

# 面向北斗卫星通信的柔性窄带织物天线设计

刘思浩 晋 艺 付 毅 史莫衡 胡吉永 杨旭东  
东华大学 纺织学院, 上海 201620

**摘要:**基于立体螺旋天线法向模工作模式,设计一种可工作于1.36 GHz的柔性窄带织物天线,旨在提升头盔集成天线的共形性及空间利用率。根据立体螺旋天线的关键结构参数进行仿真建模分析,探究实现目标工作频率的天线圈匝数,并在优化后确定能在目标频段工作的其他天线结构参数。然后,通过机织工艺制备柔性窄带织物天线,同时研究天线厚度及导体直径对天线辐射性能的影响。研究表明:制备的柔性窄带织物天线线圈匝数为16时,1.36 GHz中心频率处实测回波损耗为-17.7 dB,在-10 dB水平的带宽为17 MHz,相对带宽为21.25%,且增益方向图与仿真结果趋势一致。研究提出的柔性窄带织物天线可为面向北斗卫星系统的可穿戴无线通信柔性天线及头盔天线的设计提供一种解决方案。

**关键词:**螺旋天线;织物天线;结构设计;优化;仿真模拟;头盔天线;辐射性能

中图分类号:TN820

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2025)07-0008-07

## Design of flexible narrowband fabric antennas for BeiDou satellite communication

Liu Sihao, Jin Yi, Fu Yi, Mahin Ahmed Shishir, Hu Jiyong, Yang Xudong

College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China

**Abstract:** A flexible narrowband fabric antenna operating at 1.36 GHz, based on the normal-mode operation of a three-dimensional (3D) helical antenna, was designed to improve the conformality and space utilization of helmet-integrated antennas. Through simulation modeling analysis of the 3D helical antenna's key structural parameters, the number of antenna coil turns required to achieve the target operating frequency was investigated. After optimization, other structural parameters ensuring operation within the desired frequency band were determined. Subsequently, the antenna was fabricated using a weaving process, and the impacts of antenna thickness and conductor diameter on its radiation performance were explored. The results demonstrated that when the number of coil turns was set to 16, the fabricated flexible narrowband fabric antenna exhibited a measured return loss of -17.7 dB at the center frequency of 1.36 GHz, a bandwidth of 17 MHz at the -10 dB return loss level, a relative bandwidth of 21.25%, and a gain pattern consistent with the simulation

收稿日期:2025-02-17

作者简介:刘思浩,男,2000年出生,在读硕士研究生,主要研究方向为可穿戴天线,1030521509@qq.com

通信作者:杨旭东,教授,研究方向为智能纺织品,xdyang@dhu.edu.cn

results. The proposed flexible narrowband fabric antenna offers a viable solution for designing wearable wireless communication flexible antennas and helmet antennas tailored for the BeiDou satellite system.

**Keywords:** helical antenna; fabric antenna; structural design; optimization; simulation; helmet antenna; radiation performance

无线通信技术的高速发展使信息传输变得更加稳定高效,该技术在应急、军事及医疗领域的作用不可估量。目前,人们对可穿戴通信技术的需求不断提高,并希望设备更加微型化、集成化和轻量化,以满足突发和复杂环境下实时数据监测的需求,提升设备灵活性,减轻使用者负担。同时,人们对卫星定位系统的应用需求不断攀升。北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)作为我国自主建设的全球卫星导航系统,正凭借精度高、可靠性高和全球覆盖范围广等特点,被广泛应用于交通运输、应急救援、军事导航、测绘及气象等领域。结合无线通信技术与北斗卫星导航系统的可穿戴设备,能在精确定位和实时通信的同时,进一步提升应急响应速度和工作效率,且即便在极端环境中,也能精准导航和稳定传输。

天线是无线通信中发送和接收信号的核心部件。为满足无线通信场景的实际需求,对天线进行针对性的设计极为必要。目前,北斗卫星天线的类型主要有微带贴片天线<sup>[1-2]</sup>和阵列天线<sup>[3]</sup>等,其研究重点涉及低廓形和圆极化等方面。制备天线的材料目前多为硬质或金属材质,它们在人体共形方面存在改进空间。

人体佩戴可穿戴天线进行无线信号传输是较为主流的天线集成方案之一。目前,常见的可穿戴天线主要有鞭状、背心式及头盔 3 类。典型的鞭状天线易受环境影响,且尺寸过大。以织物为衬底的背心式天线需考虑服装的集成性和人体的舒适性,且其性能易受人体姿态影响,同时天线结构发生形变会对辐射效果产生严重影响,故无法确保使用者在不同场景下均能处于安全辐射范围。将可穿戴天线集成到刚性头盔中,是实现宽带、高效、高增益及全向辐射通信的一种有效方法。现有研究涉及硬质天线较多,但硬质天线存在廓形大、耐用性低、柔性化及圆极化实现困难等问题<sup>[4-7]</sup>,而具有低廓形、强抗多径衰落及易于实现圆极化辐射等特点的螺旋天

线<sup>[8]</sup>,研究较少。

因此,为更好地提升天线的柔性及共形性,并尽可能减小天线廓形,使其工作在北斗卫星目标频段,本研究基于立体螺旋天线法向模工作模式,设计了一种柔性窄带织物天线,将传统立体螺旋天线扁平化。当螺旋状的导体变为阶梯状后,天线体积更小,柔韧性更强,与头盔共形度高。本研究将利用机织工艺制备可工作于 1.36 GHz 的柔性窄带织物天线,并采用 HFSS 软件仿真与试验测试验证相结合的方法,详细研究法向模螺旋天线结构参数对天线辐射性能的影响,以期在满足卫星无线通信需求的同时,减小天线尺寸,更好地实现天线柔性化。

## 1 头盔共形天线的设计

### 1.1 天线的拓扑结构

本研究通过 HFSS 软件建立天线几何模型,并在 TNJ101E-12-4B 型剑杆小样织机(上海双九实业有限公司)上织造柔性窄带织物天线。天线辐射单元采用导电且辐射性能良好的纺织级高纯铜丝(纯度 $\geq 99.999\%$ ),非导体部分采用介电性能稳定且高强耐磨的不导电涤纶缝纫线和芳纶纱。织造时,高纯铜丝作为纬纱在织带表面沿轴向螺旋上升。由于天线采用扁平化设计,因而原立体螺旋天线的螺旋直径改由宽度  $b$  表征。图 1 为设计的头盔共形天线的拓扑结构及其结构参数示意,其中,  $D$  为导体直径、 $s$  为节距、 $r_f$  为圆弧半径、 $d_f$  为厚度。初步试验得到,当基本结构参数分别为  $D = 0.3 \text{ mm}$ 、 $s = 12.0 \text{ mm}$ 、 $b = 15.0 \text{ mm}$ 、 $r_f = 1.0 \text{ mm}$ 、 $d_f = 1.0 \text{ mm}$  时,天线可有效工作于目标中心频点(1.36 GHz)。故本研究将基于这些结构参数进一步优化天线设计。

### 1.2 天线结构的仿真

当前,立体螺旋天线已广泛应用<sup>[9]</sup>。而本研究提出的柔性窄带织物天线,其结构与传统法向模螺旋天线不同,因此需通过优化使其工作在目标频段,

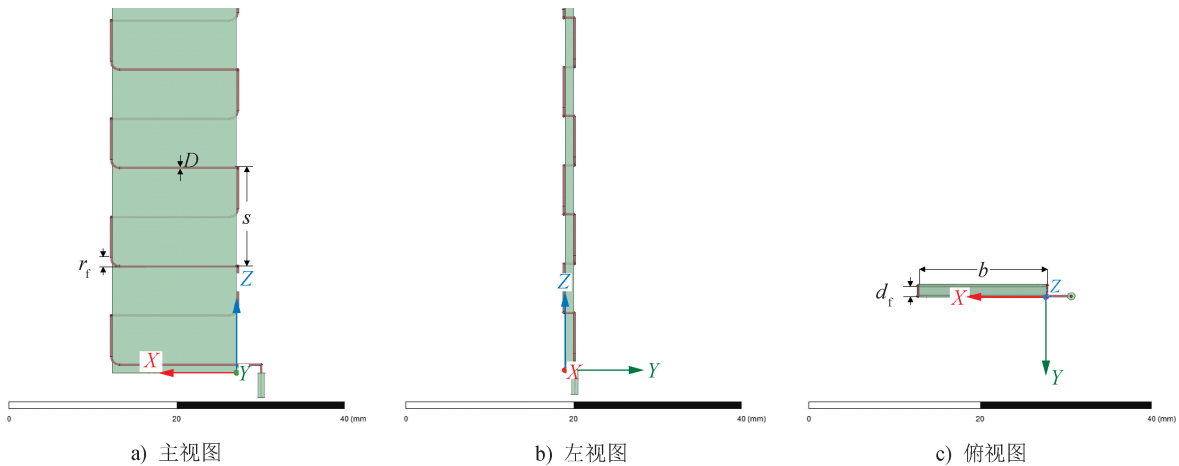


图1 织物基头盔共形天线拓扑结构及其结构参数示意

Fig. 1 Schematic diagram of topological structure and structural parameters of the fabric-based helmet conformal antenna

并具备优良的辐射性能。通常,调节螺旋天线工作频段的方法主要是改变天线线圈匝数( $N$ )。

固定天线其他结构参数不变,对不同线圈匝数(1~20)的柔性窄带织物天线进行仿真。且为了全面观察不同线圈匝数天线对应的谐振频率,将仿真频率设为0.9~1.5 GHz。仿真过程中,天线与50  $\Omega$  阻抗匹配,扫频中心频率为1.36 GHz,织物基底的相对介电常数为1.57、介电损耗为0.009 6。通过提取回波损耗( $S_{11}$ )、谐振频率、阻抗、方向图和增益( $G$ )等指标,讨论线圈匝数对天线谐振频率和阻抗等的影响规律,进而确定天线在设计频段工作的最优线圈匝数。

### 1.3 柔性窄带织物天线的制备

根据1.2节方法最终得到的最优线圈匝数设计柔性窄带织物天线,并结合设计的天线厚度和前期试验的结果,确定选用29.5 tex $\times$ 2的涤纶缝纫线作为经纱、59.1 tex $\times$ 3的芳纶纱和直径0.3 mm的高纯铜丝作为纬纱,以提高天线本体的强度,降低天线吸湿对其性能的影响<sup>[10-11]</sup>。柔性窄带织物天线的组织结构为3层平纹组织,具体见图2。根据设计的天线宽度,设置组织循环数为6。钢筘采用40号,上机时每箱2入。织造时,导体高纯铜丝以一定的节距,一正一反地参与织带正反两面的交织,并在织带侧面以浮长线的形式沿轴向延伸至下一交织点中;其余纬纱使用芳纶纱,对高纯铜丝起支撑作用。织造完成后,使用锡丝将SMA(Subminiature version A)接口与天线底端铜丝延长线连接,便于后续天线

性能的测试。

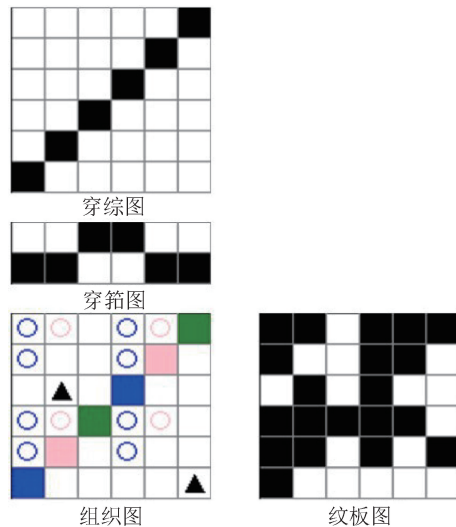


图2 柔性窄带织物天线的组织结构

Fig. 2 Organizational structure of the flexible narrowband fabric antenna

图3为制备的柔性窄带织物天线实物照片,其实际下机宽度为(16.0 $\pm$ 0.3)mm,与设计宽度的相对偏差在4.7%~8.7%,经密为225根/(10 cm)、纬密为128根/(10 cm),天线厚度为(2.17 $\pm$ 0.07)mm。该天线具备良好的柔性和共形性<sup>[12]</sup>,这为人体舒适佩戴及与头盔共形提供了保障。

### 1.4 柔性窄带织物天线辐射性能测试

为表征柔性窄带织物天线的工作带宽及其与馈线的匹配情况,使用85032E型校准件(是德科技公司)校准E5071C型矢量网络分析仪(是德科技公司)后,采用单通道/双通道测试法测试天线的辐射

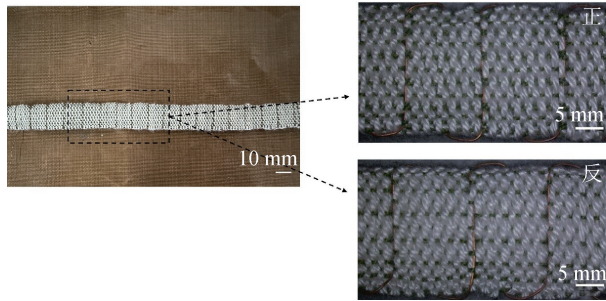


图 3 柔性窄带织物天线实物照片

Fig. 3 Physical photo of the flexible narrowband fabric antenna

性能。测试时,试样置于珍珠棉泡沫之上(图 4)。

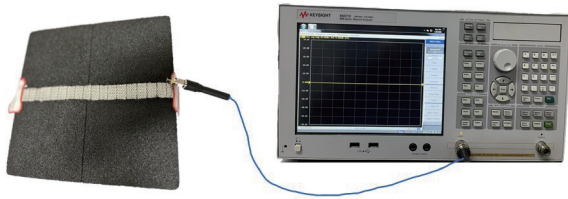


图 4 天线辐射性能测试实物照片

Fig. 4 Physical photo of the antenna radiation performance test

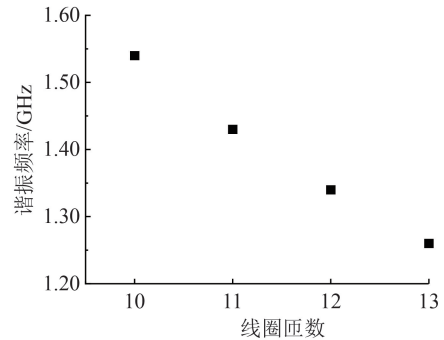
## 2 结果与讨论

### 2.1 仿真及优化

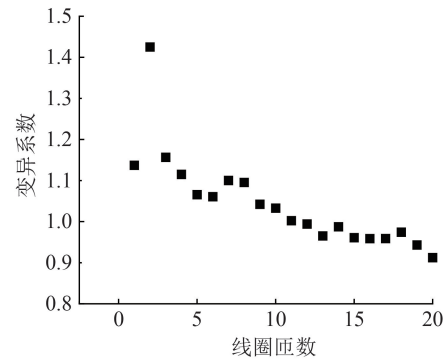
不同匝数天线的仿真结果如图 5 所示,其中图 5a)调整了制图横坐标范围,以优化展示效果。从图 5a)和图 5b)可以看出:随着天线线圈匝数的增加,天线谐振频率不断向低频方向偏移,天线驻波比变异系数降低,这意味着天线驻波比在整个监测频率范围内趋近低值且波形更加稳定,天线线圈匝数的增加有利于优化天线阻抗匹配效果。同一频率下,长度更长的天线尽管具有更好的辐射性能,但同时需考虑天线长度应满足共形设计的需求。结合图 5c)可以看出,当天线线圈匝数为 15 和 16 时,仿真天线工作在设计的超高频段内,此时的天线高度为 192~204 mm,满足天线与头盔绑带结合的长度需求。下文将以  $D = 0.3 \text{ mm}$ 、 $s = 12.0 \text{ mm}$ 、 $b = 15.0 \text{ mm}$ 、 $r_f = 1.0 \text{ mm}$ 、 $d_f = 1.0 \text{ mm}$ 、 $N = 15$  和 16 为参数制样,进一步验证天线的辐射性能。

### 2.2 柔性窄带织物天线的辐射性能

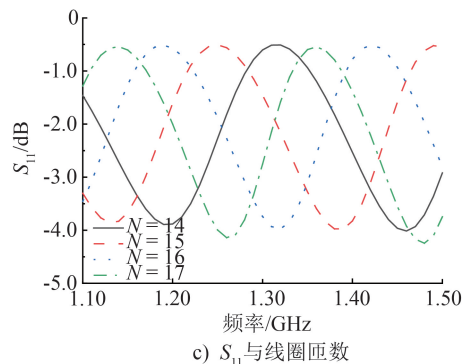
柔性窄带织物天线的仿真  $S_{11}$  与实测  $S_{11}$  结果如图 6 所示,由于实测 15 匝天线的谐振点不在



a) 谐振频率与线圈匝数



b) 驻波比变异系数与线圈匝数



c)  $S_{11}$ 与线圈匝数

图 5 天线辐射性能仿真结果

Fig. 5 Simulation results of the antenna radiation performance

1.36 GHz 处,故本文不再论述。实测结果显示,16 匝天线的中心谐振点在 1.36 GHz,位于仿真 17 匝天线与仿真 16 匝天线之间,这与制成的天线高度做了微调(实际高度在仿真 16 匝天线与仿真 17 匝天线之间),以使其在目标频点处谐振有关<sup>[13]</sup>。实测结果规律与仿真结果规律一致。实测  $S_{11}$  值为 -17.7 dB,远小于仿真谐振点处的 -4 dB,这与仿真天线未能真实模拟织物表面纹理<sup>[14]</sup>以及高纯铜丝自然屈曲,导致实物与理想化建模之间存在误差有关<sup>[15]</sup>。此外,天线与 SMA 接口的连接,以及试验环境等因素,也会造成结果有误差,影响接触阻抗的表现。在 1.36 GHz 频点处,实测 16 匝天线在

-10 dB 水平处的带宽为 17 MHz, 相对带宽为 21.25%, 表明制备的 16 匝天线符合设计需求。其相较三维机织结构的织物微带天线, 前者带宽更宽<sup>[16]</sup>; 相较同样螺旋半径的传统立体螺旋天线, 前者更轻薄、更柔韧。

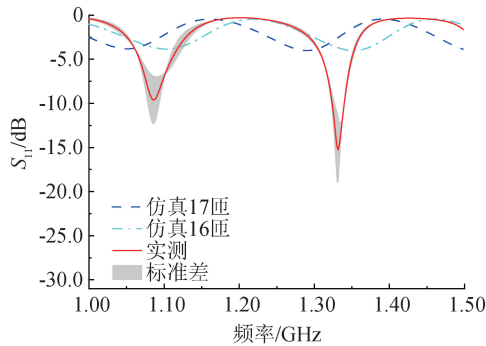


图6 柔性窄带织物天线的仿真  $S_{11}$  与实测  $S_{11}$   
Fig. 6 Simulated  $S_{11}$  and measured  $S_{11}$  of the flexible narrowband fabric antenna

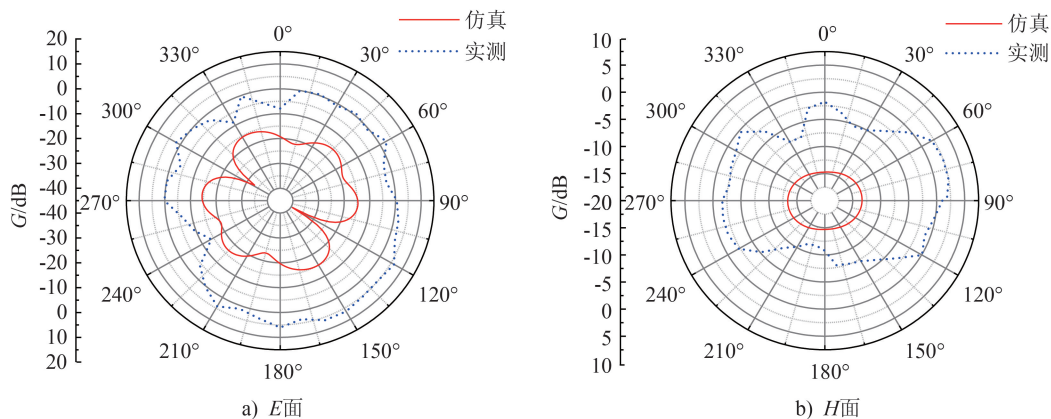


图7 天线增益的测量结果与仿真结果  
Fig. 7 Measurement results and simulation results of the antenna gain

体佩戴舒适的织物厚度范围<sup>[12]</sup>, 利用 HFSS 软件仿真, 设置仿真天线厚度为常见织带厚度, 得到如图 8 所示的  $S_{11}$  和谐振频率图。从图 8 可以发现, 随着天线厚度的增加,  $S_{11}$  值和输入阻抗值变化较小(可视为稳定), 谐振频率向低频方向偏移。这与法向模螺旋偶极子天线螺旋半径增加, 导致其谐振频率降低的原理一致<sup>[15]</sup>。天线厚度增加, 辐射体(高纯铜丝)在柔性窄带织物天线正反面过渡的路径变长, 辐射体总长度增加, 天线在高频条件下的阻抗表现改变, 最终谐振频率受影响。而天线在新谐振点处的输入阻抗并未因此发生改变, 其原理与天线线圈匝数变化时类似<sup>[8]</sup>。

天线方向图是表征天线辐射特性与空间角度关系的图形<sup>[17]</sup>。为验证本研究设计的 16 匝柔性窄带织物天线在 1.36 GHz 中心频率处的辐射特性, 在暗室中对该天线进行远场参数测试, 结果如图 7 所示。从图 7 可以看出: 仿真天线的  $E$  面方向图与偶极子天线的类似, 呈类八字形,  $H$  面方向图呈全向型; 实测天线结果与仿真天线结果在图形分布方面一致性良好, 但在数值方面存在一定的差异, 原因主要与建模、制样及测试环境等有关<sup>[18]</sup>。

### 2.3 天线厚度对柔性窄带织物天线辐射性能的影响

传统立体螺旋天线可通过在其中心加载介质及改变中心介质直径影响天线辐射性能。因此, 有必要探究柔性窄带织物天线厚度对其辐射性能的影响。

固定其他参数不变, 结合预试验结果和可使人

### 2.4 导体直径对柔性窄带织物天线辐射性能的影响

为进一步提高天线辐射性能, 以导体直径为研究对象, 探讨导体直径对  $S_{11}$  值的影响。根据文献[8]和[18], 设计 5 种导体直径(0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mm)。

使用 HFSS 软件, 固定上文已确定的节距、圆弧半径、厚度、线圈匝数等参数不变, 仅改变导体直径, 得到图 9 所示的仿真结果。从图 9 可以看出, 随着导体直径的逐渐增大: 天线的谐振频率逐渐向高频方向偏移,  $S_{11}$  值减小; 天线的电阻逐渐减小, 电抗整体呈增长趋势, 整体阻抗更加接近阻抗匹配点, 天线阻抗匹配随导体直径增加而改善。螺旋天线本身由

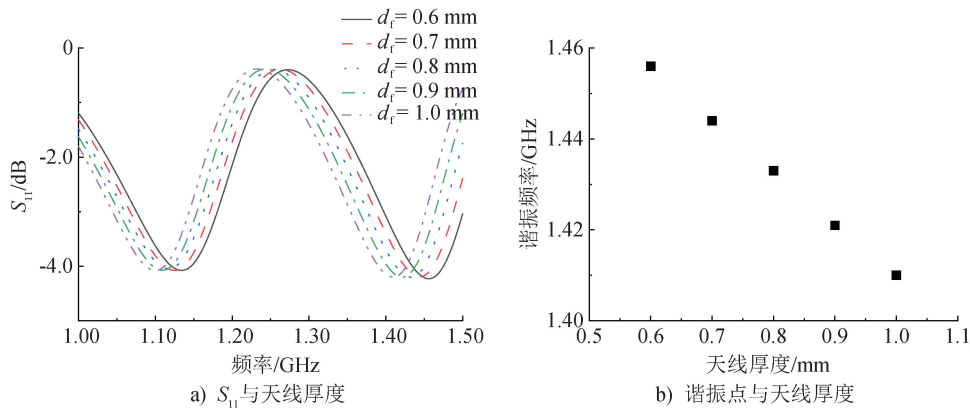


图 8 天线厚度对  $S_{11}$  和谐振频率的影响

Fig. 8 Influence of the antenna thickness on  $S_{11}$  and resonant frequency

于输入阻抗较小,故而在阻抗匹配方面存在一定的困难<sup>[19]</sup>。较粗的导体能改善输入阻抗匹配,增加天线的辐射电阻<sup>[20]</sup>。更粗的导体还能增加天线的有效导体表面积,使电流分布更加均匀,同时降低表皮效应的影响,提升天线的工作带宽。此外,更粗的导

体还能降低导体的电阻损耗,减少相邻线圈的电场耦合效应,降低互耦干扰,提高天线的辐射效率和方向性。但过粗的导体会导致天线最大增益( $G_{max}$ )值减小[图 9d)],并使天线的廓形明显,不利于隐蔽,严重影响与织物集成后的柔性和一体化。

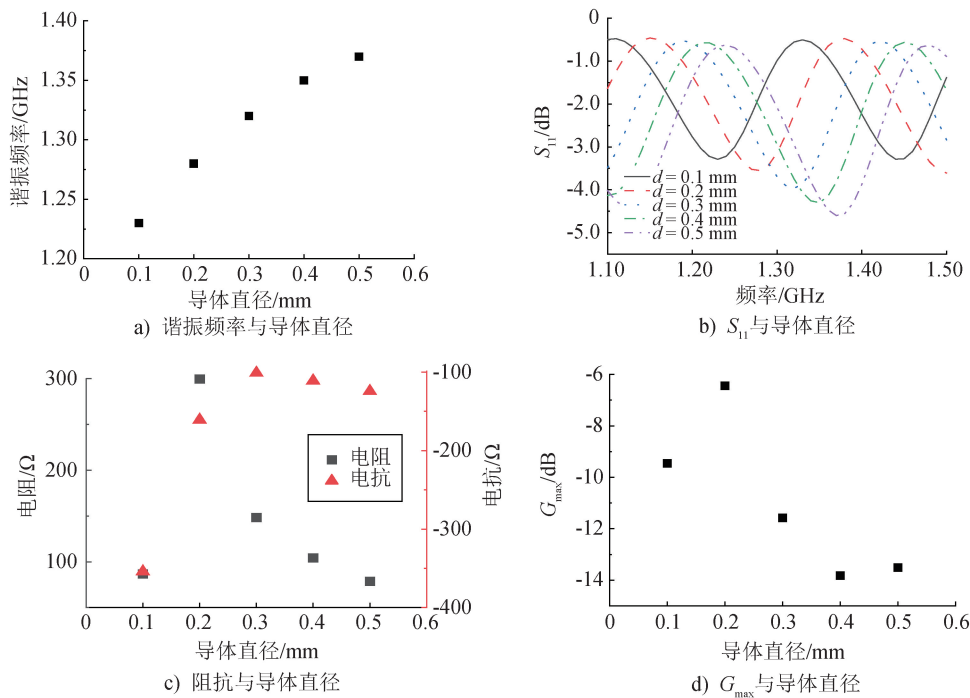


图 9 导体直径对天线辐射性能的影响

Fig. 9 Influence of the conductor diameter on radiation performance of antennas

### 3 结论

综上所述,本研究基于立体螺旋天线的法向模工作

原理,并结合机织工艺,设计并制备了一种可工作于 1.36 GHz 的柔性窄带织物天线,探究了影响天线辐射性能的基本结构参数,发现:在中心频率 1.36 GHz 的条件下,设计的导体直径为 0.3 mm、节

距为 12.0 mm、宽度为 15.0 mm 及线圈匝数为 16 的柔性窄带织物天线,其  $S_{11}$  值为 -17.7 dB、带宽为 17 MHz,天线中心频率及增益规律与仿真规律一致。随着天线厚度的增加,天线的谐振频率向低频方向偏移。随着导体直径的增大,天线的谐振频率逐渐向高频方向偏移,阻抗匹配效果改善,但天线外观及柔性会受到影响。研究结果可为面向北斗卫星系统的可穿戴无线通信柔性天线及头盔天线的设计提供一种解决方案。



期刊采编平台

中国知网下载

### 参考文献

- [ 1 ] 李栋杉. 双频圆极化北斗导航微带天线设计[J]. 现代信息科技, 2024, 8(24): 21-25.
- [ 2 ] 屠立民, 王颖凡, 吴昌英. 基于时间调制理论的北斗抗干扰阵列天线[J]. 微波学报, 2024, 40(增刊1): 24-27.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] WANG J J H, TILLERY J K, BOHANNAN K E, et al. Helmet-mounted smart array antenna[C]// IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1997. Digest. New York: IEEE, 1997: 410-413.
- [ 5 ] NGUYEN-TRONG N, PIOTROWSKI A, KAUFMANN T, et al. Low-profile wideband monopolar UHF antennas for integration onto vehicles and helmets [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(6): 2562-2568.
- [ 6 ] HEROLD D, GRIFFITHS L, FUNG T Y. Lightweight, high-bandwidth conformal antenna system for ballistic helmets [C] // MILCOM 2007. New York: IEEE, 2007: 1-6.
- [ 7 ] ADLER R W, GIBBS D S, LEBARIC J E, et al. Helmet mounted UHF antenna for mobile user objective system (MUOS) [C] // MILCOM 2002. New York: IEEE, 2002: 311-315.
- [ 8 ] KRAUS J D, MARHEFKA R J. Antennas for all applications[M]. 3rd ed. USA: McGraw-Hill, 2003: 166-203.
- [ 9 ] BENOAKTA S, HUTU F, SETTE D, et al. UHF RFID elastic textile yarn [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2020, 62(10): 3186-3194.
- [ 10 ] 周祥. 织物电磁特性及纺织天线的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2010.
- [ 11 ] 彭晓丽. 柔性高性能电磁材料的制备、调控及多功能应用[D]. 南京: 东南大学, 2023.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] 高阳. 全球定位系统中的小型介质加载四臂螺旋天线[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [ 14 ] 郑聪, 胡吉永, 蒋金华. 射频能量收集印刷天线仿真模型中长丝机织物结构简化方法及有效性[J]. 丝绸, 2024, 61(7): 36-46.
- [ 15 ] ZHANG Y, MENG F Y, HU J Y, et al. The influence of structure uniformity on resonant frequency of ultra-high frequency radio frequency identification tag thread with normal mode helix dipole antenna[J]. Journal of Industrial Textiles, 2022, 52: 1-17.
- [ 16 ] 杨福慧, 杜成珠. 基于三维织物的四元阵纺织天线[J]. 电子元件与材料, 2014, 33(7): 52-54.
- [ 17 ] KAMYSHNY A, MAGDASSI S. Conductive nanomaterials for printed electronics [J]. Small, 2014, 10(17): 3515-3535.
- [ 18 ] 童杨. 面向呼吸监测的 UHF RFID 温敏传感标签纱的结构设计及性能评价[D]. 上海: 东华大学, 2024.
- [ 19 ] 索莹, 邱景辉, 袁业术, 等. 法向模螺旋天线分析与设计[J]. 装备环境工程, 2008, 5(1): 81-83.
- [ 20 ] 马伏宝. UHF 频段与 S 频段圆极化天线的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.

奉献一份爱 点亮一片天