

1.37 GHz 织物微带贴片天线的设计与制备

晋 艺 刘思浩 杨旭东 胡吉永
东华大学 纺织学院, 上海 201620

摘要:为推动北斗卫星导航系统在可穿戴领域的应用,解决传统硬质天线柔软性不足的问题,基于微带贴片天线设计经验公式,结合 HFSS 软件建模优化以及机织工艺,设计并制备织物微带贴片天线。通过理论计算与参数化仿真,优化贴片几何尺寸得到谐振频率为 1.37 GHz 的天线结构,其谐振点处回波损耗(S_{11})为 -25.45 dB,增益达 5.45 dB,尺寸较优化前缩小了 46.29%。结果表明:采用商业化导电纱与工业化剑杆织机,通过多层接结组织实现了天线辐射元与基板的一体化织造。织物纬密与谐振频率呈显著正相关(相关系数为 0.982),随着织物纬密的增大,谐振点向高频方向偏移且回波损耗减小。研究证实采用商业化导电材料与工业化织造工艺能够制备满足性能要求的柔性织物微带贴片天线。

关键词: 织物微带贴片天线; 制备工艺; 辐射性能; 仿真

中图分类号: TN 82

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2025)07-0001-07

Design and preparation of 1.37 GHz fabric microstrip patch antennas

Jin Yi, Liu Sihao, Yang Xudong, Hu Jiyong

College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China

Abstract: In order to promote the application of Beidou navigation satellite system in the wearable field and solve the problem of insufficient flexibility of traditional hard antennas, based on the empirical formula of microstrip patch antenna design, combined with HFSS software modeling optimization and weaving process, fabric microstrip patch antennas were designed and prepared. Through theoretical calculation and parametric simulation, an antenna structure with a resonant frequency of 1.37 GHz was obtained by optimizing the patch geometric size. The return loss (S_{11}) at the resonant point was -25.45 dB, the gain was 5.45 dB, and the size was reduced by 46.29% compared to pre-optimized version. The results showed that, using commercial conductive yarns and industrial rapier looms, the integrated weaving of antenna radiation elements and the substrate was realized through multi-layer junction structure. The weft density of the fabric had a significant positive correlation with the resonant frequency (with a correlation coefficient of 0.982). As the weft density increased, the resonant point shifted towards higher frequencies and the return loss decreased. The research proves that flexible fabric microstrip patch antennas that meet performance

收稿日期: 2025-01-14

作者简介: 晋艺, 男, 2000 年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为智能纺织品

通信作者: 杨旭东, xdyang@dhu.edu.cn

requirements can be prepared by using commercial conductive materials and industrial weaving processes.

Keywords: fabric microstrip patch antenna; preparation process; radiation performance; simulation

北斗卫星导航系统(Beidou navigation satellite system, BDS)作为我国自主研发的全球卫星导航系统,不仅是国家信息领域重点扶持的战略性新兴产业,更是关乎国家安全与稳定的重大科技工程。目前,BDS已被广泛应用于航空、航天、安全监测、生产生活等诸多领域。如,刘国权等^[1]提出了一种基于北斗卫星导航系统的野外追踪与预警系统设计方案。他们将BDS与蓝牙通信技术结合,并通过试验验证了可穿戴手环在野外追踪和预警方面的有效性。突发情况下,该系统能够迅速启动报警并及时向管理人员传递相关定位信息,有效缩短救援反应时间和搜寻时间。广州华夏汇海科技有限公司^[2]基于BDS研发出一种穿戴式跑步考试装置,并对其结构进行了优化。该装置能够实时监测用户位置,并将数据传输至教练的移动终端。它突破了传统装置的局限,提高了跑步测试的准确性,增强了指导效果,且使用便捷。随着BDS的持续推进,市场对用户终端设施的需求日益增长。天线作为接收和发射电磁信号的关键终端设施,其相关设备技术进步面临外形适配性欠佳和柔软性不足的问题。目前,对应用于北斗频段天线的研究主要集中在天线的小型化^[3]、多频段^[4]和圆极化^[5]等方面。当前,应用于北斗频段的的天线多采用硬质材料制备,柔软性不足,而可穿戴织物则具备这方面的优势。应用于北斗频段的的可穿戴织物除了需具备信号传输这一基本功能外,还应具有良好的佩戴舒适性,能够与人体共形。因此,深入开展应用于北斗频段天线的织物研究显得尤为必要。

目前,可用作纺织天线的导电材料品种众多,如镀铜导电纱、铜丝、镀银导电纱及其他复合导电纱等。通过机织技术可将它们织制成纺织天线。Salonen等^[6]采用不同的导电织物和针织羊毛织物制作出多种纺织天线,并探讨了导电材料对天线性能的影响。结果显示,以编织铜布作为辐射部分的的天线阻抗匹配良好,并且带宽更宽。另有研究者探讨了将棉织物和涤棉混纺织物用作天线基

底的可行性。Zhu等^[7]对棉的介电性能进行分析发现,在2.60~3.95 GHz的频率范围内,棉的介电常数为1.6,介电损耗正切值为 4.0×10^{-2} ,与涤纶相差约一个数量级。这种介电性能的差异不仅源于两者化学成分的不同,还与棉的高回潮率密切相关。棉吸水后,介电常数和介电损耗将有所增加。因此,在选择织物天线的基底材料时,为实现织物天线性能的稳定,纤维原料优先选择回潮率低的涤纶。Nguyen等^[8]探究了平纹织物中导电层织造参数对天线性能的影响机制,发现导电层厚度和导电纱线间距影响天线的谐振频率和增益等电学性能,且在保持纱线排列密度不变时,使用较粗的导电纱线能够增大织物紧度,提升天线性能。另有学者^[9]探讨了平纹结构辐射单元(导电纱线在辐射单元中以平纹组织交织)和导电纱线伸直辐射单元(导电纱线为伸直状态)这2种辐射单元结构对天线性能的影响。试验结果显示,平纹结构辐射单元因导电纱线弯曲,其天线辐射性能不及导电纱线伸直辐射单元的天线,即采用伸直的导电纱线制备机织天线性能更好。

本文致力于将天线结构全织物化,旨在解决工作于北斗频段的的可穿戴天线柔软性差、佩戴舒适性欠佳的问题。研究先以微带贴片天线设计的经验公式为基础,借助有限元分析方法,设计织物微带贴片天线结构;然后结合织造工艺,采用多层接结组织将导电纱线织制成导电网络,构造天线的辐射单元部分,接地面则采用导电织物层合工艺与天线相结合;最后,探究织物纬密对织物微带贴片天线阻抗匹配的影响。研究旨在推动织物天线一体化成型技术的进一步发展。

1 织物微带贴片天线的设计与制备

1.1 参数设计

设计织物微带贴片天线时,考虑将辐射单元(贴片部分)的形状设计成矩形。因为矩形辐射单元既能满足天线的性能要求,又具有操作工艺简便

的优势,更适合实际生产。

天线尺寸可根据微带贴片天线设计的经验公式计算获得^[10-12]。基于天线工作频率 1.37 GHz,设计辐射单元各部分几何结构的尺寸。

织物微带贴片天线的贴片宽度理论计算式如式(1)所示^[13]。

$$W_p = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

式中: W_p 为贴片宽度,mm; c 为光速, $c=3 \times 10^8$ m/s; f_r 为谐振点, $f_r=1.37$ GHz; ϵ_r 为织物材料的介电常数。

贴片长度 L_p 取决于介质层的等效介电常数和边缘延伸尺寸。其中,等效介电常数的计算式如式(2)所示,边缘延伸尺寸根据式(3)计算。

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \times \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: ϵ_{reff} 为织物材料的等效介电常数; h 为介质层厚度,mm; W 为基板宽度。

$$\Delta L = 0.412 \times \frac{\epsilon_{\text{reff}} + 0.3}{\epsilon_{\text{reff}} - 0.258} \times \frac{W + 0.264h}{W + 0.8h} \quad (3)$$

式中: ΔL 为边缘延伸尺寸。

贴片长度 L_p 的计算式如式(4)所示。

$$L_p = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} - 2\Delta L \quad (4)$$

微带贴片天线采用 50Ω 阻抗系统,设定天线的输入阻抗为 50Ω , $1/4$ 波长转化器的特性阻抗 (Z_c) 的计算式如式(5)所示。

$$Z_c = \sqrt{Z_{\text{in}} \times Z_L} \quad (5)$$

式中: Z_{in} 为输入阻抗; Z_L 为负载阻抗。

1.2 仿真

本文使用 HFSS 软件进行天线的建模。HFSS 软件是一款功能强大的三维电磁场仿真软件,被广泛应用于高频电磁场仿真领域。其基于有限元方法,能够精准实现对复杂天线结构的建模与仿真分析,从而为天线的设计与性能评估提供有力的技术支撑。求解类型选择模式驱动求解,将天线基板设置为长方体,辐射体部分、地板和端口激励设置为平面矩形,通过软件中的“Unite”功能将贴片、 $1/4$ 波长转换器和馈线结合成辐射片整体。在建立立体几何模型的同时,设置模型材料属性和尺寸,取天线基板厚度为 0.90 mm、介电常数为

1.20、介电损耗正切值为 0.0085 ^[14]。将辐射体部分和地板设置为完美电导体,以避免导电材料自身介电损耗对仿真结果的影响。最后,点击“Create Region”按钮生成空气盒子,选择“Absolute Offset”,设定空气盒子与天线模型之间的最小距离值大于工作频率波长的 $1/4$,并添加边界条件为“Radiation”。设置端口阻抗为 50Ω 、求解频率为 1.37 GHz、求解范围为 1.00 ~ 1.80 GHz、步进为 0.01 GHz、扫频类型为快速扫频。通过参数化仿真确定满足设计性能的织物微带贴片天线几何尺寸,并进一步用于确定机织工艺参数。通过经验公式计算得到的织物微带贴片天线的理论几何结构尺寸如图 1 所示。

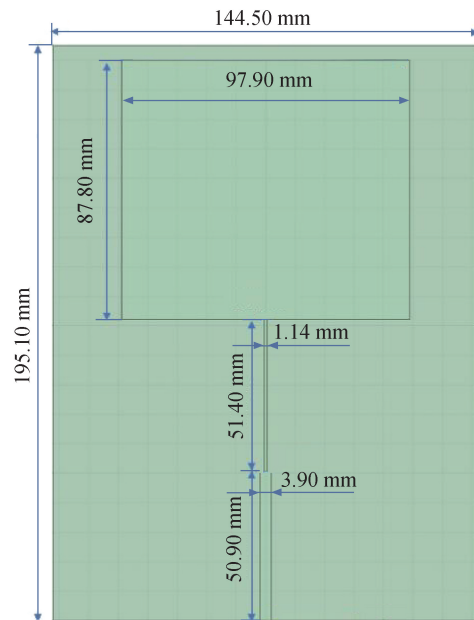


图 1 织物微带贴片天线的理论几何结构尺寸

Fig. 1 Theoretical geometric structure sizes of the fabric microstrip patch antenna

1.3 上机制备

纺织材料吸湿后其介电性能会发生变化,进而导致织物微带贴片天线的辐射性能发生改变,故本文以回潮率低的 29.53 tex 涤纶缝纫线、59.05 tex 涤纶缝纫线和 44.44 tex 镀银纱为原料,制作织物微带贴片天线的基板和辐射体部分。其中,辐射体部分的经纱选用较细的 29.53 tex 涤纶缝纫线,以使作为纬纱的镀银纱之间排列更紧密,确保微带贴片天线性能稳定。

微带贴片天线的上机工艺参数设置如下:

试验用纬纱为涤纶纱线,其弹性较小,纬纱织缩率取 6%^[15]。设定经纱密度为 168 根/(10 cm),按纬纱织缩率 6%、每箱穿入 2 根纱线计,确定使用 40 号箱较为适宜。设定总经根数为 210 根,每箱穿入 2 根纱线,经计算可得到上机箱幅为 13.34 cm。

以优化后的天线结构尺寸作为上机织造时的参考尺寸,沿经向将贴片上方的基板部分定义为上区,辐射体部分定义为下区,上机图如图 2 所示。在下区中,根据天线各部分的宽度调整最小组织的循环数:贴片部分循环数为 29,两边基板的循环数均为 3;1/4 波长转换器部分循环数为 1,两边基板的循环数均为 17;馈线部分循环数为 7,两边基板的循环数均为 14。织物微带贴片天线表、中、里层的基础组织均为平纹,层与层之间的接结方式均为“下接上”。基板层使用较粗的涤纶缝纫线(线密度为 59.05 tex),辐射面层经纱使用较细的涤纶缝纫线(线密度为 29.53 tex),在 TNJ101E-12-4B 型全自动剑杆小样织机上织制织物微带贴片天线。

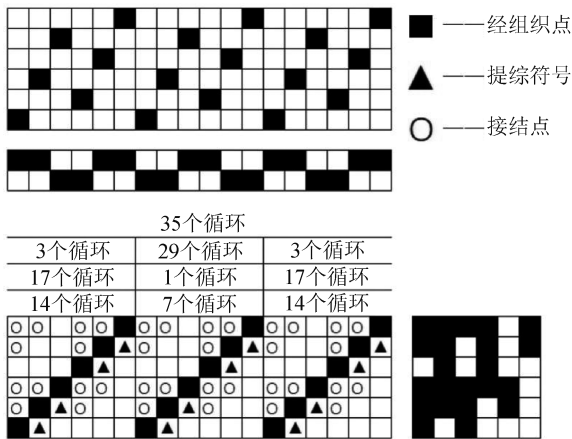


图 2 织物微带贴片天线上机图
Fig. 2 Machine drawing of the fabric microstrip patch antenna

按照 HFSS 软件中的天线结构尺寸设计织物微带贴片天线的上机工艺:通过 3 层纱线的交织实现辐射体部分与基板部分的一体化;表层纱线织造辐射单元,中层和里层纱线织制基板,层与层之间通过接结点层合;织造方向为沿天线顶端至底端。考虑到经纱线密度不同带来的上机张力差异,织造时,表层经纱单独卷绕在一个经轴上,中层和里层经纱卷绕在另一个经轴上。先用涤纶纱引纬,织造天线顶部非辐射体部分;然后用镀银纱引纬,根据天线结构

中非导电部分和导电贴片部分幅宽的比例,将绕有镀银纱的纤子穿过既定数量的经纱后打纬,织制完贴片部分再织造 1/4 波长转换器部分;最后采用相同的方式织造馈线部分。

采用微带馈电的方式对织物微带贴片天线进行馈电。在天线里层的表面粘贴导电布作为天线的接地面,在天线的馈线底端采用锡焊 SMA (Subminiature version A) 接头。制得的织物微带贴片天线试样如图 3 所示。



图 3 织物微带贴片天线试样
Fig. 3 Sample of the fabric microstrip patch antenna

1.4 阻抗匹配测试

使用 KEYSIGHT-E5071C 型矢量网络分析仪(图 4)测试织物微带贴片天线的回波损耗(S_{11}),以评估其阻抗匹配性能。因本文织制的织物微带贴片天线仅有 1 个端口,故测试时仅需将其与端口 1 相连。将待测织物微带贴片天线放置在绝缘泡沫板上,进行 5 次回波损耗值测试,结果取平均值。

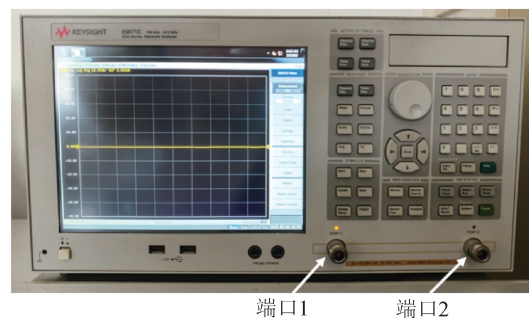


图 4 KEYSIGHT-E5071C 型矢量网络分析仪
Fig. 4 KEYSIGHT-E5071C vector network analyzer

2 结果与讨论

2.1 仿真与优化

由经验公式计算得到织物微带贴片天线的工作频率为 1.47 GHz, 与设计的工作频率相差 6.8%, 谐振点处回波损耗值低至 -12.95 dB, 阻抗带宽为 10 MHz, 仿真性能结果表明其未达到设计要求, 故需对该织物微带贴片天线尺寸结构和材料的设定进行优化。调整模型的初始材料设定, 将贴片和地板的材料设定改为实际银导体, 电导率设定为 7.69×10^4 S/m。基于对织物微带贴片天线厚度的测试以及仿真结果, 将模型优化为有厚度的三维模型以贴合实际织物微带贴片天线形态。其中, 织物微带贴片天线厚度设定为 0.25 mm, 基板厚度设定为 3.00 mm。在 HFSS 软件的“Optimetrics”选项下设定织物微带贴片天线各部分尺寸的优化范围, 并在该范围内进行扫频分析, 对优化后的模型进行仿真模拟。优化前后织物微带贴片天线的仿真性能如图 5

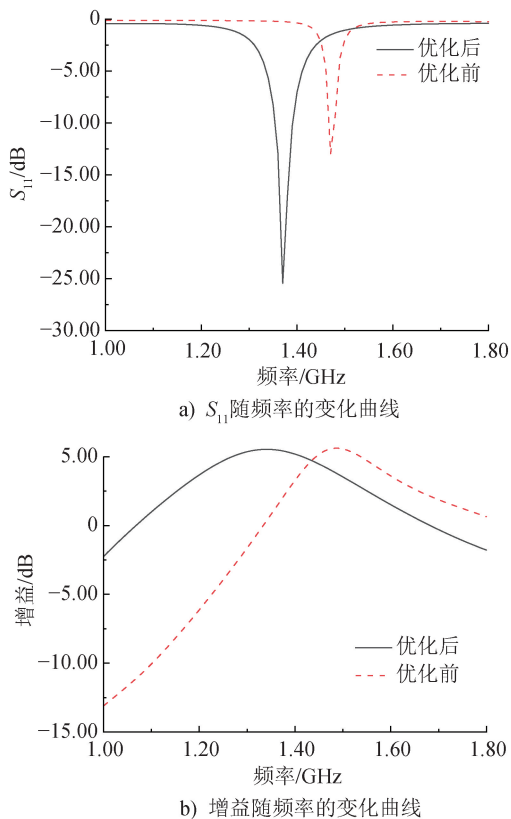


图 5 优化前后织物微带贴片天线的仿真性能
Fig. 5 Simulation performance of fabric microstrip patch antennas before and after optimization

所示: 优化后天线工作频段为 1.35~1.39 GHz, 阻抗带宽 40 MHz, 符合设计所需的工作频段; 谐振点处的 S_{11} 为 -25.45 dB, 相比原结构天线性能提升了 96.53%; 1.37 GHz 时的最大增益达到 5.45 dB, 提升了 202.78%; 辐射效率在频段范围内均有提升。优化前后的织物微带贴片天线的尺寸如表 1 所示, 表中 W 和 L 分别代表基板的宽度和长度; L_p 和 W_p 分别代表贴片的长度和宽度; L_m 和 W_m 分别代表 1/4 波长转换器的长度和宽度; L_f 和 W_f 分别代表馈线的长度和宽度。

表 1 优化前后织物微带贴片天线的尺寸

Tab. 1 Sizes of fabric microstrip patch antennas before and after optimization

项目	优化前	优化后
W	144.50	107.00
L	195.10	141.50
W_p	97.90	97.00
L_p	87.80	97.00
L_f	50.90	22.00
W_f	3.90	21.00
L_m	51.40	17.50
W_m	1.14	3.00

优化后天线的尺寸相较优化前缩小 46.29%, 更符合可穿戴天线小型化的要求; 其工作频段为 1.35~1.39 GHz, 满足设计要求; 阻抗带宽为 40 MHz, 谐振点处的 S_{11} 为 -25.45 dB, 增益达 5.45 dB。

2.2 阻抗匹配性能

下机后测得织物微带贴片天线试样的纬密为 145 根/(10 cm)。对织物微带贴片天线进行阻抗匹配性能测试, 所得织物微带贴片天线的仿真回波损耗与实测回波损耗如图 6 所示。可以看出, 织物微带贴片天线的仿真谐振频率为 1.37 GHz, 谐振点处的 S_{11} 为 -25.45 dB; 天线实测谐振频率为 1.37 GHz, 谐振点处的 S_{11} 为 -26.33 dB, 表明天线的仿真结果与实测结果具有良好的一致性, 天线能在设计的工作频率下实现天线端口与 50Ω 传输线间的良好阻抗匹配。然而, 相较仿真结果, 实际测试的 S_{11} 曲线整体向下有所偏移, 这是因为仿真过程中, 镀银纱的电导率是通过测试其方阻计算得到的理论值, 而实际纱线材料的导电性与仿真结果相比较差, 回波损耗较大, 且试验环境的开放性也导致试

验难以完全消除外界电磁波的干扰,因此测得的天线回波损耗曲线与仿真曲线存在一定的偏差。

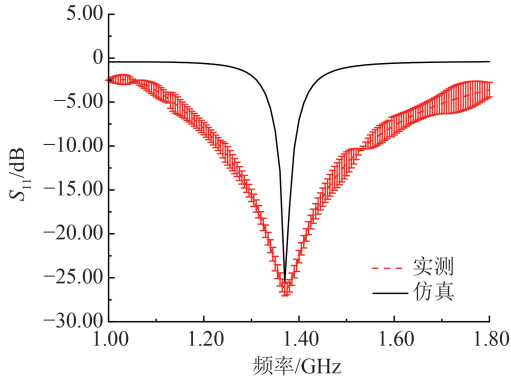


图6 织物微带贴片天线的仿真 S_{11} 和实测 S_{11}

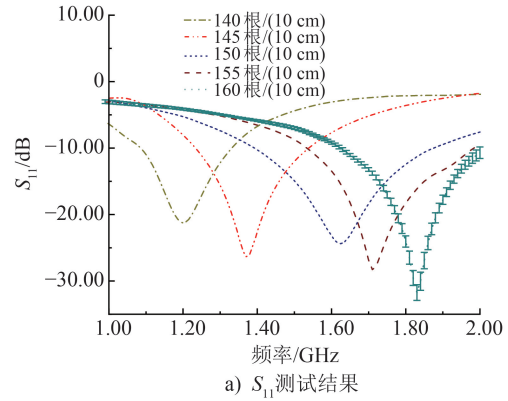
Fig. 6 Simulated S_{11} and measured S_{11} of the fabric microstrip patch antenna

2.3 织物纬密对阻抗匹配性能的影响

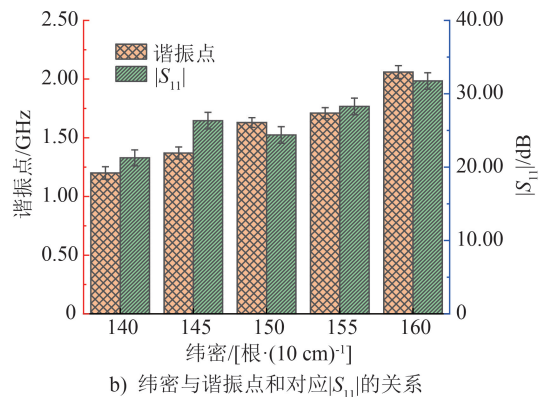
传统硬质天线的导电层是表面平整的导体材料,而织物天线的基底和辐射单元均由纱线交织构成。织物纬密是影响织物微带贴片天线性能的重要因素之一,纬密的变化会改变织物的结构和电磁特性,从而影响天线的谐振频率、带宽等指标。本文制备的织物天线的辐射单元由镀银纬纱构成,纬密的变化会改变导电纱线的密度和接触点数量,因此有必要探究织物纬密与天线性能的关系。

调整织物纬密发现:纬密过小时,相邻2根镀银纬纱之间未形成接触,导致辐射单元的导体不连续。经多次上机试验确定了辐射单元镀银纱的纬密范围,并最终选择140、145、150、155和160根/(10 cm)这5个水平值进行试验探究。调整上机工艺参数,制备5组不同纬密的织物微带贴片天线试样,测试天线的回波损耗,结果如图7a)所示。

由图7a)可以看出,在本文选取的纬密范围内,随着纬密的增大,织物微带贴片天线的谐振频率增大,且谐振点处对应的 S_{11} 值下降。原因可能是:纱线粗细相同时,辐射层导电纱线的纬密越大,纱线之间的空隙越小,纱线排列越紧密,织物表面越平整。织物表面空隙的存在抑制了辐射面内电荷的流动,纬密的增大使辐射层的电流分布发生改变,有效电长度缩短,进而导致电流的路径缩短。同时,纬纱密度增加使相邻导电纱的接触点更密集,接触电阻减小,进而天线的回波损耗减小。结合式(4)可知,当辐射单元贴片长度 L_p 减小时,织物微带贴片天线的



a) S_{11} 测试结果



b) 纬密与谐振点和对应 $|S_{11}|$ 的关系

图7 不同纬密织物微带贴片天线的 S_{11} 测试结果

Fig. 7 S_{11} test results of fabric microstrip patch antennas with different weft densities

谐振点 f_r 增大,这印证了前文纬密增大导致辐射单元长度减小,进而导致天线谐振点增大这一测试结果。

提取不同纬密的织物微带贴片天线的谐振点和谐振点处的 S_{11} 值,如图7b)所示。通过相关性分析探究纬密对谐振点和 S_{11} 的调控机制,结果发现:织物纬密与织物微带贴片天线谐振点在0.01水平呈显著正相关,相关系数为0.982,即随着织物纬密增大,织物微带贴片天线谐振点向高频方向偏移;回波损耗与织物纬密在0.05水平呈显著负相关,相关系数为0.916,即随着织物纬密增大,织物微带贴片天线的回波损耗减小。该结论与唐华荣^[16]的研究结论相符。回波损耗值越小意味着天线 50Ω 阻抗匹配更好。

3 结论

本文首先结合通信天线的一般要求,根据微带贴片天线设计的经验公式,设计了一种工作频段在

1.37 GHz 的织物微带贴片天线结构,并对该结构进行优化,对比了优化前后织物微带贴片天线的仿真性能,验证优化后的天线结构是否满足工作要求。然后,选择合适的上机工艺制备织物微带贴片天线试样,并对其阻抗匹配性能进行测试,对比实测结果与仿真结果。最后,通过试验探究了织物纬密对织物微带贴片天线阻抗匹配性能的影响。研究结果表明:通过机织工艺制备织物微带贴片天线具有可行性;结构优化后设计的织物微带贴片天线,其工作频段与理想工作频段一致;与仿真结果相比,实测 S_{11} 曲线整体向下偏移;天线谐振点与纬密呈显著正相关,原因是不同紧密程度的导电纱线交织导致了电流路径改变,进而影响织物微带贴片天线的有效电长度,谐振频率发生偏移。本研究突破了传统硬质天线在柔软性方面的局限性,证实了采用商业化导电纱与工业化剑杆织机制备高性能织物天线的可行性,研究结果可为北斗卫星导航系统的可穿戴终端集成提供材料与工艺方面的参考。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 刘国权, 张文俊, 叶文, 等. 基于北斗卫星的野外追踪及预警系统设计[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2023, 46(4): 419-424.
- [2] 广州华夏汇海科技有限公司. 基于北斗卫星导航系统的穿戴式跑步考试装置: CN202410715989. 8[P]. 2024-10-08.
- [3] 福州福大信捷天线技术有限公司. 一种应用于北斗导航系统手持设备的小型化天线: CN202320955516. 6[P]. 2023-11-14.
- [4] 李锐雄, 林福民, 李晓鹏, 等. 缝隙加载的低剖面双频北斗天线设计[J]. 电子学报, 2024, 52(8): 2679-2687.
- [5] 黄展博, 袁家德. 小型化双环型卫星导航终端天线[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 674-680.
- [6] SALONEN P, KESKILAMMI M, RANTANEN J, et al. A novel bluetooth antenna on flexible substrate for smart clothing[C]//2001 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2001). Tucson: IEEE, 2001: 789-794.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] MASSEY P J. GSM fabric antenna for mobile phones integrated within clothing[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 2001 Digest. Boston: IEEE, 2001: 452-455.
- [11] OUYANG Y H, KARAYIANNI E, CHAPPELL W J. Effect of fabric patterns on electrotexile patch antennas[C]//2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Washington D C: IEEE, 2005: 246-249.
- [12] KRAUS J D, MARHEFKA R J. 天线[M]. 章文勋, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [13] 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.
- [14] 徐思聪. 圆极化织物微带 GPS 天线的研制及其小型化研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2013.
- [15] 蔡陞霞, 荆妙蕾. 织物结构与设计[M]. 4 版. 北京: 中国纺织出版社, 2008.
- [16] 唐华荣. 羊毛/涤纶织物为基质的纺织共面波导宽带天线设计及性能[D]. 上海: 东华大学, 2022.

把论文写在祖国大地上!