

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2007175

高增益蓝牙天线的设计与应用*

陈鸿海, 孙学良, 赵鹤鸣, 邵 雷
(苏州大学电子信息学院 苏州 215006)

摘 要: 鉴于蓝牙 mesh 网络节点密集部署的问题和金属物质对蓝牙天线无线信号传输的影响, 通过改变倒 F 天线辐射臂的形状来提升蓝牙天线的增益, 从而达到蓝牙 mesh 网络节点远距离传输无线信号的目的, 同时可以保证周围金属物质不会影响蓝牙无线信号的传输, 减少信号的能量损失, 实现蓝牙 mesh 网络节点的远距离部署。这两款蓝牙天线具有小型化、高增益、高带宽的特性, 覆盖整个蓝牙通信的 ISM 频段, 采用 HFSS 对蓝牙天线的特性进行仿真分析, 得到优化后的蓝牙天线结构参数, 并制作蓝牙天线实物进行试验测试。实验结果表明: 折叠天线和螺旋天线的回波损耗均小于 -10 dB, 带宽完全覆盖蓝牙频段, 而且螺旋天线的性能更优, 增益达到 4.6 dB, 金属环境的最远传输距离为 20 m。

关键词: 蓝牙天线; 高增益; 倒 F 天线; 金属物质

中图分类号: TH89 TN82 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Design and application of high gain bluetooth antenna

Chen Honghai, Sun Xueliang, Zhao Heming, Shao Lei

(School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: In view of the dense deployment of bluetooth mesh network nodes and the influence of metal materials on the wireless signal transmission of the bluetooth antenna, improves the gain of the bluetooth antenna through changing the shape of inverted-F antenna radiation arm, so as to achieve the purpose of using bluetooth mesh network node to transmit wireless signals in long-distance, while ensuring that the surrounding metal materials will not affect the transmission of bluetooth wireless signals, reducing signal energy loss and realizing the long-distance deployment of bluetooth mesh network nodes. These two bluetooth antennas have the characteristics of miniaturization, high gain and high bandwidth, and cover the entire ISM frequency band of bluetooth communication. The HFSS was used to simulate and analyze the characteristics of the bluetooth antennas, the optimized structural parameters of the bluetooth antennas were obtained. The real bluetooth antennas were manufactured, and the experiment tests were conducted. The experiment results show that the return losses of the folded antenna and spiral antenna are both less than -10 dB, and the bandwidths completely cover the bluetooth frequency band; moreover, the performance of the spiral antenna is better, its gain reaches 4.6 dB, and the farthest transmission distance in a metal environment is 20 m.

Keywords: bluetooth antenna; high gain; inverted-F antenna; metal material

0 引 言

近年来,随着蓝牙 mesh 技术的快速发展,蓝牙 mesh 网络已广泛应用于家庭、企业和公共场所等诸多领域,天线的设计对整个蓝牙 mesh 网络的性能和使用有着重大的影响^[1]。由于蓝牙天线的短距离传输,使得蓝牙 mesh

网络的节点布置受限,在远距离无线信号传输场合,需要密集的布置蓝牙 mesh 节点,这样就会增加节点的负担,影响蓝牙 mesh 网络的数据传输。为了实现远距离无线信号的传输,减少蓝牙 mesh 节点的部署,就需要增大节点之间的通信距离,高增益的蓝牙天线可以提升蓝牙 mesh 节点之间的通信距离。

目前常用的蓝牙天线主要有陶瓷天线^[2]、PCB 天

收稿日期: 2020-11-28 Received Date: 2020-11-28

* 基金项目: 国家自然科学基金(61803278)项目资助

线^[3]和 IPEX 外接天线。陶瓷天线是一种适合于蓝牙模块使用的小型化天线,但天线容易受到金属物质的影响,增益也不高,从而造成陶瓷天线无法发挥传输信号的功效,影响陶瓷天线的性能。集成在蓝牙模块上的 PCB 天线,其辐射场强均匀仅局限在一个平面上,天线的场强分布不均匀,容易造成定位上的错误,同时容易受到主板上的干扰,也不适合于蓝牙模块周围有金属物质的场合,所以本文选择设计一种 IPEX 外接天线,能够满足在不改变蓝牙 mesh 网络节点结构的条件下,实现节点周围的金属物质在蓝牙天线有效传输距离内不会对信号的正常传输产生影响^[4]。

蓝牙 mesh 网络节点微型化的发展要求天线具有小型化、高带宽、高增益的特性^[5]。文献[5]设计了一种 2.4 GHz 频段下用于无线传感器的倒 F 印刷天线,天线尺寸 25.7 mm×7.5 mm 比较大;文献[6]设计的倒 F 天线相对带宽仅为 160 MHz,增益达到 2.92 dB;文献[7]利用弯折技术改变倒 L 型天线的走线形式,虽然最大增益达到 6.3 dB,但存在带宽较窄、尺寸偏大等问题;文献[8]天线的阻抗带宽在 2.39~2.55 GHz 之间约为 160 MHz;文献[9]设计出一种工作于 2.4 GHz 附近频段的蓝牙通信平面倒 F 天线,天线尺寸为 40 mm×100 mm,带宽为 172 MHz。针对以上蓝牙天线存在的结构复杂、尺寸较大、带宽偏窄、增益较小的问题^[10],以倒 F 天线为基础,通过改变倒 F 天线辐射臂的走线形式,设计了折叠天线 (folded planar inverted-F antenna) 和螺旋天线 (spiral planar inverted-F antenna),实现所设计蓝牙天线结构简单、易于集成安装、小型化、高带宽、高增益的特性。其中螺旋天线获得了 350 MHz 的带宽,增益达到 4.6 dB。

1 蓝牙天线设计

在设计蓝牙天线的过程中,若要确保蓝牙天线远距离传输的工作特性,就必须保证天线的高增益和减小信号的能量损失,障碍物的阻挡,尤其是金属物质甚至人体等都对天线的增益有所影响,同样蓝牙 mesh 网络接入点的天线由于需要在不考虑使用位置和方向的时候能够顺利的进行蓝牙无线信号的传输,也需要高增益的蓝牙天线,因此不仅需要考虑到天线本身的通信效果,还需要将天线的尺寸、生产成本以及周围环境一并考虑进去^[11],这样才能确保蓝牙天线的可靠性和稳定性。

1.1 天线基本原理

倒 F 天线是单极子天线的一种变形结构,广泛应用于蓝牙、WiFi 等短距离无线通信领域。倒 F 天线衍变发展的过程可以看成是从 1/4 波长单极子天线到倒 L 天线再到倒 F 天线的过程^[6],它的出现是为了解决倒 L 天线输入阻抗不易调节的问题。倒 F 天线的模型如图 1 所示。

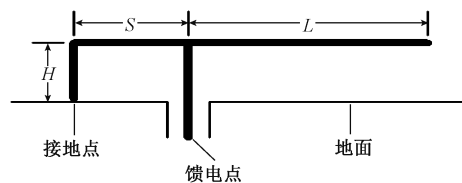


图 1 倒 F 天线

Fig. 1 Inverted-F antenna

倒 F 天线谐振长度 L 与天线高度 H 的和介于 $1/4$ 个自由空间工作波长与 $1/4$ 个介质层导波波长之间^[5],即:

$$H + L = \frac{\lambda}{4} \quad (1)$$

式中: λ 介于自由空间工作波长和介质层导波波长之间。对于蓝牙天线,自由空间工作波长为^[12]:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (2)$$

$$H + L = \frac{\lambda_0}{4} \quad (3)$$

根据文献[7]可知,介质层导波波长与自由空间工作波长的关系为:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (4)$$

$$H + L = \frac{\lambda_g}{4} \quad (5)$$

综合以上公式,可以得到倒 F 天线尺寸的经验公式为^[12]:

$$H + L \approx \frac{\lambda_0}{4 \sqrt{\frac{(1 + \epsilon_r)}{2}}} \quad (6)$$

1.2 天线设计要求

本文设计的蓝牙天线主要应用于蓝牙 mesh 网络节点的远距离通信,具备宽频带、高增益、小型化的特性^[13],天线的主要指标如下:1) 天线覆盖 2.4~2.48 GHz 的 ISM(industrial scientific medical) 频段,中心工作频率为 2.44 GHz。2) 阻抗匹配 50Ω 。3) 回波损耗 $S_{11} < -10$ dB,或者驻波比 < 2 。4) IPEX 转接线(一种射频连接线) 10 cm。5) 天线结构简单,且便于调试安装。

1.3 天线参数分析与结构设计优化

蓝牙天线印刷在双面覆铜的圆形介质板上,整个蓝牙天线结构大致可以分为 3 个部分,分别是辐射板、介质板和接地板^[14]。介质板的材质使用的是玻璃纤维环氧树脂(FR4)^[15],其相对介电常数 $\epsilon_r = 4.4$,损耗正切 $\tan \delta = 0.02$,厚度为 1 mm,接地板位于介质板的下表面,蓝牙天线位于介质板的上表面^[5],蓝牙天线的接地点通过过孔与接地板连接,IPEX 转接线使用 50Ω 标准阻抗,

在设计天线时,需要尽可能地把天线的输入阻抗设计在 $50\ \Omega$,使其在工作频段内保证尽可能小的驻波比^[7]。为了确保蓝牙天线在一面为金属物质的情况下仍然可以正常的进行无线信号的传输,因而在蓝牙天线的正下方加设了一块金属板,蓝牙天线剖面如图2所示。

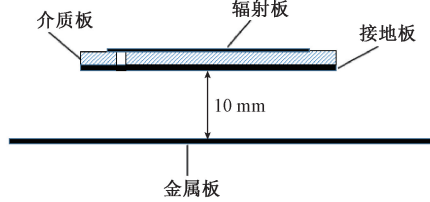


图2 蓝牙天线剖面图

Fig. 2 Cross-section view of bluetooth antenna

在保证蓝牙天线工作频率完全覆盖蓝牙频段的前提下,对蓝牙天线进行建模分析。为了进一步提高蓝牙天线的增益,在平面倒F天线的基础上进行改进,将平面倒F天线直线走向的辐射臂改成折线走向^[16],进而设计出折叠天线,天线模型如图3所示。该折叠天线不仅减小了蓝牙天线的尺寸,同时提升了蓝牙天线的增益。

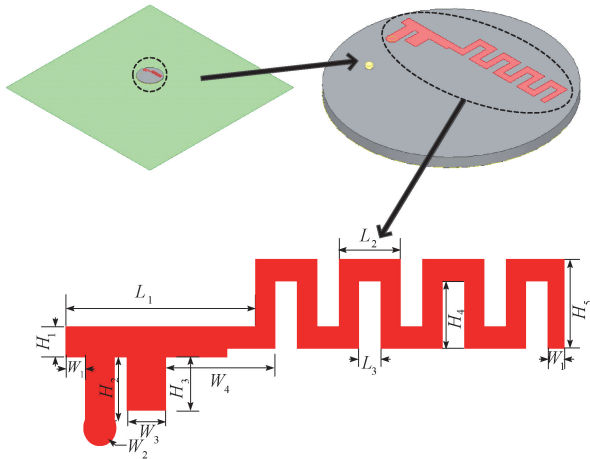


图3 折叠天线模型

Fig. 3 Folded antenna model

为了获得折叠天线最优性能,需要对天线的各个参数进行优化,经过初步的仿真分析,发现影响天线性能的主要参数为金属板与折叠天线的垂直距离 D 、天线折叠间距 $(L3+W1)$ 和天线折叠高度 $H5$,在保证其他参数不变的情况下,分别讨论这3个主要参数对折叠天线性能的影响^[6]。

1) 金属板与折叠天线的垂直距离 D (图4中为 D)

在其他参数不变的情况下,观察天线与金属板的垂直距离对天线性能的影响。 D 的初始值为5 mm,扫描范围为5~30 mm,扫描步长为5 mm,共扫描6个点,扫描结果如图4所示。

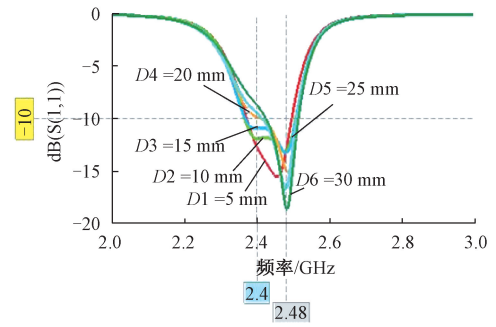


图4 不同 D 值对应的 S_{11} 曲线

Fig. 4 S_{11} curves corresponding to different D values

从图4的扫描结果可以看出,在2~3 GHz的频率变化范围内,当 $D=D6=30\text{ mm}$ 时,天线的回波损耗最小,但天线中心频率发生偏移。当 $D=D1=5\text{ mm}$ 时,天线的带宽和中心频率均是最优。

2) 天线折叠间距 $(L3+W1)$ (图5中为 M)

在其他参数不变的情况下,观察天线的折叠间距 $(L3+W1)$ 对天线性能的影响。 $(L3+W1)$ 的初始值为0.9 mm,扫描范围为0.9~1.9 mm,扫描步长为0.2 mm,共扫描6个点,扫描结果如图5所示。

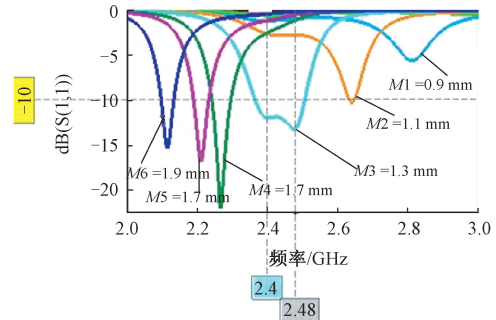


图5 不同 $(L3+W1)$ 值对应的 S_{11} 曲线

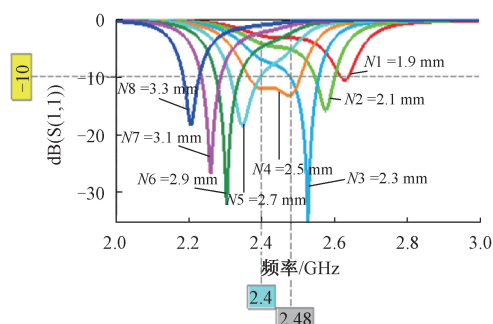
Fig. 5 S_{11} curves corresponding to different $(L3+W1)$ values

从图5的扫描结果可以看出,在2~3 GHz的频率变化范围内,当 $(L3+W1)=M3=1.3\text{ mm}$ 时,天线带宽和频率同时满足要求。

3) 天线折叠高度 $H5$ (图6中为 N)

在其他参数不变的情况下,观察天线的折叠高度 $H5$ 对天线性能的影响。 $H5$ 的初始值为1.9 mm,扫描范围为1.9~3.3 mm,扫描步长为0.2 mm,共扫描8个点,扫描结果如图6所示。

从图6的扫描结果可以看出,在2~3 GHz的频率变化范围内,当 $H5=N3=2.3\text{ mm}$ 时,天线的回波损耗最小,大约为-35 dB,但是天线的中心频率严重偏移。当 $H5=N4=2.5\text{ mm}$ 时,天线的带宽和中心频率均满足要求。

图6 不同 $H5$ 值对应的 S_{11} 曲线Fig. 6 S_{11} curves corresponding to different $H5$ values

经过多次的尺寸修改和仿真优化分析,最终确定折叠天线尺寸^[17]如表1所示。

表1 折叠天线尺寸

Table 1 Folded antenna size

参数	尺寸/mm	参数	尺寸/mm
$L1$	5.9	$W4$	3.40
$L2$	1.9	$H1$	0.85
$L3$	0.7	$H2$	1.80
$W1$	0.6	$H3$	1.50
$W2$	0.9	$H4$	1.90
$W3$	1.2	$H5$	2.50

基于表1的折叠天线尺寸进行仿真分析,发现折叠天线基本满足设计要求,但是天线的带宽比较窄,增益也不够高,天线的性能还可以进一步优化改进,因而在折叠天线的基础上,将其折线走向的辐射臂改为螺旋走向^[18-19],设计出图7(a)所示的方型螺旋天线,在经过一系列的尺寸调整和优化分析后,发现方型螺旋天线相较于折叠天线在带宽上有所提升,但是增益不高,于是将图7(a)方型螺旋天线做成图7(b)所示的切角螺旋天线,改进优化调整后,由仿真分析可知切角螺旋天线在带宽和增益上均有所改善,但是天线的尺寸还可以再优化,最终在前面两款螺旋天线的基础上设计了图7(c)所示的e型螺旋天线,天线模型如图8所示。e型螺旋天线与前两款螺旋天线和折叠天线相比,增益和带宽有很大的提升,而且天线的性能也更优越,更适合于蓝牙 mesh 节点在周围有金属物质的条件下的远距离通信。

为了获得螺旋天线更好的性能,同样也需要对其各个参数进行优化,在经过初步的仿真分析后,发现影响天线性能的主要参数为金属板与螺旋天线的垂直间距 D 、螺旋间距($W1+W3$)和螺旋圈数 T ,在保证其他参数不变的情况下,分别讨论这3个主要参数对螺旋天线性能的影响^[6]。

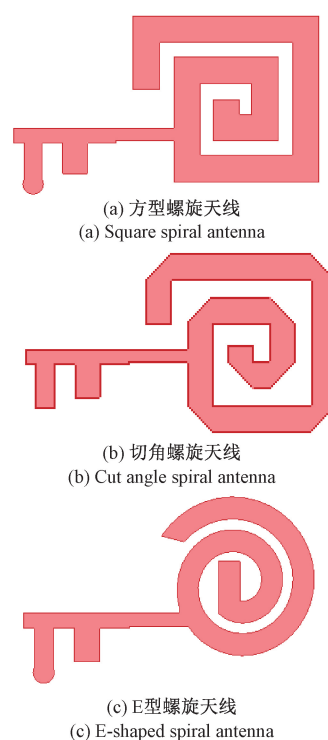


图7 螺旋天线

Fig. 7 Spiral antennas

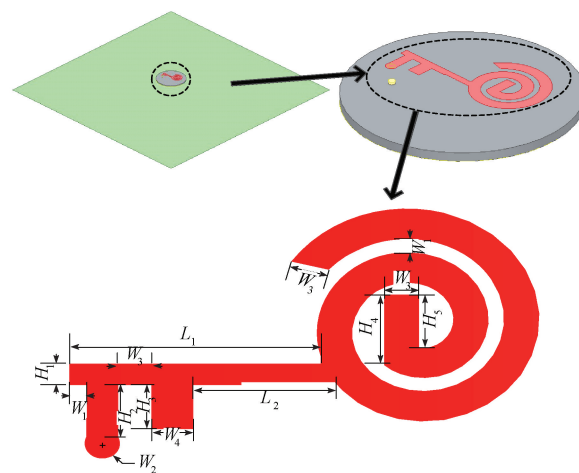


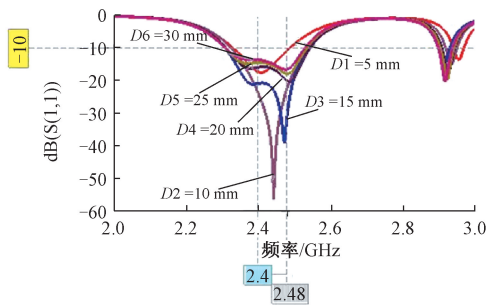
图8 螺旋天线模型

Fig. 8 Spiral antenna model

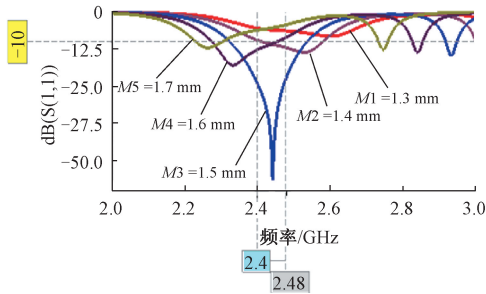
1) 金属板与螺旋天线的垂直间距 D (图9中为 D)

在其他参数不变的情况下,观察金属板与螺旋天线垂直间距 D 对天线性能的影响。 D 的初始值为5 mm,扫描范围为5~30 mm,扫描步长为5 mm,共扫描6个点,扫描结果如图9所示。

从图9的扫描结果可以看出,在2~3 GHz的频率变化范围内,当 $D=D3=15$ mm时,天线的带宽最宽,但中心频率发生偏移。当 $D=D2=10$ mm时,天线回波损耗最低且中心频率也满足要求。

图 9 不同 D 值对应的 S_{11} 曲线Fig. 9 S_{11} curves corresponding to different D values2) 螺旋间距 ($W1+W3$) (图 10 中为 M)

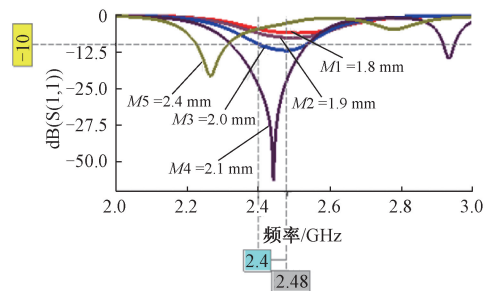
在其他参数不变的情况下,观察天线的螺旋间距 ($W1+W3$) 对天线性能的影响。 ($W1+W3$) 的初始值为 1.3 mm,扫描范围为 1.3~1.7 mm,扫描步长为 0.1 mm,共扫描 5 个点,扫描结果如图 10 所示。

图 10 不同 ($W1+W3$) 值对应的 S_{11} 曲线Fig. 10 S_{11} curves corresponding to different ($W1+W3$) values

从图 10 的扫描结果可以看出,在 2~3 GHz 的频率变化范围内,当 ($W1+W3$) = 1.5 mm 时,天线的带宽和回波损耗均是最优,而且中心频率也满足要求。

3) 螺旋圈数 T (图 11 中为 T)

在其他参数不变的情况下,观察天线的螺旋圈数 T 对天线性能的影响。 T 的初始值为 1.8 圈,扫描范围为 1.8~2.2 圈,扫描步长为 0.1 圈,共扫描 5 个点,扫描结果如图 11 所示。

图 11 不同 T 值对应的 S_{11} 曲线Fig. 11 S_{11} curves corresponding to different T values

从图 11 的扫描结果可以看出,在 2~3 GHz 的频率变化范围内,当 $T=T4=2.1$ 圈时,天线的回波损耗最小,带宽和中心频率也均满足要求。

经过多次的尺寸修改和仿真优化分析,最终确定螺旋天线的尺寸^[17]如表 2 所示。

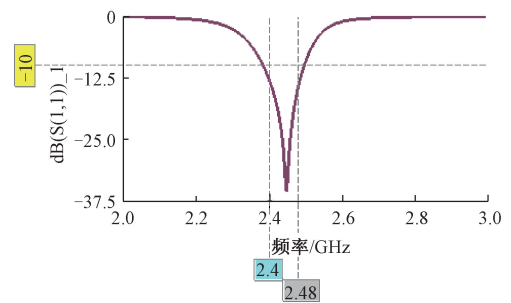
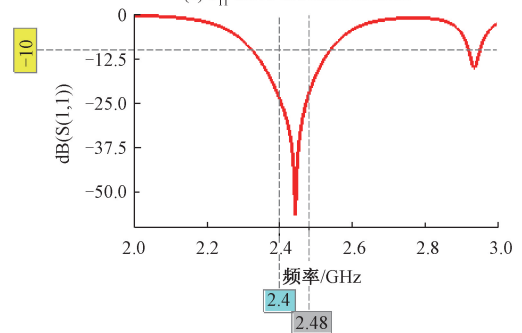
表 2 螺旋天线尺寸

Table 2 Spiral antenna size

参数	尺寸/mm	参数	尺寸
$L1$	7.35	$H1$	0.7 mm
$L2$	4.15	$H2$	1.8 mm
$W1$	0.50	$H3$	1.5 mm
$W2$	0.90	$H4$	2.4 mm
$W3$	1.00	$H5$	1.8 mm
$W4$	1.20	T	2.1 圈

2 蓝牙天线仿真

采用三维电磁仿真软件 HFSS (high frequency structure simulator) 对天线建模并仿真^[5],其中折叠天线与金属板的垂直间距为 5 mm,螺旋天线与金属板的垂直间距为 10 mm,得到折叠天线和螺旋天线的回波损耗曲线如图 12 所示。

(a) 折叠天线 S_{11} 曲线
(a) S_{11} curve of folded antenna(b) 螺旋天线 S_{11} 曲线
(b) S_{11} curve of spiral antenna图 12 两种天线的 S_{11} 曲线Fig. 12 S_{11} curves of two antennas

折叠天线回波损耗 < -10 dB 的频率范围是 2.39~2.50 GHz, 螺旋天线回波损耗 < -10 dB 的频率范围是 2.32~2.55 GHz, 其工作频率范围均覆盖了蓝牙天线的整个 ISM 频段 (2.40~2.48 GHz), 但螺旋天线的工作频段更宽。折叠天线回波损耗 $S_{11} < -10$ dB 的频段是 110 MHz, 即天线带宽约为 110 MHz, 相对带宽 $BW=4.5\%$, 天线工作在 2.44 GHz 的中心频率时, 回波损耗 $S_{11}=-36$ dB; 螺旋天线回波损耗 $S_{11} < -10$ dB 的频段是 230 MHz, 即天线带宽约为 230 MHz, 相对带宽 $BW=9.4\%$, 天线工作在 2.44 GHz 的中心频率时, 回波损耗 $S_{11}=-56$ dB, 螺旋天线的回波损耗比折叠天线更小, 带宽更宽, 螺旋天线的性能更优越。

图 13 所示为天线的输入阻抗曲线, 在 2.44 GHz 的中心频率上, 折叠天线的输入阻抗为 $(39-i \cdot 15) \Omega$, 螺旋天线的输入阻抗则为 $(49-i \cdot 4) \Omega$, 螺旋天线结构达到了良好的阻抗匹配效果, 良好的阻抗匹配有助于进一步增加天线工作带宽, 同时可以大大减小天线的能量损耗。

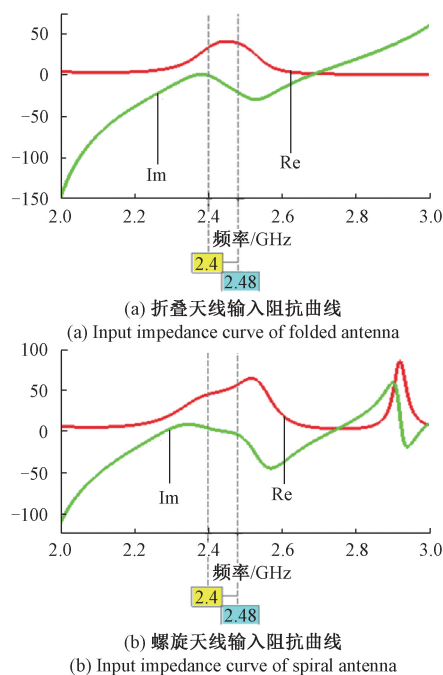


图 13 两种天线的输入阻抗曲线

Fig. 13 Input impedance curves of two antennas

图 14 和 15 所示为天线的方向图仿真结果, 折叠天线的 H 面最大增益为 2.0 dB, E 面最大增益为 -10.5 dB, 螺旋天线的 H 面最大增益为 2.5 dB, E 面最大增益为 2.2 dB。从图 14(c) 和 15(c) 天线仿真的三维增益方向图可以看出, 折叠天线工作在 2.44 GHz 的中心工作频率时, 天线的最高增益约达到 3.2 dB, 螺旋天线的最高增益则达到 3.5 dB。螺旋天线的 H 面、E 面以及三维增益均有所提高。

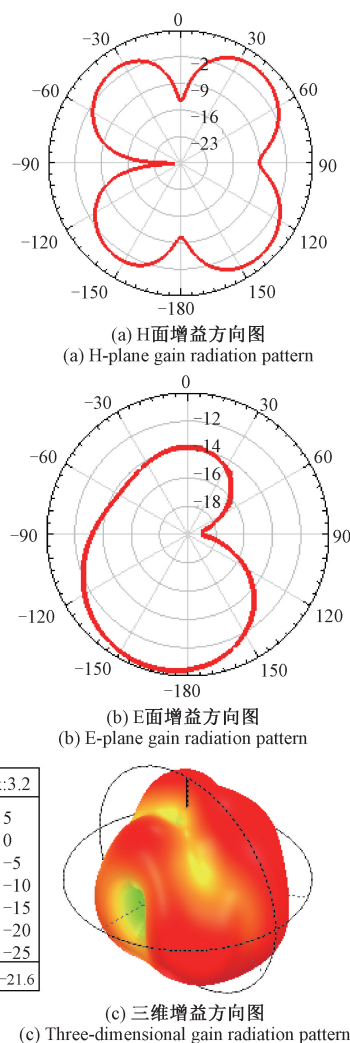
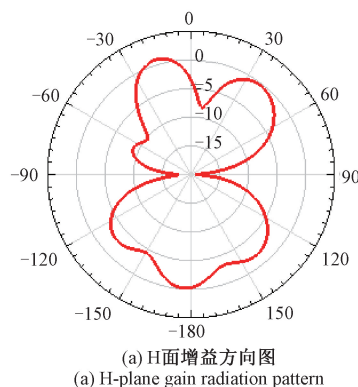


图 14 折叠天线方向图

Fig. 14 Folded antenna radiation patterns

综合图 16 所示的天线仿真对比, 可以看出螺旋天线的回波损耗比折叠天线低 20 dB, 带宽比折叠天线宽 120 dB, 阻抗匹配的效果更好, 增益更高, 性能要优于折叠天线, 更适合蓝牙 mesh 网络节点周围有金属物质的情况下的远距离通信。



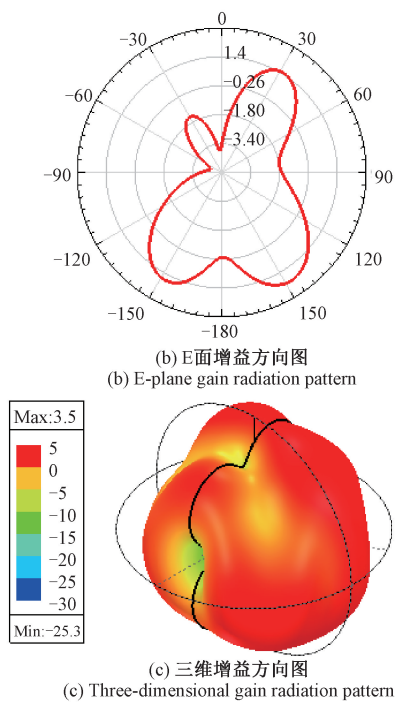


图15 螺旋天线方向图

Fig. 15 Spiral antenna radiation patterns

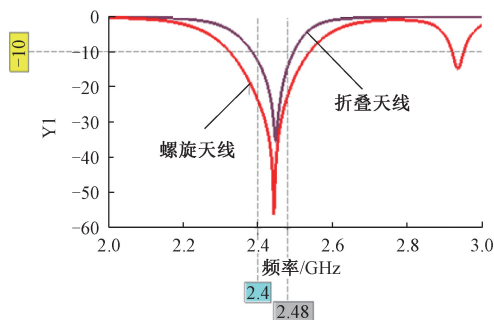


图16 天线仿真对比

Fig. 16 Antenna simulation comparison

3 蓝牙天线实测与分析

根据仿真的天线模型和优化的结构参数制作蓝牙天线实物,天线印刷在一块厚度为1 mm,直径20 mm的圆形介质板上,采用矢量网络分析仪分别测量天线在有无金属板情况下的回波损耗^[20]。当天线周围存在金属板时,要先在147 mm×147 mm×1.5 mm的铁质金属板的正中央打一个圆孔,将特性阻抗为50 Ω的IPEX转接线的一端通过天线馈电点焊接到蓝牙天线上,在焊接的过程中,要注意不要融化IPEX转接线的绝缘层,这样会使转接线内外导体相连,造成短路,影响天线的性能;另外焊

接时,要将转接线的内导体(起传输信号的作用)与天线馈电点充分焊牢,才不至于影响天线的性能,IPEX转接线带有转接头的另一端穿越铁质金属板的圆孔连接在网络分析仪上,且保持天线位于铁质金属板的正中央与金属板垂直间距为:折叠天线5 mm、螺旋天线10 mm,并在网络分析仪上mark 3个点,频率分别为2.40、2.44、2.48 GHz,实验测试如图17所示。采用Origin软件分别绘制折叠天线和螺旋天线在两种情况下测得的回波损耗曲线,如图18所示。

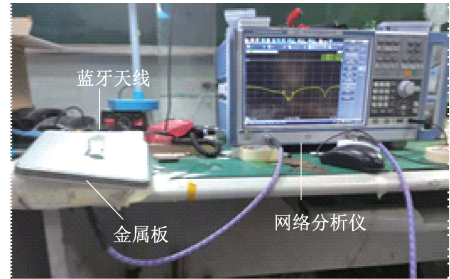
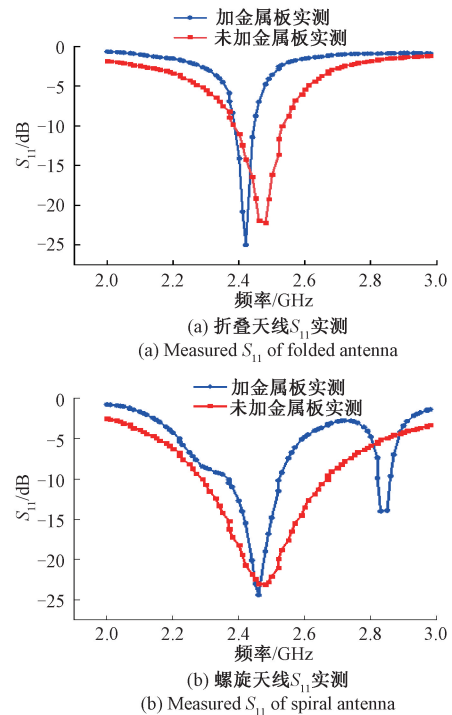


图17 网络分析仪测试

Fig. 17 Network analyzer test

图18 天线 S_{11} 实测对比Fig. 18 Comparison of the measured S_{11} of two antennas

从图18的测量曲线结果可以看出,折叠天线和螺旋天线在有金属板的情况下,-10 dB带宽均有不同程度的收缩,可见金属物质会对天线的带宽造成影响,总体来

说,折叠天线在有金属板情况下的 -10 dB 带宽范围是 $2.39 \sim 2.44$ GHz,螺旋天线则为 $2.37 \sim 2.52$ GHz。实测与仿真略有差异,这可能是由于加工和测试过程中各种不确定因素的影响,导致测试结果存在一定的误差。实际测试误差的主要原因有:1) 天线模型加工制作中的误差;2) 仿真为理想天线模型,实际测试中存在诸多因素的影响;3) 网络分析仪未校准、连接器老化;4) IPEX 转接线与蓝牙天线的焊接误差。

将蓝牙天线固定在微波暗室的中心转台上,测量蓝牙天线的增益,实验测试要求同网络分析仪测试一样,测试环境如图 19 所示。采用 Origin 软件把微波暗室测量的两组天线增益数据分别绘制在曲线图上,结果如图 20 所示。

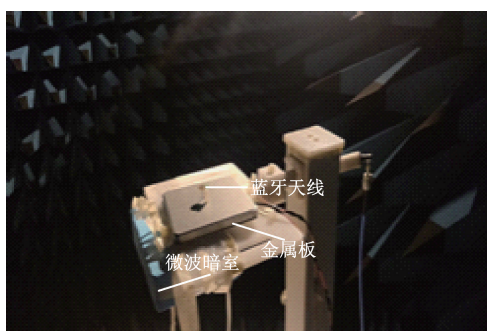
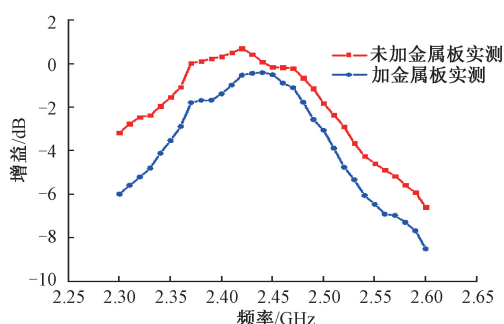
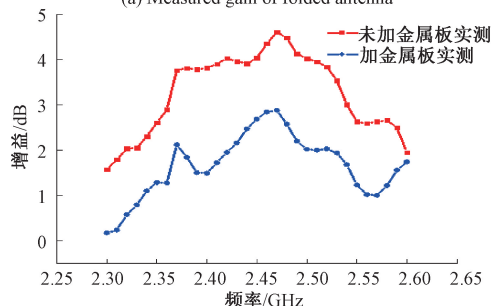


图 19 微波暗室测量

Fig. 19 Microwave darkroom measurement



(a) 折叠天线增益实测
(a) Measured gain of folded antenna



(b) 螺旋天线增益实测
(b) Measured gain of spiral antenna

图 20 两种天线增益实测对比

Fig. 20 Comparison of the measured gains of two antennas

从图 20 的天线实测增益图可以看出,折叠天线和螺旋天线在有金属板情况下的增益均有一定程度的下降,无金属板情况下的螺旋天线最大增益可达 4.6 dB,加上金属板后,最大增益只有 2.9 dB,但无论何种情况下,螺旋天线的增益均优于折叠天线。

为验证蓝牙天线在周围有金属物质的情况下仍然可以正常的进行远距离通信,搭建如图 21 所示的实验平台,首先将 2 个同类型的天线分别通过 IPEX 转接线穿过 $147 \text{ mm} \times 147 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 的铁质金属板正中心的圆孔连接至 2 个无线模块,保证折叠天线与螺旋天线和金属板的垂直间距分别为 5 、 10 mm,然后通过手机 app 在无线发送端和接收端组建蓝牙 mesh 网络,不断的向远距离移动无线发送模块,测试蓝牙天线最远的传输距离。实验环境为空旷地带,在实验测试的过程中,要注意天线的方向性和天线放置的位置,调整无线模块连接的天线放置处于同一水平面高度且天线的辐射面相对,这样无线信号发送和接收的感应面是最大的,发送和接收到的电磁波信号强度也是最强的,无线传输的距离也就更远。

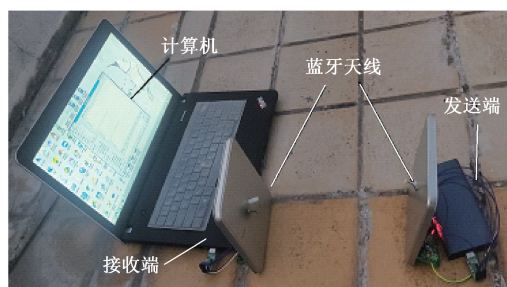


图 21 天线传输距离测量

Fig. 21 Antenna transmission distance measurement

经过实际测试,得出折叠天线在周围有金属物质的情况下,最远传输距离为 12 m ,而螺旋天线则达到 20 m ,在天线最远传输距离的有效范围内均可保证无线信号的正常传输,相较于折叠天线,螺旋天线更适合应用于蓝牙 mesh 节点的远距离传输。

4 结 论

本文在平面倒 F 天线的基础上设计的两款轻小型化蓝牙天线,可以有效解决蓝牙 mesh 网络中节点频繁布置的问题以及金属物质对蓝牙天线性能的影响。天线结构简单,尺寸小,实现了小型化以及超薄化,并且具有良好的阻抗匹配特性,可以很方便地应用于蓝牙 mesh 网络中节点之间的远距离传输。实物测试的结果进一步证明了螺旋天线高增益和远距离传输的优越性,为今后研究蓝牙天线在周围有金属物质的情况下的远距离传输提供了很好地解决思路和方法。

参考文献

- [1] ALLIES L, BLAMPAIN E, M'JAHED H, et al. Modeling of wireless SAW temperature sensor and associated antenna [J]. *Instrumentation*, 2014, 1(1): 8-14.
- [2] GONCALVES R, CARVALHO N B, PINHO P. Small antenna design for very compact devices and wearables[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2017, 11(6): 874-879.
- [3] CHEUNG C Y, YUEN J S M, MUNG S W Y. Miniaturized printed inverted-F antenna for internet of things: A design on PCB with a meandering line and shorting strip[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2018, 2018: 5172960.
- [4] NAKAGAWA Y, MICHISHITA N, MORISHITA H. A study on antenna with characteristics of insensitive to metal for installation in proximity to two metal walls[J]. *Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering*, 2019, 6(1): 118-127.
- [5] 蒋尚杰, 王全宇, 陈小强, 等. 2.4 GHz 频段倒 F 印刷天线的设计与研究[J]. *传感器与微系统*, 2020, 39(10): 39-41.
- JIANG SH J, WANG Q Y, CHEN X Q, et al. Design and study of 2.4 GHz band inverted-F printed antenna[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2020, 39(10): 39-41.
- [6] 严冬, 汪朋, 李帅永, 等. 2.45 GHz 印刷倒 F 天线的研究与实现[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(10): 2372-2380.
- YAN D, WANG P, LI SH Y, et al. Research and realization of 2.45 GHz printed inverted-F antenna[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(10): 2372-2380.
- [7] 杨辉, 涂玲英, 丰励, 等. 一种 433.92 MHz 印刷天线的设计[J]. *现代电子技术*, 2020, 43(13): 6-10.
- YANG H, TU L Y, FENG L, et al. Design of a 433.92 MHz printed antenna [J]. *Modern Electronic Technology*, 2020, 43(13): 6-10.
- [8] LIU H W, YANG C F. Miniature PIFA without empty space for 2.4 GHz ISM band applications [J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(2): 113-115.
- [9] 黄姗姗, 李骏. 一种小型蓝牙平面倒 F 天线设计[J]. *电子元件与材料*, 2014, 33(4): 40-42.
- HUANG SH SH, LI J. Design of miniaturized planar inverted-F antenna for application of bluetooth communication [J]. *Electronic Components and Materials*, 2014, 33(4): 40-42.
- [10] 严冬, 程亚军, 汪朋, 等. 基于结构合成法的微型化双频 WLAN 印刷天线设计[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(6): 1421-1432.
- YAN D, CHENG Y J, WANG P, et al. Design of miniaturized dual-band WLAN printed antenna based on structural synthesis [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(6): 1421-1432.
- [11] 陈杰. 基于 BLE 的可穿戴电子体温计的系统设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- CHEN J. The system design of a wearable electronic thermometer based on BLE[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [12] 何鱼, 刘毅, 杨银堂. 基于 PDMS 衬底的可延展柔性倒 F 天线设计[J]. *中国科学: 信息科学*, 2018, 48(6): 724-733.
- HE Y, LIU Y, YANG Y T. Design of stretchable inverted-F antenna based on PDMS substrate [J]. *Science in China: Scientia Sinica (Informationis)*, 2018, 48(6): 724-733.
- [13] 李晓峰, 谢明聪, 姜兴, 等. 一种用于 5G MIMO 系统的宽带高增益圆极化天线[J]. *微波学报*, 2020, 36(5): 51-55.
- LI X F, XIE M C, JIANG X, et al. A broadband and high gain circularly polarized antenna for 5G MIMO system [J]. *Journal of Microwaves*, 2020, 36(5): 51-55.
- [14] 何存富, 闫天婷, 宋国荣, 等. 微带贴片天线应变传感器优化设计研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(2): 361-367.
- HE C F, YAN T T, SONG G R, et al. Design and optimization of a strain sensor based on rectangular micro-strip patch antenna [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(2): 361-367.
- [15] 南敬昌, 刘银玲, 高明明, 等. 小型化分形结构 UWB 天线的研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(12): 18-25.
- NAN J CH, LIU Y L, GAO M M, et al. Research on miniaturized UWB antenna with fractal structure [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2018, 32(12): 18-25.
- [16] 李杰, 陈庆奎. 基于蓝牙 4.0 的 GPU 集群功耗测量系统设计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2014, 28(3):

314-319.

LI J, CHEN Q K. Design of GPU cluster power consumption measurement system based on bluetooth 4.0[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2014,28(3): 314-319.

- [17] 胡朝斌,朱旗. 一种小型化平面倒 F 天线设计[J]. 中国科学技术大学学报,2012,42(4):289-295.

HU CH B,ZHU Q. Design of a compact planar inverted-F antenna [J]. Journal of University of Science and Technology of China,2012,42(4): 289-295.

- [18] 郑煜铭,漆一宏,黎福海,等. 共模电流对多探头天线测量系统影响的研究[J]. 仪器仪表学报,2020,41(9):140-150.

ZHENG Y M, QI Y H, LI F H, et al. Research on common mode current aspect of multi-probe antenna measurement system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9):140-150.

- [19] 胡兴邦,孙保华,左炎春,等. 小型化复合平面螺旋天线的设计[J]. 微波学报,2016,32(S1):156-158.

HU X B, SUN B H, ZUO Y CH, et al. Design of miniaturized compound planar spiral antenna[J]. Journal of Microwaves, 2016, 32(S1): 156-158.

- [20] 王亚海,刘伟,常庆功. 170-325 GHz 频段天线测试系统方案设计[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(12): 1195-1199.

WANG Y H,LIU W,CHANG Q G. The scheme design of 170-325 GHz waveband antenna test system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(12): 1195-1199 .

作者简介



赵鹤鸣(通信作者),1982年毕业于苏州大学物理系,1984年至1985年在清华大学电子工程系助教进修班学习,1988年至1990年在德国慕尼黑工业大学进修并合作研究。现为苏州大学电子信息学院教授,博士生导师,主要研究方向为语音分析和处理、智能计算、数字信号处理系统。

E-mail:hmzhao@suda.edu.cn

Zhao Heming (Corresponding author), graduated from Department of Physics, Soochow University in 1982, studied in the Assistant Teaching Program, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University from 1984 to 1985, and studied and attended cooperative research in Technical University of Munich, Germany from 1988 to 1990. Now, he is a professor and doctoral supervisor in School of Electronic Information, Soochow University. His main research interest includes voice analysis and processing, intelligent calculation, digital signal processing system.



陈鸿海,2018年于苏州大学文正学院获得学士学位,现为苏州大学电子信息学院硕士研究生,主要研究方向为无线通信。

E-mail:2065246277@qq.com

Chen Honghai received his B. Sc. degree in 2018 from Wenzheng College of Soochow University. Now, he is a master student in School of Electronic Information, Soochow University. His current research interest is wireless communication.