绒周期结构织物具有良好的频率响应性能,其U型单元底部连接方式和长度对频率响应性能影响显著。当U型底部被剪断时不能产生谐振;随着底部长度的增加,谐振频率向低频移动。

2) 对于偶极子平面周期结构织物和U型立绒周期结构织物模型样品,随单元长度的增加,谐振频率向低频移动;当平面偶极子周期结构沿两个端点向z轴延伸成空间U型周期结构时,其谐振频点往低频移动,且会出现多频点谐振。

3) 结构单元材料的导电性越好,谐振现象越显著;纱线细度越大,导致周期结构变小,谐振频率向高频移动。

4) 采用U型立绒织造方式可实现由簇集U型立绒构成的十字形结构单元形状立体周期织物。可以推断,同样可以实现圆柱体、三棱柱体等可设计的立体周期结构织物,相关研究需要进一步深入。

参考文献(References)

[1] 施楣梧,肖红,王群.电磁纺织品及纺织品电磁学[J].纺织学报,2013(2):73-80.
Shi Meiwu, Xiao Hong, Wang Qun. Electromagnetic textiles and textile electromagnetism[J]. Textile Journal, 2013(2): 73-80.

[2] 徐欣欣,王群,唐章宏,等.频率选择表面纺织材料应用[J].安全与电磁兼容,2015(2):55-58.
Xu Xinxin, Wang Qun, Tang Zhanghong, et al. Application of frequency selective surface textile material[J]. Safety and Electromagnetic Compatibility, 2015(2): 55-58.

[3] Cavalcante G A, D'Assunção A G. An iterative full-wave method for

designing bandstop frequency selective surfaces on textile substrates[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2014, 56(2): 383-388.

[4] Guan F W, Shi M W. Fabrication method and application research of frequency selective fabric(FSF) [C]//The 89th Textile Institute World Conference. Wuhan China, Wuhan Textile University, 2014: 1015-1019.

[5] Guan F W, Xiao H, Shi M W, et al. The novel frequency selective fabric and application research[J]. Journal of Industrial Textiles, 2015, 11(9): 1-17.

[6] Seager R D, Chauraya A, Bowman J, et al. Fabric based frequency selective surfaces using weaving and screen printing[J]. Electronics Letters, 2013, 49(24): 1507-1509.

[7] Tennant A, Hurley W, Dias T. Experimental knitted, textile frequency selective surfaces[J]. Electronics letters, 2012, 48(22): 1386-1388.

[8] Tennant A, Hurley W, Dias T. Knitted, Textile. High impedance surface with integrated conducting vias[J]. Electronics Letters, 2013, 49(1): 8-10.

[9] Chauraya A, Seager R, Whittow W, et al. Embroidered frequency selective surfaces on textiles for wearable applications[C]// Antennas and Propagation Conference (LAPC), 2013 Loughborough. IEEE, 2013: 388-391.

[10] 吕志蕊,唐章宏,徐欣欣,等.柔性频率选择表面的制备和传输特性[J].安全与电磁兼容,2014(4):79-81.
Lü Zhirui, Tang Zhanghong, Xu Xinxin, et al. Preparation and transmission characteristics of flexible frequency selective surfaces[J]. Safety and Electromagnetic, 2014(4): 79-81.

[11] Chauraya A, Whittow W G, Vardaxoglou J C, et al. Inkjet printed dipole antennas on textiles for wearable communications[J]. Microwaves, Antennas & Propagation, IET, 2013, 7(9): 760-767.

[12] Whittow W G, Chauraya A, Vardaxoglou J C, et al. Inkjet-printed microstrip patch antennas realized on textile for wearable applications [J]. Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, 2014, 13: 71-74.

[13] Lee I G, Hong I P. 3D Frequency selective surface for stable angle of incidence[J]. Electronics Letters, 2014, 50(6): 423-424.

[14] Azemi S N, Ghorbani K, Rowe W S T. 3D frequency selective surface with incident angle independence[C]//Microwave Conference (EuMC), 2013 European. IEEE, 2013: 928-931.

[15] Pelletti C, Mittra R, Bianconi G. Three-dimensional FSS elements with wide frequency and angular response[C]//Electromagnetic Theory (EMTS), Proceedings of 2013 URSI International Symposium on. IEEE, 2013: 698-700.

[16] Li B, Shen Z. Three-dimensional bandpass frequency selective Structures[C]//Electromagnetic Theory (EMTS), Proceedings of 2013 URSI International Symposium on. IEEE, 2013: 687-690.

[17] Xiao H, Shi M W, Wang Q, et al. The electromagnetic shielding and reflective properties of electromagnetic textiles with pores, planar periodic units and space structures[J]. Textile Research Journal, 2014, 84(16): 1679-1691.

[18] 程焕焕,肖红,施楣梧,等.基于立绒和毛圈周期结构的频率选择立体织物:中国,201510856871.8[P].
Cheng Huanhuan, Xiao Hong, Shi Meiwu, et al. Frequency selective fabric based on the periodic structure of terry and velvet: China, 201510856871.8[P].

[19] 肖红,程焕焕,施楣梧,等.具有频率选择透通性的立体周期结构织物及其制备方法:中国,201510970380.6 [P].
Xiao Hong, Cheng Huanhuan, Shi Meiwu, et al. Three dimensional

- periodic structure fabric with transparency frequency selection and preparation method: China, 201510856871.8[P].
- [20] 施楣梧, 王群. 电磁功能纺织材料[M]. 北京, 科学出版社, 2015.
Shi Meiwu, Wang Qun. Electromagnetic functional textile materials[M]. Beijing, Science Press, 2015.
- [21] Cheng H H, Xiao H, Jia W F. Study on frequency response characteristics of three-dimensional FSS fabric[C]//The 89th Textile Institute World Conference. Wuhan China, Wuhan Textile University, 2014: 1011-1014.
- [22] Cheng H H, Xiao H, Shi M, et al. Research on 3D periodic structure velvet fabric and its frequency response characteristics[J]. Textile Research Journal, 2015(8): 1-9.

Exploration of 3D periodic structure frequency selective fabric based on U-taped velvet

XIAO Hong¹, CHENG Huanhuan², SHI Meiwu¹, GUAN Fuwang², WANG Yajing², WANG Qun³, TANG Zhanghong³

1. The Quartermaster Research Institute of the General Logistics Department of the PLA, Beijing 100082, China
2. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China
3. College of Material, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract This paper has prepared a three-dimensional periodic structure frequency selective fabric (3D FSF) based on U velvet by velvet weaving method, with the silver yarns as the conductive material. Compared with the planar dipole periodic structure with the same U velvet bottom length size, the U velvet of the 3D FSF is extended in the two ends of the dipole along the Z direction and has double frequency resonance in the 2 ~ 18GHz. With the increase of the U velvet bottom length, the resonant frequency moves to the lower frequency. The number of U connectings does not affect the resonant frequency with the same bottom length. The resonance peak of the sample with silver fiber as the conductive material is sharper than that of the sample with stainless steel fiber as conductive material. For further study, a cross-shaped 3D FSF made of clustered U velvet unit is proposed. It is demonstrated that the design and control of the 3D FSF is very flexible.

Keywords U-taped velvet fabric; 3D periodic structure; frequency selective fabric; 3D textile

(编辑 韩丹岫)