



# 基于 PDMS 衬底的可延展柔性倒 F 天线设计

何鱼\*, 刘毅, 杨银堂

西安电子科技大学微电子学院, 西安 710071

\* 通信作者. E-mail: chongqingheyu@126.com

收稿日期: 2018-01-09; 接受日期: 2018-04-13; 网络出版日期: 2018-06-13

国家重点基础研究发展计划 (973) (批准号: 2015CB351906) 资助项目

**摘要** 近年来物联网的快速发展带动可穿戴领域迅速崛起, 体域网的出现对可穿戴设备的无线收发提出了新需求: 在生物医疗应用中要求收发天线能够适应拉伸弯曲形变. 传统天线制作在刚性衬底上, 不具有柔性, 而且天线在拉伸条件下发生形变, 工作频率迅速变化导致性能退化, 难以满足柔性系统的需求. 本文针对此类需求, 在柔性衬底 PDMS 材料上设计了一款可延展柔性倒 F 蓝牙天线, 通过辐射臂曲流形走线和地平面的分割设计, 天线的可延展柔性得以实现. 仿真结果显示, 设计的天线在保证工作频带完全覆盖蓝牙频段的条件下, X 轴向上可做到最大 20% 的拉伸, Y 轴向上可做到 60% 的拉伸, 同时可承受最小曲率半径为 8 mm 的弯曲.

**关键词** 可延展天线, 倒 F 天线, 可穿戴, 蓝牙

## 1 引言

近年来可穿戴技术发展迅速, 该技术结合了电子技术、生物技术和医疗技术<sup>[1,2]</sup>. 为了应对可穿戴设备之间的无线通信问题, 体域网 (body area network, BAN) 的概念被提出<sup>[3~5]</sup>, 体域网最基础也最重要的部分是无线收发天线. 传感器的柔性化趋势要求其通信天线也应具有柔性可延展性, 然而传统天线的制作工艺采用的是刚性基底, 同时使用导电性能良好但不具有柔性的金属材料, 导致传统天线不具有柔性, 同时传统天线在拉伸时发生形变, 导致天线性能迅速恶化, 难以应用在柔性可穿戴领域.

为了应对这种挑战, 一些具有优良特性的新材料被开发出来, 新材料的出现为天线设计提供了更大的自由度. 目前业界设计柔性天线通常使用新型柔性导电材料制作天线, 比如使用导电复合材料<sup>[6]</sup>、金属薄膜<sup>[7]</sup>或液态合金<sup>[8,9]</sup>来进一步提升天线的可延展特性, 这些是从材料上提升天线的柔性, 而对于柔性可延展天线结构的探索较少.

本文从可延展结构出发, 设计了一款可延展柔性倒 F 型蓝牙天线, 通过对传统结构中的直线型辐射臂和地平面柔性化设计, 使之在 PDMS 基底上具有可延展性. 天线在受到外力拉伸或者弯曲时, 仍

**引用格式:** 何鱼, 刘毅, 杨银堂, 等. 基于 PDMS 衬底的可延展柔性倒 F 天线设计. 中国科学: 信息科学, 2018, 48: 724-733, doi: 10.1360/N112018-00010  
He Y, Liu Y, Yang Y T, et al. Design of stretchable inverted-F antenna based on PDMS substrate (in Chinese). Sci Sin Inform, 2018, 48: 724-733, doi: 10.1360/N112018-00010

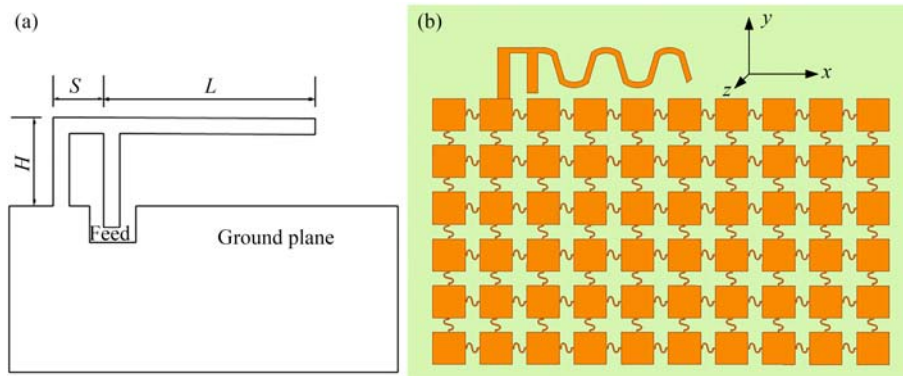


图 1 (网络版彩图) (a) 传统倒 F 天线结构和 (b) 改进可延展柔性倒 F 天线结构  
Figure 1 (Color online) (a) Traditional inverted-F antenna and (b) flexible stretchable antenna

然可以保证天线工作带宽的稳定和良好的阻抗匹配. 本文还分析了不同方向上的拉伸对天线性能的影响, 包括带宽、输入阻抗和方向图的变化等.

## 2 可延展天线设计及验证

### 2.1 可延展天线参数分析与结构设计

目前最常见的平面蓝牙天线有偶极天线、倒 F 天线、曲流型天线以及陶瓷天线<sup>[5]</sup>. 由于陶瓷天线使用了刚性的陶瓷作为天线材料, 不具有可延展性, 这里并不进行讨论. 对其他平面天线的拉伸仿真结果显示, 具有直线辐射臂的天线在拉伸时中心频率迅速下降, 阻抗失配逐渐明显, 而具有曲流形走线的天线在拉伸时表现出较好的阻抗匹配. 由于偶极子天线具有两个辐射臂, 受拉伸影响较大, 所以考虑对倒 F 天线进行曲流形改进, 传统倒 F 天线结构如图 1(a) 所示. 天线工作时, 水平长度为  $S$  的部分等效为电阻串联电感, 而长度为  $L$  的传输线部分等效为电容并联电阻, 中心频率主要由天线高度  $H$  和可视为终端开路的传输线长度  $L$  决定, 调谐长度  $L$  和短路高度  $H$  之和应等于四分之一波长, 即

$$H + L = \frac{\lambda_0}{4}. \quad (1)$$

但是由于直线型的辐射臂和整块的地平面导致其无法实现柔性可延展性. 为了使天线具有可延展柔性, 将直线型辐射臂改成具有更好可延展性的曲流形结构, 该结构辐射臂相对于直线形辐射臂具有更大的工作带宽. 同时参考 Haj-Omar 等的做法<sup>[10]</sup>, 把整体地平面分割成为由小块矩形构成的栅格地平面, 小块矩形之间使用曲流形细线连接, 整体结构如图 1(b) 所示.

设计可延展天线的另一个挑战是在天线结构上做到了可延展的同时, 能否保证天线在拉伸条件下性能的稳定. 在可延展柔性天线的应用场景中, 常常会出现天线受外力拉伸的情况, 根据天线基本理论, 天线的中心谐振频率由天线的电长度决定, 在可延展柔性天线受到外力拉伸而导致天线形变时, 天线的电长度也会随之变化, 中心频率和工作带宽都向更低的频段移动, 偏离设计的频率段. 为了解决这个问题, 可以适当地将天线的中心频率提高, 同时配合曲流形的辐射臂设计所带来的大带宽, 来缓解拉伸形变对天线频率的影响. 倒 F 天线的长度应该介于  $1/4$  个自由空间波长和  $1/4$  个介质层导波

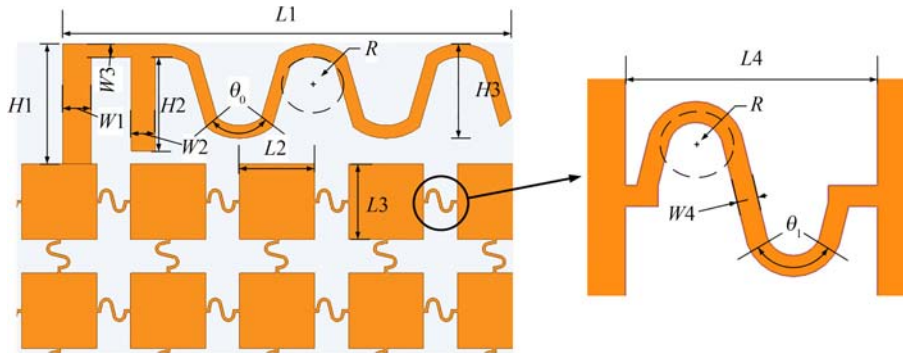


图 2 (网络版彩图) 可延展倒 F 天线结构细节图

Figure 2 (Color online) Structure parameters of stretchable inverted-F antenna

波长之间<sup>[11]</sup>, 对于蓝牙天线, 自由空间波长可以由式 (2) 得出

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2.5 \times 10^9 \text{ Hz}} = 120 \text{ mm}. \quad (2)$$

根据式 (3) 可以计算出尺寸参数  $H$  和  $L$  之间的关系<sup>[12]</sup>:

$$H + L \approx \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\frac{(1+\epsilon_r)}{2}}}, \quad (3)$$

其中,  $\lambda_0$  是自由空间中的波长,  $\epsilon_r$  是衬底材料的相对介电常数. 辐射臂改成 4 个拱形结构, 采用圆弧蛇形走线方式, 其中 4 个圆弧具有相同的曲率半径  $R$  和圆心角  $\theta_0$ , 如图 2 所示, 这样的设计可以改善天线在拉伸变形时的阻抗匹配, 原来的地平面被分割成小矩形连接成的地平面栅格, 小矩形之间以蛇形线相连, 这种蛇形线和天线辐射臂上的圆弧具有相同的曲率半径和圆心角, 即  $\theta_0 = \theta_1$ . 圆弧蛇形的走线方式具有良好的可延展性, 相对于直线结构圆弧形走线在大形变条件下对金属线的损伤较小, 不至于断裂. Hsu 等<sup>[13]</sup> 在 PI 层中制作了圆弧蛇形导线, 实验结果表明在衬底拉伸幅度达到 200% 的时候导线还能够保持导电特性而没有发生断裂, 因此圆弧蛇形的走线方式适用于可延展天线. 采用圆弧形的结构设计, 同时配合较薄的天线厚度 ( $1 \mu\text{m}$ ), 给传统倒 F 天线赋予了良好的可延展特性. 对于天线结构的力学性能而言, 天线的圆弧走线越细, 地平面的小矩形划分得越小, 天线的可延展性就越好. 但是另一方面, 由于本身天线金属层很薄, 如果走线宽度太小, 会降低天线的辐射效率, 引起阻抗失配, 导致天线可延展性变好而电学性能恶化, 因此可延展柔性和电学性能需要进行折中, 选择合适的天线走线宽度十分重要. 这里根据参数扫描结果, 适当地调整天线尺寸, 得到最终结构参数, 如表 1 所示.

在实际应用中, 地平面的部分小矩形可以去掉, 方便集成其他电子元器件. 天线辐射臂通过高度为  $H1$  的直线部分直接和地平面连接, 良好的接地设计可以有效地提高天线的工作效率<sup>[14]</sup>. 衬底采用  $1.5 \text{ mm}$  厚度的 PDMS 材料, 面积为  $48 \times 48 \text{ mm}^2$ , 该材料可以适应施加外力所引起的拉伸扭曲形变而不会发生断裂.

## 2.2 可延展天线仿真验证

通过 HFSS 对设计的可延展柔性倒 F 天线建模仿真, 设置天线馈线的特征阻抗为  $50 \Omega$ , 天线回波损耗和 Smith 圆图的仿真结果如图 3 所示.

表 1 可延展倒 F 天线结构参数表

Table 1 Stretchable antenna structure parameter table

Parameter	Value (mm)	Parameter	Value
$L1$	15.8	$W1$	1 mm
$L2$	2.6	$W2$	0.8 mm
$L3$	2.6	$W3$	0.5 mm
$L4$	2.4	$W4$	0.09 mm
$H1$	4.2	$R$	1.5 mm
$H2$	3.3	$\theta_0$	$137.6^\circ$
$H3$	3.3	$\theta_1$	$137.6^\circ$

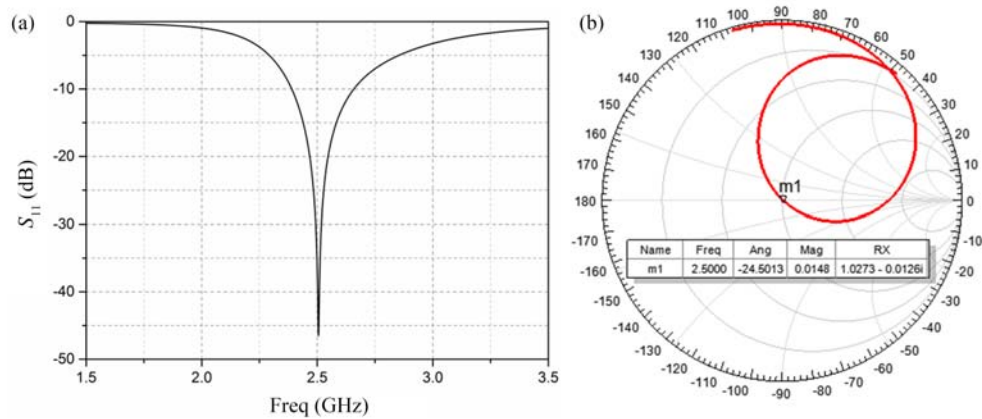


图 3 (网络版彩图) 可延展倒 F 天线回波损耗仿真结果 (a) 及归一化的 Smith 圆图 (b)

Figure 3 (Color online) Simulated return loss (a) and normalized Smith chart (b)

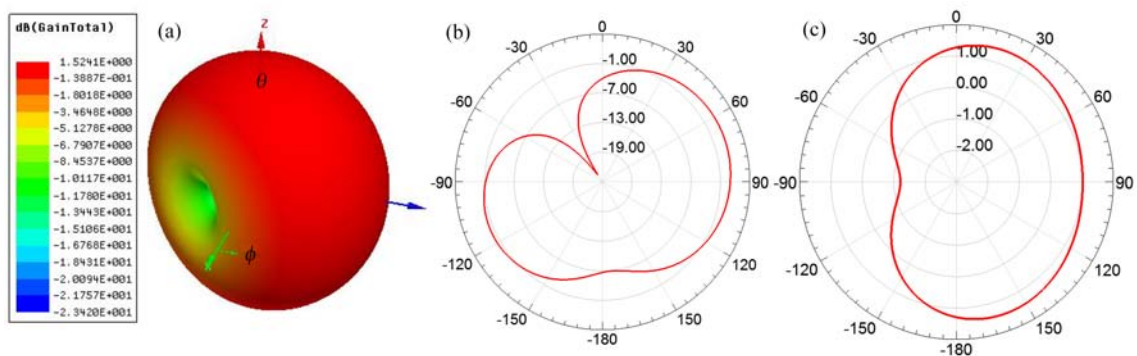


图 4 (网络版彩图) 可延展倒 F 天线 3D 方向图 (a), XY 面方向图 (b), YZ 面方向图 (c)

Figure 4 (Color online) Simulated radiation pattern (a), XY plane pattern (b), YZ plane pattern (c)

可以看到, 天线的中心谐振频率在 2.50 GHz,  $-10$  dB 带宽的低频点为 2.39 GHz, 高频点为 2.66 GHz,  $-10$  dB 带宽达到了 270 MHz 左右, 已经完全覆盖蓝牙频段 (2.402~2.485 GHz). Smith 圆图中中心频率点十分接近于圆心, 说明设计的可延展天线与天线  $50 \Omega$  馈线阻抗匹配良好, 良好的阻抗匹配有助于增大天线带宽, 可延展倒 F 天线辐射方向图如图 4 所示.



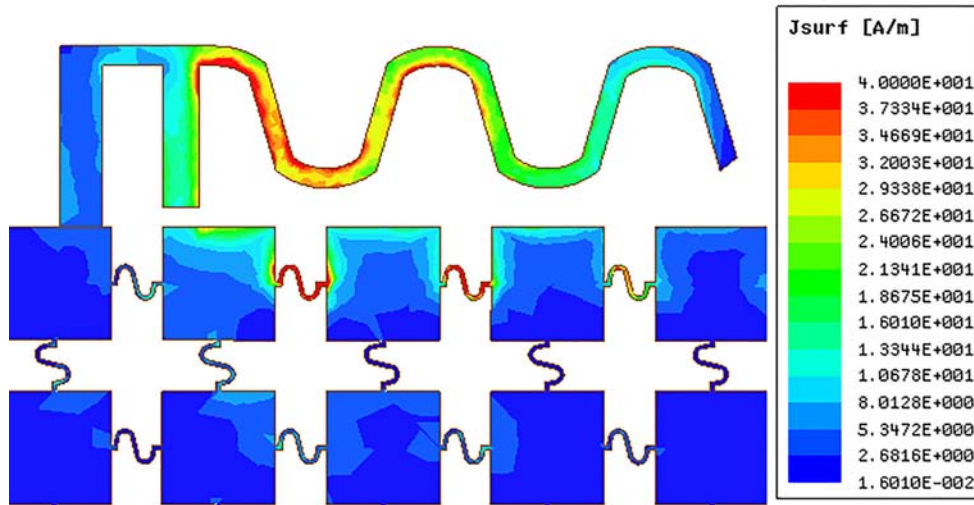


图 5 (网络版彩图) 可延展倒 F 天线表面电流分布图

Figure 5 (Color online) Simulated surface current distribution of stretchable antenna

从 3D 辐射方向图可以看到, 可延展倒 F 天线的辐射方向图与传统倒 F 天线的辐射方向图差别不大, 天线在 YZ 面的方向图接近于圆形, 全向性优于 XY 面, 天线辐射方向图中并没有出现明显的主瓣, 具有较好的全向辐射特性.

可延展倒 F 天线表面电流分布如图 5 所示, 电流主要集中在馈电端到曲流形辐射臂的一小段上, 在第一个曲流形结构处出现最大值. 从结构上看, 天线等效为一个倒 L 型天线在中间某一点处馈电, 天线的接地端阻抗最小, 电压也最小, 而开路端阻抗最大, 电压最大, 在接地端和开路端之间电压和阻抗的比值会出现极大值, 即电流出现极值, 表面电流分布给天线馈电点位置的选择提供了参考.

### 2.3 天线可延展性仿真分析

当天线被外力拉伸时, 受衬底材料 Poisson 比的影响, 在施加载荷的方向长度增加, 而在垂直的方向长度减小. Poisson 比定义为材料在单向受拉或受压时横向正应变与轴向正应变的绝对值的比值<sup>[15]</sup>:

$$v = -\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon}, \quad (4)$$

其中,  $\varepsilon_l$  为垂直方向上的应变,  $\varepsilon$  为载荷方向上的应变. 为了在 HFSS 仿真环境中描述天线在拉伸应力下的形变, 在坐标轴的 X 和 Y 方向分别定义两个拉伸系数  $C_x$  和  $C_y$ , 天线在拉伸形变之后各个点的坐标为拉伸之前的初始坐标乘以对应方向上的拉伸系数, 即

$$X_1 = X_0 \times C_x, \quad (5)$$

$$Y_1 = Y_0 \times C_y. \quad (6)$$

根据 PDMS 材料的 Poisson 比, 可以得出在 X 轴方向上施加拉伸应力时两个方向上拉伸系数的关系:

$$C_y = 1.48 - 0.48 \times C_x. \quad (7)$$

这样在天线被拉伸时自变量就变成一个, 即  $C_x$ , 这就方便在 HFSS 仿真器中对拉伸的天线进行参数扫描. 这里对 X 方向拉伸系数  $C_x$  进行了变量设置, 步长为 5%, 如表 2 所示, 仿真的回波损耗结果如

表 2 可伸展天线在  $X$  轴上和  $Y$  轴向上拉伸时  $C_x$  和  $C_y$  的变化情况  
 Table 2 The relationship between  $C_x$  and  $C_y$  when stretched in  $X$  axis and in  $Y$  axis

X axial stretching			Y axial stretching		
Stretch range (%)	$C_x$	$C_y$	Stretch range (%)	$C_y$	$C_x$
0	1.00	1.00	0	1.00	1.00
5	1.05	0.98	20	1.20	0.90
10	1.10	0.95	40	1.40	0.81
15	1.15	0.93	50	1.50	0.76
20	1.20	0.90	60	1.60	0.71
25	1.25	0.88	70	1.70	0.66

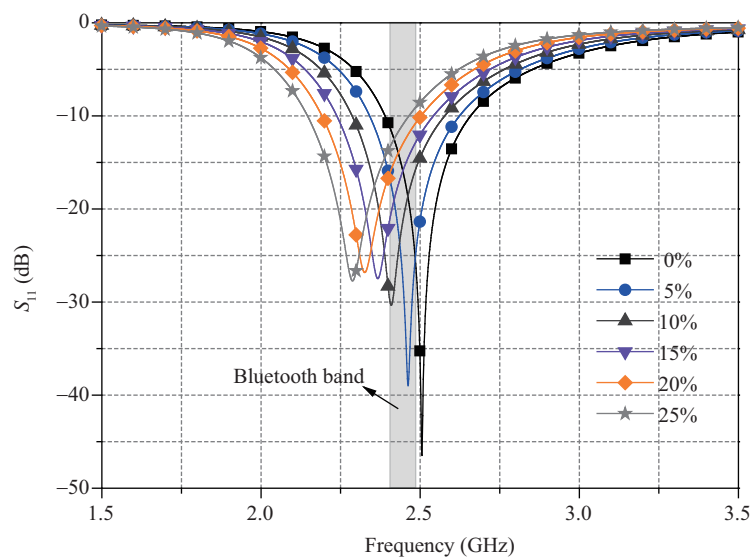


图 6 (网络版彩图) 天线  $X$  轴向上拉伸  $S_{11}$  仿真结果

Figure 6 (Color online) Simulated return loss of stretchable antenna when stretched in  $X$  axis

图 6 所示. 可以看到, 随着拉伸幅度  $C_x$  的增大, 其中心谐振频率和  $-10$  dB 带宽均缓慢地向低频段移动,  $C_x$  每增加 0.05, 天线的中心谐振频率以大约 40 MHz 的速度向下移, 从 2.50 GHz 减小到 2.29 GHz,  $-10$  dB 带宽以 10 MHz 的速度从开始的 270 MHz 增加到 320 MHz, 这得益于天线的曲流形辐射臂设计, 同时也进一步减缓了天线在受拉伸时工作带宽的下移速度. 在拉伸过程中, 天线  $S_{11}$  参数的最低值一直维持在较小的水平 ( $-25$  dB 以下), 这说明拉伸并没有造成天线与馈线的阻抗失配, 阻抗匹配较好. 蓝牙的工作频段在图中用灰色部分标示出来, 可以看到, 设计的倒 F 天线在  $X$  轴向上拉伸比例到 20% 时的工作带宽仍然可以完全覆盖蓝牙频段, 拉伸比例到 25% 时工作带宽才渐渐偏移蓝牙频段.

同样地, 我们也对天线在  $Y$  轴向上的拉伸性能进行了仿真分析, 此时拉伸变量变为  $C_y$ ,  $C_x$  可以用  $C_y$  表示:

$$C_x = 1.48 - 0.48 \times C_y. \quad (8)$$

这里仿真了  $Y$  轴向上拉伸系数  $C_y$  从 1.0 变化到 1.7 的情况下天线的回波损耗的变化, 其结果如图 7

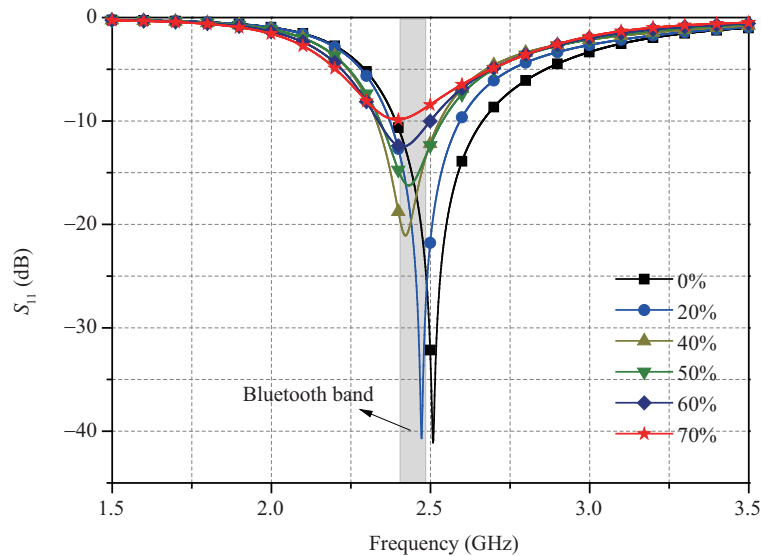
图 7 (网络版彩图) 天线 Y 轴向拉伸  $S_{11}$  仿真结果

Figure 7 (Color online) Simulated return loss of stretchable antenna when stretched in Y axis

所示.

在拉伸幅度  $C_y$  逐渐增大时, 天线的中心谐振频率也在缓慢地降低, 由于 Y 轴向的拉伸对天线电长度影响不大, 所以中心频率下降速度比 X 轴拉伸更缓慢, 在天线拉伸到 70% 时中心频率还能保持在 2.40 GHz, 这为可延展天线的应用提供了指导, 即在使用中应尽量让拉伸形变发生在 Y 轴方向上. 天线中心频率的降低也同时带动工作频带的下移, 而 -10 dB 带宽却随着拉伸量的增加而减小 (从 270 MHz 减小到 160 MHz), 这是由于 Y 轴向的拉伸使得天线和馈线的阻抗逐渐失配. 仿真结果表明, 设计的可延展倒 F 天线在 Y 轴方向上可以承受 60% 的拉伸.

#### 2.4 天线弯曲性能仿真分析

体域网应用中另一个导致天线形变的因素是弯曲, 对于制作在 PDMS 柔性衬底上的可延展天线而言, 基底的弯曲会带动天线的弯曲, 这里使用曲率半径  $R$  来表征衬底 PDMS 的弯曲程度, 如图 8 所示.

因为 PDMS 衬底很薄 (1.5 mm), 并且  $R$  的值相对厚度较大, 所以可以近似认为衬底 PDMS 的弯曲曲率半径也是制作在 PDMS 表面的天线的曲率半径. 利用 CST Microwave Studio 对可延展天线模型进行曲率半径弯曲, 之后将弯曲模型导入 HFSS 中进行天线性能仿真, 这里对天线在曲率半径在 100 mm 到 8 mm 之间的情形进行了仿真分析, 结果如图 9 所示.

在  $R = 100$  mm 时, 天线中心频率位于 2.48 GHz, -10 dB 带宽为 270 MHz. 随着曲率半径的增加, 中心频率并非单调降低, 而是出现了一定的“振荡” (在  $R = 50$  mm 处中心频率升高到 2.52 GHz). 随着  $R$  的增加, 天线的工作带宽在逐步降低 (从 270 MHz 降低到 170 MHz). 总体而言, 天线即使在弯曲到极限的情况下其工作带宽仍然可以很好地覆盖到蓝牙频段 ( $R = 8$  mm 时, -10 dB 带宽从 2.33 GHz 到 2.50 GHz), 在弯曲条件下天线带宽表现出较好的稳定性.

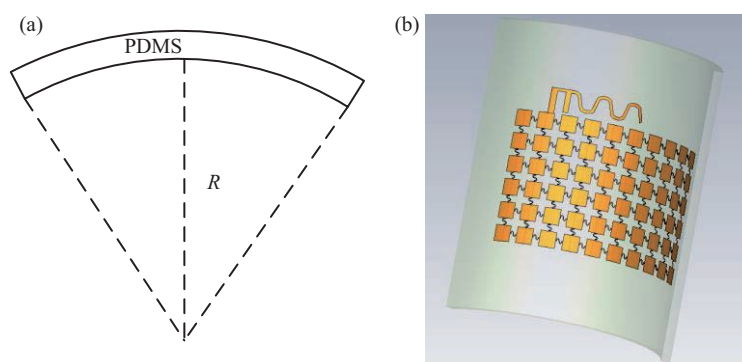


图 8 (网络版彩图) 可延展天线弯曲曲率半径示意图

Figure 8 (Color online) Schematic of the bending radius of stretchable antenna

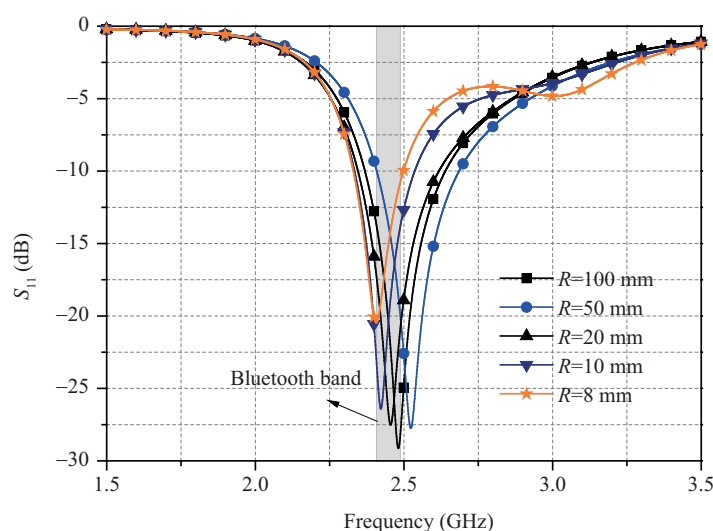


图 9 (网络版彩图) 可延展天线弯曲曲率半径示意图

Figure 9 (Color online) Schematic of the bending radius of stretchable antenna

### 3 结论

本文从传统倒 F 天线结构出发, 设计了具有可延展柔性的倒 F 天线结构, 该天线工作在蓝牙频段, 天线结构紧凑, 占用面积小, 具有良好的阻抗匹配特性. 通过对天线辐射臂结构曲流形设计和地平分割, 同时配合可延展柔性衬底材料, 使天线具有良好的可延展特性和可弯曲特性. 仿真结果表明, 在保证工作带宽全覆盖蓝牙频段的条件下, 天线在  $X$  轴向上可做到 20% 的拉伸, 在  $Y$  轴向上可做到 60% 的拉伸, 天线可以做到曲率半径最小为 8 mm 的曲率弯曲. 目前报道的可延展天线要么不具有可弯曲特性, 要么只有在一个维度上才有可延展性<sup>[16]</sup>, 本天线具有多维度的可延展、可弯曲特性, 能够更好地满足体域网应用对蓝牙天线的要求. 由于采用生物相容性较好的 PDMS 柔性基底, 所以可延展天线可以贴合在人体表面, 并能够很好地适应表面皮肤的拉伸和弯曲形变而保持性能的稳定, 可以应用在可穿戴医疗、健康数据监测等领域. 此款可延展柔性倒 F 天线的设计能够为可延展天线的研发提供理论基础和设计参考.



## 参考文献

---

- 1 Qian X, Su M, Li F Y, et al. Research progress in flexible wearable electronic sensors. *Acta Chim Sin*, 2016, 7: 565–575 [钱鑫, 苏萌, 李凤煜, 等. 柔性可穿戴电子传感器研究进展. *化学学报*, 2016, 7: 565–575]
- 2 Xie L Q, Shi P, Cai W J. Key technology and development trend of wearable smart device. *BME & Clin Med*, 2015, 19: 635–640 [谢凌钦, 石萍, 蔡文杰. 可穿戴式智能设备关键技术及发展趋势. *生物医学工程与临床*, 2015, 19: 635–640]
- 3 Saarika U, Sharma P K, Sharma D. A roadmap to the realization of wireless body area networks: a review. In: *Proceedings of International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, Chennai, 2016. 439–443
- 4 Shankar S K, Tomar A S. A survey on wireless body area network and electronic-healthcare. In: *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, Bangalore, 2016. 598–603
- 5 Liu Y, Song Y Q. Study on wireless body area networks. *J Chin Comput Syst*, 2013, 34: 1757–1762 [刘毅, 宋余庆. 无线体域网技术研究. *小型微型计算机系统*, 2013, 34: 1757–1762]
- 6 Cai F, Li Z, Agar J C, et al. Novel stretchable electrically conductive composites for tunable RF devices. In: *Proceedings of IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Montreal, 2012. 1–3
- 7 Liu Q, Ford K L, Langley R, et al. Flexible dipole and monopole antennas. In: *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Rome, 2011. 2052–2056
- 8 Cheng S, Wu Z G, Hallbjorner P, et al. Foldable and stretchable liquid metal planar inverted cone antenna. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2009, 57: 3765–3771
- 9 Mazlouman S J, Jiang X J, Mahanfar A N, et al. A reconfigurable patch antenna using liquid metal embedded in a silicone substrate. *IEEE Trans Anten Propag*, 2011, 59: 4406–4412
- 10 Haj-Omar A, Thompson W L, Kim Y S, et al. Stretchable and flexible adhesive-integrated antenna for biomedical applications. In: *Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, Fajardo, 2016. 459–460
- 11 Zhang L Y, Liu F M, Li B. Equivalent dipole modeling and predicting of electromagnetic emissions of printed circuit boards. *Chin J Sci Instrum*, 2013, 34: 942–947 [张兰勇, 刘繁明, 李冰. 印制电路板电磁辐射等效偶极子建模与预测. *仪器仪表学报*, 2013, 34: 942–947]
- 12 Yan D, Wang P, Li S Y, et al. Research and realization of 2.45 GHz printed inverted-F antenna. *Chin J Sci Instrum*, 2015, 10: 2372–2380 [严冬, 汪朋, 李帅永, 等. 2.45 GHz 印刷倒 F 天线的研究与实现. *仪器仪表学报*, 2015, 10: 2372–2380]
- 13 Hsu Y Y, Gonzalez M, Bossuyt F, et al. Polyimide-enhanced stretchable interconnects: design, fabrication, and characterization. *IEEE Trans Electron Dev*, 2011, 58: 2680–2688
- 14 Li M, Zhang H, Li Z, et al. Design of an inverted F antenna for wireless network. *Inf Electron Eng*, 2006, 4: 464–466 [李茂, 张弘, 李智, 等. 一种适用于无线网络的倒 F 天线设计. *信息与电子工程*, 2006, 4: 464–466]
- 15 Tian Z L. The intrinsic dependence of Poisson's ratio on stretch and rotation. Dissertation for Master's Degree. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015 [田忠良. 泊松比与拉伸和旋转的内在联系. 硕士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学, 2015]
- 16 Arriola A, Sancho J I, Brebels S, et al. Stretchable dipole antenna for body area networks at 2.45 GHz. *IET Microw Anten Propag*, 2011, 5: 852–859

# Design of stretchable inverted-F antenna based on PDMS substrate

Yu HE\*, Yi LIU & Yintang YANG

*School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China*

\* Corresponding author. E-mail: chongqingheyu@126.com

**Abstract** In recent years, the rapid development of the Internet of Things (IoT) has led to the rapid rise of wearable devices, and the emergence of body-area networks (BANs) has resulted in new demands for antennas. In some areas, such as biomedical applications, antennas are required to not only be stretchable, but also bendable. Traditional PCB antennas, usually fabricated on a rigid substrate, can hardly stretch or bend and are not suitable for wearable devices physically and electrically because, once stretched, the antenna's length will increase, resulting in a lower center frequency. In this paper, a stretchable flexible inverted-F antenna based on a PDMS substrate is designed that operates in the Bluetooth band. Because of the design of the meandered-line radiation arm and the division of the ground plane and flexible substrate, a stretchable inverted-F antenna is achieved. Simulation results of the antenna during stretching and bending show that the designed antenna is able to stretch up to 20% in the  $X$  axis, 60% in  $Y$  axis, and to bear bending with a minimum radius of curvature of 8 mm while still fully covering a Bluetooth band.

**Keywords** stretchable antenna, inverted-F antenna, wearable device, Bluetooth



**Yu HE** was born in 1992. He is currently working toward the M.S. degree in microelectronics from Xidian University, Xi'an, China. His current research interests include stretchable antenna and wireless communication.



**Yi LIU** was born in 1971. He obtained his Ph.D. degree in microelectronics and solid state electronics from Xidian University, Xi'an, in 2010. He is currently a professor in the Department of Microelectronics at Xidian University. His research interests include flexible electronic system design, aerospace IC radiation effects, and digital IC design.



**Yintang YANG** was born in Hebei, China, in 1962. He received the B.S. and M.S. degrees in microelectronics and solid-state electronics from Xidian University, Xi'an, China, in 1982 and 1984, respectively, and the Ph.D. degree in electronic science and technology from Xi'an Jiaotong University, Xi'an. He has been a professor with the School of Microelectronics, Xidian University, since 1997. His research interests include SoC design, mixed-signal

IC design, data converters, and IC reliability.