

纺织贴片天线成型技术的研究进展

晋 艺^{1a,1b} 杨旭东^{1a,1b} 胡吉永^{1a,1b} 孟粉叶²

1. 东华大学, a. 纺织学院; b. 纺织面料技术教育部重点实验室, 上海 201620;
2. 嘉兴职业技术学院, 浙江 嘉兴 314000

摘要: 深入探讨一体化纺织贴片天线的制备方法, 重点关注导电材料和基底材料的选择、刺绣技术与机织技术在纺织贴片天线中的应用。概述 2 种制备方法的原理以及制备工艺对天线性能的影响, 同时总结了纺织贴片天线在不同应用场景下的相关研究。指出 2 种制备方法未来的研究方向和面临的挑战。

关键词: 刺绣技术; 机织技术; 纺织贴片天线; 一体化成型

中图分类号: TN 82

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2024)07-0011-08

Research progress of textile patch antennas forming technology

Jin Yi^{1a,1b}, Yang Xudong^{1a,1b}, Hu Jiyong^{1a,1b}, Meng Fenyue²

- a. College of Textiles; b. Key Laboratory of Textile Science and Technology, Ministry of Education,
1. Donghua University, Shanghai 201620, China;
 2. Jiaxing Vocational & Technical College, Jiaxing 314000, Zhejiang, China

Abstract: The preparation methods of integrated textile patch antennas were discussed, focusing on the selection of conductive materials and substrate materials, and the application of embroidery technology and weaving technology in textile patch antennas. The principles of two preparation methods and the influence of the preparation process on the performance of the antennas were summarized. At the same time, the related research of the textile patch antennas in different application scenarios was summarized. The future research directions and challenges of the two preparation methods were pointed out.

Keywords: embroidery technology; weaving technology; textile patch antenna; integrated forming

随着无线通信、物联网和可穿戴技术的蓬勃发展, 一体化织物天线作为电子器件与纺织品的结合体, 日益成为研究的热点。传统金属天线由于材料刚性大、质量大且不易弯曲, 难以满足现代社会对轻量化、柔性化可穿戴式智能设备的需求, 而机织和刺

绣技术的兴起为这一难题提供了新的解决方案。纺织天线的研究始于对通信设备小型化和柔性化的需求。随着科技的不断推进, 纺织天线的应用范围已逐渐拓展至智能服装、医疗监测、军事通信等多个领域。而将导电材料融入纺织品的这一创新方法, 为

基金项目: 上海市自然科学基金(22ZR1400800)

收稿日期: 2024-03-07

作者简介: 晋艺, 男, 2000 年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为纺织贴片天线

通信作者: 胡吉永, 教授, hujy@dhu.edu.cn

纺织天线的制备提供了新的思路和解决方案。

纺织贴片天线可通过机织、刺绣、针织等技术实现一体成型,但现有研究中有关针织技术制备纺织贴片天线的相关报道较少,且针织技术多用于柔性传感器的开发^[1]。故本文仅对机织和刺绣技术制备的纺织贴片天线展开综述。机织技术巧妙地将导电纤维织入织物结构中,实现了天线的柔性化和一体化设计。刺绣技术则巧妙地将导电线材刺绣在织物上,实现了天线形状和电气性能的高度定制。Tsolis 等^[2]总结了刺绣天线过去几十年的发展,并将其与其他制备技术进行了比较。El Gharbi 等^[3]概括了柔性天线的开发和设计要点,并介绍了柔性天线传感器在人体应用方面的实例。冯源等^[4]通过引用多个不同的案例详细介绍了刺绣技术在智能纺织品中的应用,并论述了刺绣技术的重要性及其面临的技术挑战。Salonen 等^[5]使用不同的导电织物和针织羊毛织物制备多种天线,研究导电材料对天线性能的影响,发现由铜带与基底胶合制备的天线性能最差。Patron 等^[6]设计了一种适用于可穿戴生物医学领域的针织传感器,其能分析收缩、呼吸和肢体等运动。

尽管机织和刺绣纺织贴片天线研究取得了显著的进展,但也面临一系列挑战和待解决的问题,如导电纤维的稳定性、天线性能的一致性、制备的成本,以及与织物的结合强度等。现有研究中不乏有关天线材料和制备工艺对天线应用性能影响的讨论和分析。本文将总结材料的选择和工艺对机织和刺绣贴片天线性能的影响,概述纺织贴片天线制备研究进展和未来的发展方向,以期为该领域的研究提供参考。

1 纺织贴片天线材料

1.1 导电材料

目前,纺织贴片天线用导电材料有多种类型可以选择。有效的导电模式及良好的导电性,对于确保天线工作性能十分重要。通过机织技术制备纺织贴片天线的导电材料有镀铜导电纱或铜制品、镀银导电纱及其他复合导电纱等。刺绣过程对材料的弯曲性能要求较高,因此刺绣贴片天线对导电纱线的力学性能要求更严格。另有研究曾使用石墨烯^[7]

作为纺织天线的导电材料,与普通金属材料相比,石墨烯材料能在电学性能达到要求的同时具有良好的力学性能,未来有望用于多个领域。此外,高变形可持续性的导电材料是确保纺织贴片天线性能的关键。在不损害天线性能的前提下,可通过掺杂导电材料提高天线的导电性,满足实际应用中的机械变形和外界环境,如嵌入银纳米线的硅胶^[8]、含液态金属的可伸缩衬底^[9]以及可伸缩织物本身^[10],它们既具有导电性又具有一定的可拉伸性,适用于微带贴片天线。表 1 归纳了部分制备纺织贴片天线的导电材料的电导率。在相关研究中,镀银导电纱和镀铜导电纱的使用频率较高,所制备的天线电学性能良好。也有研究将导电高分子材料制备的纱线用作天线的导电材料,其优点是柔软、可穿戴性好,缺点是化学稳定性差。

表 1 部分导电材料的电导率

Tab. 1 Conductivity of partial conductive materials

材料名称	电导率/(S·m)	参考文献
纳米银颗粒	2.2×10^7	[11]
纳米铜颗粒	1.0×10^6	[12]
聚(3,4-亚乙二氧基噻吩)-聚(苯乙烯磺酸)	$1.0 \times 10^2 \sim 1.5 \times 10^3$	[13]
聚苯胺	5.0	[13]
聚吡咯	$4.0 \times 10 \sim 2.0 \times 10^2$	[13]
碳纳米管	$4.0 \times 10^3 \sim 7.0 \times 10^3$	[14]

1.2 基底材料

涤纶作为一种常用的纺织贴片天线基底材料,其介电特性受到了广泛关注。Ouyang 等^[15]采用谐振腔技术对多种纺织材料的介电特性进行测试。结果显示,11.4 GHz 频率时,纯涤纶的介电常数为 1.90,介电损耗正切为 4.5×10^{-3} 。此外,也有研究者探究了棉和涤棉混纺织物用作天线基底材料的可行性。文献[16]对棉的介电特性进行了分析,发现在 2.60~3.95 GHz 频率范围内,棉的介电常数为 1.60,介电损耗正切为 4.0×10^{-2} 。与涤纶相比,两者介电损耗差异显著,相差约 1 个数量级。这种差异不仅源于两者化学成分的不同,还与棉回潮率大有关,因为棉吸水后介电常数和介电损耗都有所增加。

纺织材料吸水后介电性能会受到一定的影响,这是因为水分子能吸收和散射电磁波,从而引发信号衰弱和多径效应,使天线的辐射效率降低。因此,

在考虑纺织材料本身介电性能的同时也要兼顾其吸水性。部分纺织材料介电常数与介电损耗正切如表 2^[17]所示。一般情况下,回潮率较低的纺织材料更易受到相关研究者的青睐,这与其吸水较少,受水分子影响较小有关。

表 2 部分纺织材料的介电性能

Tab. 2 Dielectric properties of partial textile materials

材料名称	介电常数(ϵ)	介电损耗正切($\tan \delta$)
棉	1.60	4.0×10^{-2}
涤纶	1.90	4.5×10^{-3}
蚕丝	1.75	1.2×10^{-2}
羊毛毡	1.38	2.3×10^{-2}
聚四氟乙烯	2.05	1.7×10^{-3}
聚二甲基硅氧烷	2.65	2.0×10^{-2}

2 刺绣技术在一体化纺织贴片天线中的应用

2.1 刺绣贴片天线设计原理

刺绣技术已经历相当长时期的发展,其运用针线在织物表面创造各种精美的装饰图案。电脑绣花机的工作原理如图 1 所示。制作刺绣贴片天线,首先需利用电脑刺绣制版软件设计天线的结构图案,随后电脑绣花机精确地将预设的结构图案通过底线与面线的交织固定于织物表面。导电纱线可作为底线或面线使用,其中面线由绣花机外部线轴引出。刺绣效果的影响因素包括针迹类型、针迹间距、针迹长度、刺绣张力等工艺参数,它们进而决定了绣制导体的电学性能,以及最终天线的性能。

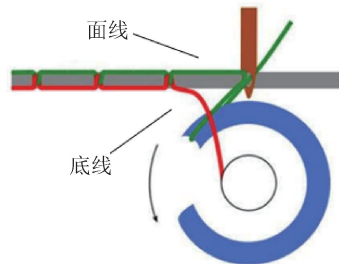


图 1 电脑绣花机工作原理

Fig. 1 Working principle of computer embroidery machine

2.2 刺绣工艺对天线性能的影响

导电织物中,电流流向主要遵循导电纱线设定的路径,而非在相邻纱线间跳跃式传导,特别是当纱线间隔较宽时,这一现象尤为明显^[18]。受针迹类型

变化影响,电流流向与导电纱线排列方向通常表现为平行、垂直或呈特定角度,如图 2a)所示。有研究^[19]指出,当导电纱线排列方向与电流流向一致时,刺绣传输线导电性能更优、传输损耗更低。

针迹间距即 2 个相邻平行针脚之间的距离,用 S 表示^[20],如图 2b)和图 2c)所示。针迹间距的缩小能促使相邻导电纱线之间接触紧密,从而提升刺绣天线的表面连续性,增强其导电能力。但过小的针迹间距可能导致导电纱线之间重叠并相互干扰,从而增加刺绣天线的电阻^[21]。针迹长度即针迹运动方向上 2 个针尖之间的距离,用 L_s 表示^[20],如图 2b)和图 2c)所示。当刺绣天线长度一致时,刺绣天线中针迹结点的数量会直接因针迹长度的改变而改变,进而影响底线和面线与织物基底的结合状态。较短的针迹长度有助于纱线与织物基底的紧密结合,提高表面平整度,但可能增加断线的风险;较长的针迹长度可能导致线圈松弛,使天线表面产生皱褶,影响其性能。理想的针迹长度应确保导电纱线能平整地贴合在织物基底上,同时减少导电纱线的用量,并在刺绣过程中降低断线和断针的可能性。刺绣工艺参数对天线性能影响的相关研究结论列于表 3^[19-22]。

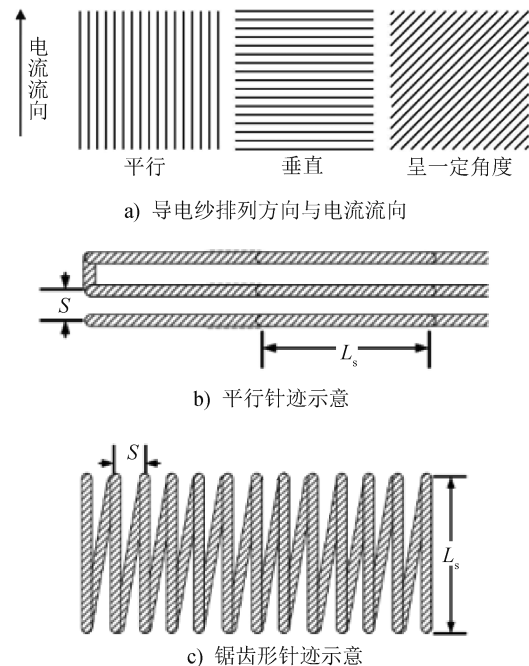


图 2 针迹类型和刺绣工艺参数

Fig. 2 Stitch types and embroidery process parameters

2.3 刺绣贴片天线的应用性能

有学者研究了人体穿着集成天线的服装时,天

表 3 刺绣工艺参数对天线性能的影响

Tab. 3 Influence of embroidery parameters on antenna performance

刺绣参数	影响
针迹类型	导电纱排列方向与电流流向平行时, 天线电学性能最佳
针迹间距	针迹间距越小, 天线谐振频率的偏差越大
针迹长度	当针迹长度在 0.7~2.0 mm 时, 织物基刺绣天线的反射性能好
刺绣张力	天线电阻随刺绣张力而波动, 但影响不显著

线在不同弯曲状态下的性能。Çelenk 等^[23]提出了一种适用于无线局域网(WLAN)的紧凑型双波段超材料贴片天线,其导电部分采用镀银导线,基底材料采用涤纶织物。二次监视雷达(secondary surveillance radar, SSR)阵列和贴片天线采用刺绣的方式生产。通过将天线固定在圆柱形表面模拟实际弯曲情况,进行电学性能测试。为探究织物贴片天线的保形性,Wang 等^[24]在研究中将试样固定于圆柱形表面,相关的天线结构和试验测试装置如图 3 所示。试验数据显示,弯曲作用使得天线的谐振频率从 2.20 GHz 降至 2.06 GHz,且增益也减少至 2.7 dB。这种谐振频率和增益的降低主要是天线弯曲导致尺寸变化所致。Shakhirul 等^[25]对刺绣天线的回波损耗、表面电流分布进行了测试,并模拟了天线的增益。结果显示,在 20°、60°和 70°的弯曲角度下,天线表现了良好的阻抗匹配性能,其中弯曲角度为 60°时阻抗匹配效果最佳。Xu 等^[26]在研究中以纯棉牛仔布作为基底材料,并利用刺绣技术制作了信号传输线。其通过控制针迹类型和针迹间距等刺绣工艺参数,以及对传输线施加机械外力作用,测试了传输线的直流电阻、阻抗及散射参数等电气特性的变化。结果表明,传输线的直流电阻值和高频下的电气参数在弯折后有所增加,其中拉伸弯折对性能的影响更为显著。

就日常使用的电子纺织品而言,辐射对人体的影响是不可忽视的。Wang 等^[27]提出了一种可在全球移动通信系统(GSM)、个人通信服务(PCS)和 WLAN 这 3 个频段工作的柔性可穿戴多波段天线,其采用自动刺绣技术完成了导电部分与基底材料的结合,所得天线能在 3 个频段实现 2 dBi 的良好增益。实测的辐射图也证实了预期的全向性。此外,他们还探究了人体对天线性能的影响,得出当天线

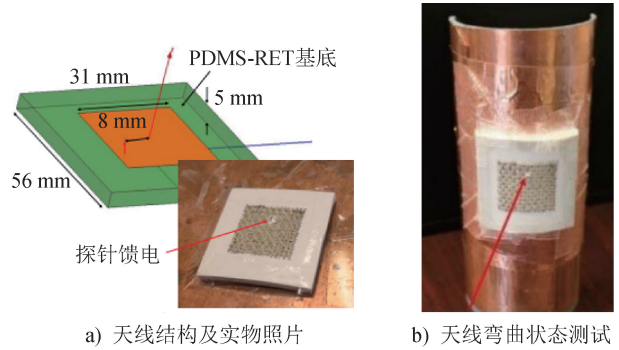


图 3 刺绣贴片天线及其弯曲性能测试

Fig. 3 The embroidery patch antenna and its bending performance test

位于人体肩部时,能获得良好的辐射特性。上述相关研究的结果及结论归纳于表 4 中。

表 4 天线性能随应用环境的变化

Tab. 4 Performance of antenna changed with application environment

应用环境	工作频段/GHz	研究结果/结论
弯曲	5	弯曲使回波损耗的最低值降低
弯曲	2.2	弯曲导致刺绣天线尺寸改变,谐振频率向低频偏移
弯曲	3.1~10.6	弯曲导致刺绣结构织物尺寸变化,增益降低
弯折	0.2~0.8	弯折程度越大,传输线直流电阻越大
近人体	0.85~0.90	天线与人体组织距离大于 10 mm 时可减少辐射

有学者通过改变天线的材料使其具有更好的鲁棒性,还研究了不同外界条件下天线的性能表现。Kakani 等^[28]制备了一款军用多波段纺织天线,并被集成到军用背心表面。该天线导电部分采用银纳米线,衬底采用聚二甲基硅氧烷(PDMS),整体通过刺绣技术而成形。天线测试结果显示,在所需频率范围内其反射系数低于-10 dB,故该方案具有一定的可行性。PDMS 具有防水、透明、热稳定等特性,且导电材料(NCS95R-CR)是一种尼龙防裂织物,这使得天线在实际使用时具有较好的耐用性和耐洗性。Ilyas 等^[29]选取了 5 种纺织材料,并使用微带贴片辐射器方法测试了纺织材料的介电常数,再通过仿真模拟得出不同材料的相关参数。结果表明,贴片的附着方式、环境的湿度以及天线的形变等均会影响天线的谐振频率。

3 机织技术在一体化纺织贴片天线中的应用

3.1 机织贴片天线设计原理

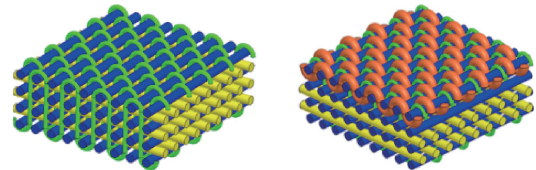
机织贴片天线的基本设计原理在于将导电性能优良的纤维或纱线嵌入织物结构中,形成一体化的导体。其中,导电材料通过精心设计,被编排成天线的基本组成部分,包括辐射元、介质基板和地板元件等。且设计过程中需考虑所需的工作频率,并通过调整导电纤维的长度或布局实现天线的调谐。此外,为了确保天线的灵活性和适应性,需优化织物的结构,以平衡导电材料的集成与织物的力学性能。

阻抗匹配是确保导电材料与连接电路之间无缝匹配,从而最大程度地传递信号的关键因素之一。此外,考虑到机织天线在实际使用中的耐久性和可穿戴性,需确保导电材料能够适应织物的形变,从而保障天线的稳定运行。综合而言,机织贴片天线通过巧妙地融合导电材料和织物结构,实现了天线的一体化,并在保持电气性能的同时兼顾了织物的舒适性和力学性能。

3.2 机织工艺对天线性能的影响

Nguyen 等^[30]深入研究了平纹织物中导电层的织造参数对天线性能的影响机理,发现导电层厚度和导电纱线间距共同影响天线的谐振频率和增益等电学性能。使用较粗的导电纱线增大织物的紧度有助于提升天线性能。Xu 等^[31]进一步探讨了 2 种不同的三维机织结构(图 4,即导电纱线在辐射单元中以平纹组织交织,或呈伸直状态)对天线性能的影响。结果显示,导电纱线以平纹结构交织的辐射单元由于其中的导电纱线呈弯曲状,天线辐射性能不及导电纱线伸直的辐射单元,因此采用导电纱线伸直的三维机织天线性能更好。还有 Yao 等^[32]引入了“径空比”的概念,用以描述导电纱线间距与直径的比值。研究指出,当径空比超过 1/4 时,天线的驻波比随着径空比的增加而增加,这将导致增益减小。此外,天线性能还受纺织导电层中织物组织结构的影响。平纹组织织物因简单且正反面组织结构完全相同的特性,被广泛用作纺织贴片天线的导电布。Ouyang 等^[33]发现,缎纹组织织物作为微带天线的导电层时,织物正反面的放置会影响天线的性能。该缎纹织物的经纱和纬纱分别采用导电纱线和非导

电纱线,并形成了一面导电纱线多而另一面导电纱线少的结构。测试结果显示,当导电纱线较少的一面朝上时,天线的效率比导电纱线较多的一面朝上时的高 9.6%。表 5^[34-36]总结了部分因素对纺织贴片天线性能的影响。



a) 导电纱线以平纹结构交织 b) 导电纱线呈伸直状态

图 4 2 种三维机织结构

Fig. 4 Two kinds of 3D woven structures

表 5 影响机织贴片天线性能的因素

Tab. 5 Factors affecting performance of woven patch antenna

影响因素	影响结果
导电纱线材料	材料电导率高,则天线的辐射效率高
织物组织	当导电纱线方向与电流流向平行时,导电织物电阻小,辐射效率高
导电纱线线密度	线密度越大,导电纱线间距越小,传输性能越好
经纬纱密度	经纬纱密度过大,则天线整体辐射效率受影响

3.3 机织贴片天线的应用性能

采用机织技术可织造出不同纺织结构的天线,例如三维机织正交结构天线、三维机织间隔结构天线等。有学者对机织贴片天线的力学性能,以及位于人体不同部位不同弯曲状态时的天线性能进行了研究。杨晓冬等^[37]基于对称结构的天线设计原理,并利用微带贴片天线的单向辐射特性,创新性地设计了 2 款水平全向共形微带天线,分析和比对了 2 款天线的仿真模拟和实测结果,验证了这种天线可以满足全向性的设计要求。戴福洪等^[38]采用一种独特的埋入式微带天线蜂窝夹层结构,巧妙地将微带天线整合进复合材料的夹层结构中,创新性设计出一种共形承载一体化的蒙皮天线。这种天线不仅具备高增益和低损耗的特点,还展现了卓越的力学性能。但这种蜂窝夹层结构在最终承受力破坏时可能会出现分层现象,故其整体结构的稳定性仍需进一步增强。Xu 等^[39]研制了曲率半径分别为 25、45、60 及 75 mm 的圆柱形共形单

贴片天线,以模拟人体躯干、肩膀或手臂等部位的共形条件,贴片和地织物采用铜丝编织,三维正交织物采用E玻璃纱编织,天线弯曲状态如图5所示。回波损耗测试结果显示,这些天线的谐振频率即使在25 mm的低曲率半径下也是稳定的,这与三维织物稳定的结构有关。

Ashar等^[40]致力于开发可穿戴用超宽带柔性天线。其使用2种类型的介电材料——基于聚酰胺的Cordura织物和FR4基板,并利用圆柱形结构对天线进行X轴(从5°到25°)和Y轴(从5°到25°)方向不同倾角的弯曲,发现所设计的天线都可在弯曲状态下工作。

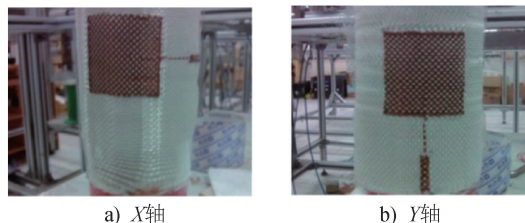


图5 天线弯曲状态

Fig. 5 Antenna bended states

这些天线通常将导电线或导电纤维织入或嵌入纺织品内部或表面,以实现无线通信和电磁波的接收或发送功能。表6^[41-43]总结了一些机织贴片天线的相关研究结果。

表6 机织贴片天线的相关研究结果

Tab. 6 Research results on woven patch antennas

机织天线结构	天线谐振点/GHz	研究结果
4层机织天线	1.5	天线在-10 dB的带宽为40 MHz,回波损耗为-13.51 dB,接收信号性能良好
三维机织天线	1.5	纱线间距和铜丝纱直径的比值越大,则回波损耗越大,谐振频率越小
三维机织天线	1.5	冲击对驻波比无显著影响,但平纹结构会使天线辐射方向发生偏移
单层机织天线	2.4	不同金属涂层导电机织物制备的不同结构天线在-10 dB的带宽均大于200 MHz

姚澜等^[44-45]将天线三维预制件融入复合材料中,研究了冲击破坏对共形天线电磁性能的影响。他们不仅分析了复合材料天线的介电特性,还成功地将三维正交机织复合材料与天线技术相结合,设计出一种既能承受力又能发射和接收电磁波的多功能载体。Ferreira等^[46]设计了一款基于牛仔布的采用镀铜和镀镍聚酯织物作为辐射元件的贴片天线,专为WLAN频段设计。其通过使用不同曲率半径的圆柱体模拟天线在人体不同位置的弯曲状态,研究了天线在长度和宽度方向上的弯曲对天线性能的影响。结果显示,弯曲会导致天线增益降低,而带宽基本保持不变。

4 总结与展望

本文基于对机织和刺绣技术在纺织贴片天线领域研究进展的概括,分析了这2种制备方式的原理及工艺,发现机织技术可以实现天线的柔性化,适应性强,且生产效率高;刺绣技术凭借其高度可控性和创新性在织物表面形成精细的导电图案,为纺织天线的设计提供新的可能性。然而,这2种技术仍需解决一致性、稳定性、成本和结合强度等方面的问题。

未来,深入研究导电纤维,并结合先进的制备技术和材料工程,有望推动纺织天线的进一步发展。机织和刺绣技术作为一种创新且具前景的制备手段,将为纺织天线带来更多新的可能性和机遇。



期刊采编平台

中国知网下载

参考文献

- [1] 魏志伟,孟家光. 智能针织产品的研究现状及发展趋势[J]. 纺织科技进展, 2022(5): 9-13.
- [2] TSOLIS A, WHITTOW W, ALEXANDRIDIS A, et al. Embroidery and related manufacturing techniques for wearable antennas: challenges and opportunities [J]. Electronics, 2014, 3(2): 314-338.
- [3] EL GHARBI M, FERNÁNDEZ-GARCÍA R, AHYOUD S, et al. A review of flexible wearable antenna sensors: design, fabrication methods, and applications [J]. Materials, 2020, 13(17): 3781.
- [4] 冯源,周金利,杨红英,等. 刺绣技术在智能纺织品中的应用进展[J]. 现代纺织技术, 2023, 31(1): 82-91.

- [5] SALONEN P, RAHMAT-SAMII Y, HURME H, et al. Effect of conductive material on wearable antenna performance: a case study of WLAN antennas [C] // Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society Symposium. New York: IEEE, 2004: 455-458.
- [6] PATRON D, MONGAN W, KURZWEG T P, et al. On the use of knitted antennas and inductively coupled RFID tags for wearable applications [J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2016, 10(6): 1047-1057.
- [7] RAVINDRAN A R, FENG C, HUANG S, et al. Effects of graphene nanoplatelet size and surface area on the AC electrical conductivity and dielectric constant of epoxy nanocomposites [J]. Polymers, 2018, 10(5): 477.
- [8] KOPYT P, SALSKI B, OLSZEWSKA-PLACHA M, et al. Graphene-based dipole antenna for a UHF RFID tag [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(7): 2862-2868.
- [9] KUMAR A, SAGHLATOON H, LA T G, et al. A highly deformable conducting traces for printed antennas and interconnects: silver/fluoropolymer composite amalgamated by triethanolamine [J]. Flexible and Printed Electronics, 2017, 2(4): 045001.
- [10] 江涵洋, 杨旭东, 胡吉永. 电子织物信号传输电缆扁平化可拉伸织带结构设计及性能评价 [J]. 产业用纺织品, 2023, 41(9): 23-29.
- [11] PARK M, IM J, SHIN M, et al. Highly stretchable electric circuits from a composite material of silver nanoparticles and elastomeric fibres [J]. Nature Nanotechnology, 2012, 7(12): 803-809.
- [12] SEBASTIAN M T. Microwave materials and applications [M]. New York: John Wiley & Sons, 2017: 203-259.
- [13] WONG W S, SALLES A. Flexible electronics: materials and applications [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2009: 143-149.
- [14] KHAN S, LORENZELLI L, DAHIYA R S. Technologies for printing sensors and electronics over large flexible substrates: a review [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(6): 3164-3185.
- [15] OUYANG Y H, CHAPPELL W J. High frequency properties of electro-textiles for wearable antenna applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(2): 381-389.
- [16] ZHU S Z, LANGLEY R. Dual-band wearable textile antenna on an EBG substrate [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(4): 926-935.
- [17] RUPPERT-STROESCU M, BALASUBRAMANIAN M. Effects of stitch classes on the electrical properties of conductive threads [J]. Textile Research Journal, 2018, 88(21): 2454-2463.
- [18] SEAGER R, ZHANG S Y, CHAURAYA A, et al. Effect of the fabrication parameters on the performance of embroidered antennas [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2013, 7(14): 1174-1181.
- [19] ZHANG S Y, CHAURAYA A, WHITTOW W, et al. Embroidered wearable antennas using conductive threads with different stitch spacings [C] // Proceedings of the Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC). New York: IEEE, 2012: 1-4.
- [20] ACTI T, CHAURAYA A, ZHANG S Y, et al. Embroidered wire dipole antennas using novel copper yarns [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 14: 638-641.
- [21] 王蕊, 胡吉永, 张慧萍, 等. 工艺参数对织物基刺绣传输线的直流电阻的影响 [J]. 产业用纺织品, 2016, 34(5): 6-11.
- [22] 王蕊. 织物基刺绣射频器件的研究 [D]. 上海: 东华大学, 2016.
- [23] ÇELENK E, TOKAN N T. All-textile on-body metasurface antenna [J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2022, 110: 119-131.
- [24] WANG Z Y, ZHANG L L, BAYRAM Y, et al. Embroidered e-fiber-polymer composites for conformal and load bearing antennas [C] // Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. New York: IEEE, 2010: 1-4.
- [25] SHAKHIRUL M S, JUSOH M, SAHADAH A, et al. Embroidered wearable textile antenna on bending and wet performances for UWB reception [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2014, 56(9): 2158-2163.
- [26] XU S S, ZHANG Y Y, HU J Y, et al. Effect of process parameters on S-parameter of fabric-based embroidered transmission line [J]. Journal of Donghua University (English Edition), 2017, 34(6): 736-740.
- [27] WANG Z Y, LEE L Z, PSYCHOUDAKIS D, et al. Embroidered multiband body-worn antenna for GSM/PCS/WLAN communications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(6): 3321-3329.
- [28] KAKANI P N, RAJENDRAN L. Effective military

- communication using multiband wearable antenna [C]// Proceedings of the 6th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES). New York: IEEE, 2021: 459-463.
- [29] ILYAS A K, BUDIASTUTI D, RAHARDJO E T. Effect of textile substrate on antenna performance for GPS application [C]// Proceedings of the IEEE Region 10 Conference. New York: IEEE, 2020: 914-918.
- [30] NGUYEN T M, CHUNG J Y, LEE B. Radiation characteristics of woven patch antennas composed of conductive threads [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(6): 2796-2801.
- [31] XU F J, YAO L, WANG X, et al. Effect of conductive yarn crimp in radiation patch on electromagnetic performance of 3D integrated microstrip antenna [J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(2): 465-470.
- [32] YAO L, WANG X, XU F J, et al. Effect of wire space and weaving pattern on performance of microstrip antennas integrated in the three dimensional orthogonal woven composites [J]. Applied Composite Materials, 2012, 19(1): 21-30.
- [33] OUYANG Y H, KARAYIANNI E, CHAPPELL W J. Effect of fabric patterns on electrotexile patch antennas [C]// Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. New York: IEEE, 2005: 246-249.
- [34] 蔡奇颖. 织物天线材质分析暨 UHFRFID 运用 [D]. 台湾: 南台科技大学, 1996.
- [35] 石丹. 传输线理论在电磁干扰防护技术中的若干应用 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2008.
- [36] KOSKI K, MORADI E, VENA A, et al. Characterization of electro-textiles using wireless reflectometry for optimization of wearable UHF RFID tags [J]. Progress in Electromagnetics Research Symposium, 2013: 1188-1192.
- [37] 杨晓冬, 许波, 白玉, 等. 水平全向共形微带天线的设计 [J]. 微波学报, 2010(增刊 2): 230-233.
- [38] 戴福洪, 王广宁. 埋微带天线蜂窝夹层结构的力电性能分析 [J]. 复合材料学报, 2011, 28(2): 231-234.
- [39] XU S C, HE L L, LI J, et al. Design and study on integrated fabric GPS micro strip antenna [J]. Advanced Materials Research, 2013, 796: 251-254.
- [40] ASHAR D, YADAV A K, SHARMA M. SAR evaluation of flexible UWB antenna for wearable applications [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2312(1): 012051.
- [41] 王昕. 基于三维正交机织复合材料的共形承载微带天线的研究 [D]. 上海: 东华大学, 2009.
- [42] XU F J, YAO L, ZHAO D, et al. Performance and impact damage of a three dimensionally integrated microstrip feeding antenna structure [J]. Composite Structures, 2010, 93(1): 193-197.
- [43] LOCHER I, KLEMM M, KIRSTEIN T, et al. Design and characterization of purely textile patch antennas [J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2006, 29(4): 777-788.
- [44] 姚澜. 三维纺织复合材料为基础的共形承载微带天线及其基板的结构设计和性能研究 [D]. 上海: 东华大学, 2008.
- [45] YAO L, QIU Y P. Design and fabrication of microstrip antennas integrated in three dimensional orthogonal woven composites [J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(7/8): 1004-1008.
- [46] FERREIRA D, PIRES P, RODRIGUES R, et al. Wearable textile antennas: examining the effect of bending on their performance [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2017, 59(3): 54-59.

生态文明你我同心

环境保护你我同行