

# 应用于体域网的可穿戴天线研究进展

张靓韞<sup>1</sup>, 杨曙辉<sup>1</sup>, 逯贵祯<sup>1</sup>, 王文松<sup>2</sup>, Yinchao Chen<sup>3</sup>

(1. 中国传媒大学 信息与通信工程学院, 北京 100000)

(2. 南洋理工大学 电气与电子工程学院, 新加坡 639798)

(3. 南卡罗来纳大学 电气工程系, 美国, 哥伦比亚 SC29208)

**摘要:** 随着无线通信的高速发展和可穿戴智能设备的普及, 体域网成为移动通信的一个重要组成部分, 可穿戴天线的设计得到广泛的发展。由于特殊的应用场景, 可穿戴天线一般具有低剖面、小体积、低比吸收率的特点。按照用途, 它可以划分为小型化刚性可穿戴天线, 柔性可穿戴天线和可植入式天线。小型化刚性可穿戴天线对天线弯曲度要求不高, 而柔性可穿戴天线要求天线能够与人体共形, 便于集成到衣物上。可植入式天线一般用于医疗领域, 人体不同组织对天线性能的影响尤为重要。本文主要根据可穿戴天线的用途对其国内外研究进展进行叙述, 最后做出展望。

**关键词:** 体域网; 可穿戴天线; 小型化刚性天线; 柔性天线; 可植入式天线; 比吸收率  
**中图分类号:** O422      **文献标识码:** A

## Review on Wearable Antenna Applied to Body Area Network

Liangyun Zhang<sup>1</sup>, Shuhui Yang<sup>1</sup>, Guizhen Lu<sup>1</sup>, Wensong Wang<sup>2</sup>, Yinchao Chen<sup>3</sup>

(1. School of information and communication engineering, Communication University of China, Beijing, 100000, China)

(2. School of electrical and electronic engineering, Nanyang University of Technology, Singapore 639798)

(3. Department of electrical engineering, University of South Carolina, Columbia sc29208, U.S.A)

**Abstract:** With the rapid development of wireless communication and wearable intelligent devices, the body area network (BAN) has become an important part of mobile communication, which promotes the development of wearable antenna design. Due to the special application environment, wearable antennas have the characteristics of low profile, small size, and low specific absorption. According to the applications, they can be classified into miniaturized rigid wearable antennas, flexible wearable antennas, and implantable antennas. Flexible wearable antennas can conform to the human body, and it is easily integrated into the clothing. Implantable antennas are mainly used in the medical field, and their performance would be affected by the human tissues on antenna. This paper mainly describes the research progress of wearable antennas at home and abroad and summarizes them.

**Key words:** body area network; wearable antenna; miniaturized rigid antenna; flexible antenna; implantable antenna; Specific Absorption Ratio (SAR)

### 1 引言<sup>1</sup>

随着无线通信技术的日益进步, 万物互联逐渐成为现实, 给人们的生活带来了极大便利。无线体域网作为促进人与物信息交流的重要支撑, 逐渐成为国内外研究的重点, 它被广泛应用在医疗、军事

---

作者简介: 张靓韞 (1995-), 女 (汉族), 河北任丘人, 中国传媒大学硕士研究生, E-mail: z15032382753@163.com。杨曙辉 (1971-) 男 (汉族), 黑龙江宝清县人, 中国传媒大学

---

教授, E-mail: yangshuhui@cuc.edu.cn。

活动、日常生活以及休闲娱乐等方面<sup>[5]</sup>。各类穿戴式设备随体域网通信系统的快速发展不断涌现，可穿戴天线作为这些设备传输无线信号的关键器件对信号传输质量起着决定性作用。

人体是一个庞大且复杂的电磁系统，在外加磁场作用下会表现出复杂的电磁特性，而且天线在人体活动下可能会变形弯曲，其性能也会随之变化。因此可穿戴天线的设计不仅要求天线适应可穿戴环境，而且要具有良好的辐射性能，比如低比吸收率、高增益、低剖面的特点。针对体域网不同的通信方式，可穿戴天线在结构、性能、尺寸等方面有不同的要求。对于体表通信方式，电磁波主要沿人体表面传播，要求天线具有极化方向垂直于体表的全向辐射特性；对于体外通信，则要求天线最大辐射方向垂直于体表，即需要宽边辐射方向图；对于体内通信，要考虑生物相容性，即将天线放于人体内会对性能产生什么影响以及人体是否能适应天线的放置。

本文将对体域网应用，可穿戴天线性能指标，及研究进展进行说明。

## 2 体域网应用

无线体域网是指人体周围无线设备之间的通信网络，包括体外通信<sup>[32],[38],[55]</sup>，体表通信<sup>[50],[51]</sup>和体内通信<sup>[41]-[44]</sup>，可以应用在医疗保健领域，传感器通过无线体域网将监测到的血压、温度、心跳等人体生理数据传输到医疗监控设备上，进行远程监控，还可以用于乳腺癌检测、内窥镜检查等<sup>[41]</sup>；应用在军事作战领域，士兵穿戴的电子感应设备通过体域网可以实时定位士兵位置，向士兵传达军事信息，实时监测士兵的身体情况，并及时作出反馈，提高作战效率，以及进行火灾检测等<sup>[12]</sup>；在生活方面，智能手环、智能手表、眼镜等可穿戴设备可以监测用户在跑步等健身活动中的心率，运动里程，提升用户体验，此外还可以将天线集成到夹克、鞋子、腰带、雨衣和头盔等系统中通过人体中心网络将信息传输到接收设备，进行通信<sup>[9],[10],[19],[34]</sup>。在商业领域，可以进行无线交易，使交易过程更加方便迅速<sup>[1]-[4]</sup>。

针对以上不同的应用场景，对可穿戴天线的设计目标不同。对于主要应用在医疗系统的可植入式天线，除了满足阻抗带宽要求外，生物相容性是必须考虑的因素，一般在天线外面加一个覆盖层将天

线包裹起来使其不受人体组织的影响。放置在一些可穿戴设备（如手表、眼镜等）中的天线要设计成小型化，以便集成到设备中。集成到衣物上的天线则要求天线能够与人体共形，因此较多选择柔性材料作为衬底，同时还要研究天线弯曲或褶皱对回波损耗、方向图及增益效率的影响，进而说明人体活动是否会造成天线性能恶化。此外，对于可穿戴天线而言，比吸收率 Specific Absorption Ratio (SAR) 是天线设计过程中必须考虑的指标，它表征人体组织吸收电磁辐射能量的多少。

## 3 可穿戴天线性能指标

### 3.1 比吸收率 (SAR)

天线辐射出来的部分能量会被人体吸收，超过一定限值会对人体健康造成威胁，用比吸收率可以评估人体组织吸收电磁能量的多少。比吸收率具体是指单位时间内单位质量的物质吸收的电磁辐射能量。IEEE 国际组织对比吸收率值规定为 1 g 立方体人体组织的平均比吸收率值不得超过 1.6 W/Kg，或 10 g 立方体人体组织的平均比吸收率值要小于等于 2 W/Kg<sup>[5]</sup>。比吸收率计算公式如(1)所示

$$SAR = \frac{d}{dt} \left( \frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left( \frac{dW}{\rho dV} \right) \quad (1)$$

$W$  表示辐射功率(单位: W),  $m$  表示人体组织的质量(单位: kg),  $\rho$  表示人体组织密度(单位: Kg/m<sup>3</sup>),  $V$  表示人体组织体积(单位: m<sup>3</sup>),  $t$  表示时间(单位: s)。当已知人体组织上的电场分布时，可以用式(2)计算比吸收率值。

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} |E|^2 \quad (2)$$

其中  $\sigma$  表示人体组织电导率(单位:S/m),  $E$  表示天线辐射电磁场的平均电场强度(单位:V/m)。

### 3.2 天线效率

天线的效率是描述天线将输入端功率转换为辐射功率的能力的参数。实际应用中，天线的损耗是

不可避免的, 天线辐射到空间的功率小于其接收到的功率, 天线效率定义为辐射功率与输入功率之比。由于可穿戴设备配置的电池质量轻, 体积小, 无法长时间的为系统续航, 再加上可穿戴天线位于人体附近, 受到人体组织的高介电常数影响, 天线的效率也会受到一定影响, 因此需要设计高效率的可穿戴天线<sup>[5]</sup>。

### 3.3 方向图

天线的方向图是描述天线在各个方向辐射特性的参数。通常用互相垂直的两个平面方向图表示立体方向图, 这两个平面一般是天线最大辐射方向的面, 分别为E面和H面。E面是平行于电场矢量, 且通过天线最大的辐射方向的面, 而H面是指平行于磁场矢量且通过天线最大的辐射方向的面。边界不一致性使得交叉极化分量无法消除, 因此设计的天线交叉极化越小越好, 交叉极化越小, 两路信号的相关性越小, 极化效果越好, 主极化和交叉极化可以从方向图中得到。对于可穿戴天线, 为减小天线辐射对人体的影响, 要求天线方向图的背向辐射尽可能地小, 半向全辐射模式是可穿戴天线所需要的。在天线下面放置人工磁导体(AMC), 电磁带隙结构(EBG)或高阻抗表面(HIS)可以反射电磁波, 减小对人体的辐射, 提高增益, 形成背向增益很小的半向辐射方向图。

## 4 可穿戴天线分类及研究进展

常见的天线类型有单极子天线<sup>[21],[50]</sup>, 偶极子天线<sup>[11],[22],[30]</sup>, 倒F天线<sup>[6],[7]</sup>, 微带天线<sup>[63],[64]</sup>, 圆形贴片天线<sup>[12],[56]</sup>。按照天线性能可以分为双极化天线<sup>[29],[51]</sup>, 圆极化天线<sup>[52]-[54]</sup>, 多频点天线<sup>[38]</sup>, 超宽带天线<sup>[55],[65]</sup>, 可重构天线<sup>[57]-[62]</sup>, 其中可重构天线包括频率可重构<sup>[60]</sup>, 方向图可重构<sup>[58],[62]</sup>, 极化可重构<sup>[59]</sup>等。根据用途不同, 可穿戴天线一般可以分为小型化刚性可穿戴天线<sup>[26]-[28]</sup>, 柔性可穿戴天线<sup>[65]-[69]</sup>和可植入式天线<sup>[41]-[44]</sup>。本节将详细介绍这三种天线的研究进展以及结构特点和工作性能等。

### 4.1 小型化刚性可穿戴天线

小型化刚性可穿戴天线的主要类型有小型化可穿戴天线, 纽扣类天线, 眼镜框天线, 拉链天线和皮带扣天线等放置可在可穿戴设备上的天线。这类天

线需要保证人体穿戴的舒适性和天线性能的稳定性。

对于小型化可穿戴天线的研究, 文献[6]设计了一款双模螺旋倒F按钮天线, 在低频带具有全向辐射方向图可以用于体表通信, 即实现体表多个可穿戴设备间的通信, 在高频带形成宽边辐射方向图用于离体通信, 即实现可穿戴设备与体外设备的通信。接地共面波导馈电方式方便用于测量比吸收率值, 测得的比吸收率值为 0.37 W/Kg(1g), 其缺点是测量效率低, 分别是 46.3%和 69.3%。文献[29]中提出的双频双极化天线由两对正交放置的偶极子天线组成(见图1), 采用双端口同轴馈电, 直径是 19.5 mm, 操作频段覆盖应用 5G 通信频段(4.5-4.6 GHz)和 WLAN 频段(5.1-5.5 GHz), 端口隔离度低于-20 dB, 交叉极化小于-10 dB。[36]中设计了一款带有高阻抗表面的圆形紧凑低剖面多输入多输出(multi input multi output, MIMO)天线, 天线直径是 42.2 mm, 工作在 2.4-2.49 GHz, 端口隔离度大于 15 dB, 增益大于 4.2 dBi。文献[38]中提出了一款半径为 9.25 mm 的圆形贴片天线, 该天线具有三频段特性, 分别工作在 0.867 GHz (ISM 频段), 2.38 GHz (医疗体域网频段), 5.8 GHz (无线局域网频段), 全向辐射模式可以使其应用在体外通信中。

这类天线尺寸较小, 因此常采用高介电常数的介质板以提高增益。为适应多种应用场景, 天线向着多频点/宽带天线方向发展。MIMO 技术可以消除电磁波的多径衰落, 提高信号的可靠性和稳定性。因此小型化 MIMO 天线的研究逐渐增多。

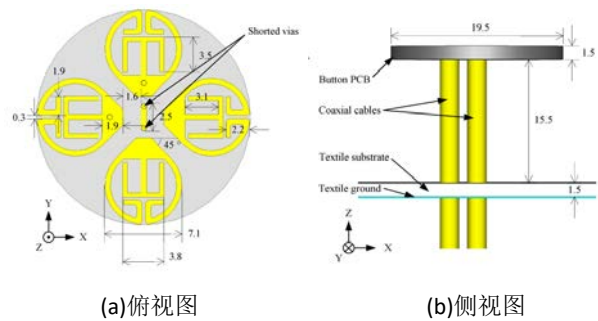


图1 双频双极化天线<sup>[29]</sup>

纽扣类天线<sup>[45]-[49]</sup>底部衬底一般为纺织材料或者导电布, 以便整合到衣物上。Hu Xiaomu 等人提出了一种工作在 2.4 GHz 和 5 GHz 的纽扣天线<sup>[50]</sup>, 如图 2 所示, 天线可看作圆形顶部贴片加载的单极子天线, 采用同轴馈电, 同轴线内导体与介质板层的贴片相连, 外导体与导电织物连接, 通孔将上层贴片与地相连, 采用线性极化。该天线具有体表/

体外两种辐射模式，效率高达 90%。为了研究纽扣天线的稳定性，对天线不同倾斜状况进行了仿真，结果表明天线的倾斜对散射参数影响不明显，倾斜后仍能工作在目标频段，说明所设计的双频纽扣天线具有良好的鲁棒性。2018 年，Chen 等人设计了一款频率可重构的可穿戴天线<sup>[48]</sup>，见图 3。通过在底部基板和顶部基板之间嵌入可重构按钮实现频率可重构特性，可重构纽扣里整合有有源元件和偏置电路，频率可重构机制实质上是通过改变贴片上边缘的电抗，改变贴片的有效电长度，进而调节变容管的电容。该天线在两个工作频段上的相对频率调谐范围分别为 32.8%和 8.8%，有效地覆盖了 2.45 GHz 和 5.8 GHz 的 ISM 频段。以上天线的极化方式都是线极化，而圆极化具有以下优点——圆极化天线接收端，发射端不需要进行极化匹配，并且圆极化天线可以消除多径衰落带来的不利影响，可以增强天线的抗干扰性能。于是，研究人员设计了几款圆极化纽扣天线来增强天线的抗干扰能力。如图 4 所示展现的是一种双频双模纽扣天线结构图<sup>[11]</sup>，工作频点为 2.45 GHz 和 5.8 GHz，偶极臂通过曲折细线连在一起，(d)中的短路弧线长度  $l_4$  等于  $1/4 \lambda_e$ ，其中  $\lambda_e$  是 6.7 GHz 对应的波长，它决定馈电延迟线的半径  $R_3$  和宽度  $W_3$ ，臂到弧线连接处阻抗很高，2.45 GHz 时电流可以通过弧线，四个偶极子臂短路，形成了一个圆形单极子天线。细线  $L_2$  减小电阻，从而在 2.45 GHz 处扩大阻抗匹配。谐振模式为  $TM_{01}$ ，可以产生垂直线极化的全向辐射图，用于体表通信。两对正交的偶极子通过 90 度相位延迟线连接，在偶极臂上引入 H 形和波纹槽，进一步提高阻抗带宽，偶极臂末端的电容用于调节阻抗匹配，从而得到右旋圆极化波，用于体外通信。该天线在低频处实现线极化，在高频处实现圆极化，增益分别为 2.2 dBi 和 8.6 dBi。文献[46]利用彩色树脂塑料纽扣设计了一种高隔离度的 MIMO 纽扣天线，端口隔离度高于 21 dB。纽扣天线一般采用同轴馈电，同轴线一方面作为馈源，一方面可以作为天线的支撑，相对于柔性可穿戴天线来说纽扣天线的剖面较高，但尺寸较小，仍满足可穿戴要求。

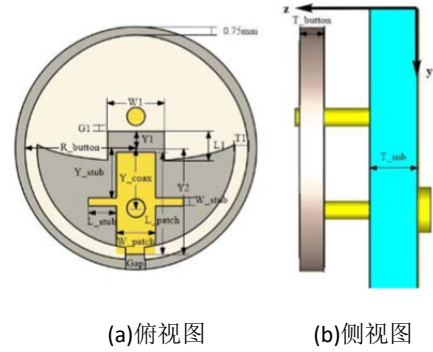


图 2 应用于 WLAN 的双频纽扣天线<sup>[50]</sup>

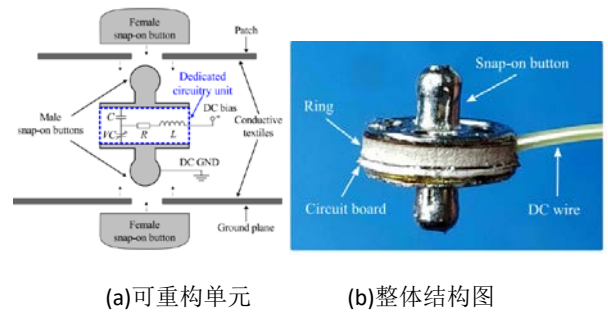


图 3 频率可重构的纽扣天线<sup>[48]</sup>

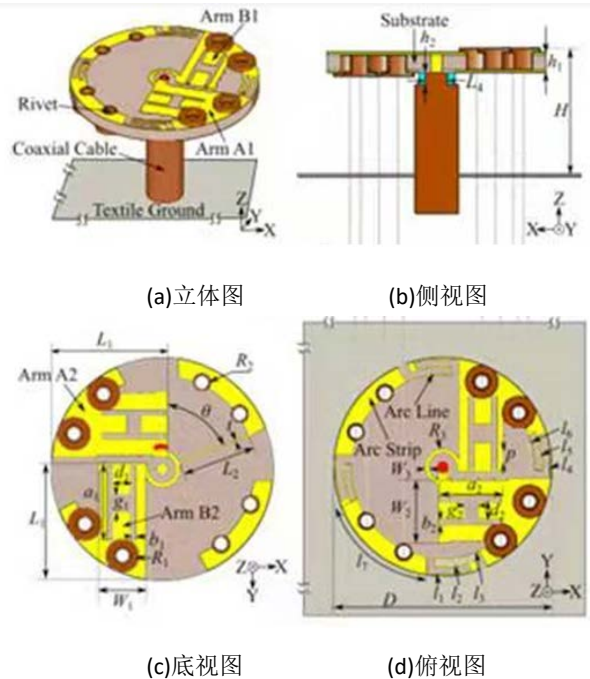


图 4 双频双模纽扣天线<sup>[11]</sup>

可穿戴设备中的天线有眼镜框天线<sup>[8],[9]</sup>，拉链天线<sup>[10]</sup>，鞋带天线<sup>[19]</sup>，皮带扣天线<sup>[15],[34]</sup>，应用于助听器上的外壳天线<sup>[28]</sup>等。文献[9]提出的是一款眼镜框天线，天线的辐射结构是金属眼镜框，馈电位于眼镜框中心，结构如图 5 所示，它工作在 5.8 GHz，带宽为 5.42–6.27 GHz，包含 ISM 波段，应用在物联网中，眼镜框天线用户可以访问智能车辆和智能家

居中设备的信息，增益是 8.18 dBi，比吸收率值为 1.56 W/Kg。镜片作为眼镜中必不可少的一部分，镜片材料对反射系数也有一定影响，采用玻璃透镜，有机玻璃透镜，树脂透镜可以发现谐振点随着透镜介电常数的减小而右移，因此选择合适的透镜材料也是使天线性能发挥到最好的因素之一。皮带扣天线<sup>[15]</sup>可以应用于智能腰带系统，建立与其他传感器的通信链路来追踪人体的运动。在皮带背面设计一个电磁带隙结构的纺织接地层，既有利于改善天线辐射特性还便于集成到皮带上。Lin 等利用衣服和包上的拉链作为辐射体，设计了一款拉链天线<sup>[10]</sup>，结构见图 6，其工作频点为 2.17 GHz 和 2.44 GHz。不同馈电位置对谐振点位置影响较大，可以通过在拉链不同位置馈电使天线工作在多个频率上，通过拉开或合上拉链可以获得不同模式的辐射方向图，实现方向图可重构。拉链不同开合程度得到的最小增益是 3.8 dBi，辐射效率在 90%以上。对于体外通信，拉链天线是一个不错的设计，不需要改变或破坏传统拉链结构。该天线可以用于以人体为中心的网络，互联网，智能家居，环境监测，定位导航等。

由以上天线的进展可以看出对可重构性能的研究逐渐增多，原因在于可重构天线可以通过一些射频器件控制不同的天线枝节，从而实现对天线电参数的控制，使天线能够应用到更多的场景中。例如通过加载 PIN 二极管和微电子机械系统 (MEMS) 的开关结构，加载可变电容/电感结构或利用多端口输入改变馈电形式来实现天线可重构特性<sup>[70]</sup>。

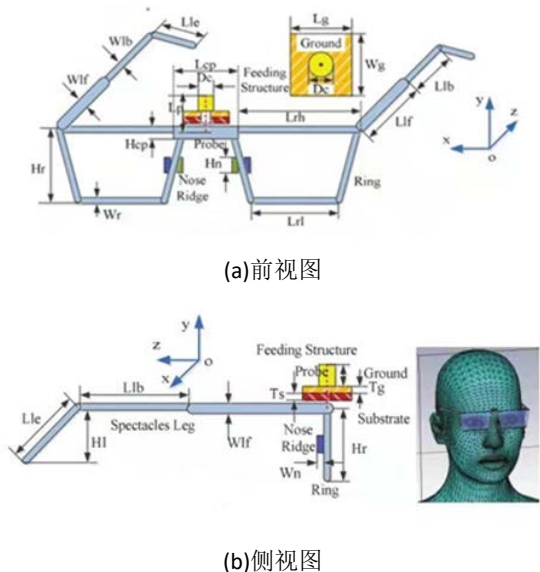


图 5 眼镜框架天线<sup>[9]</sup>

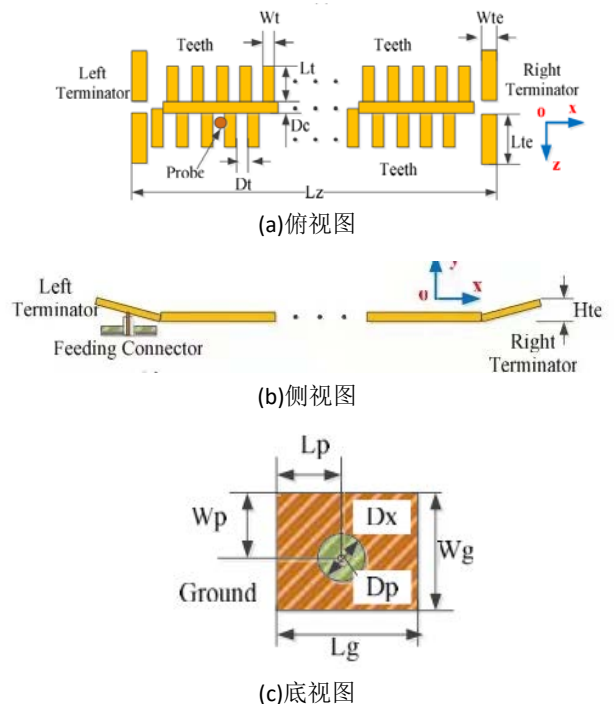
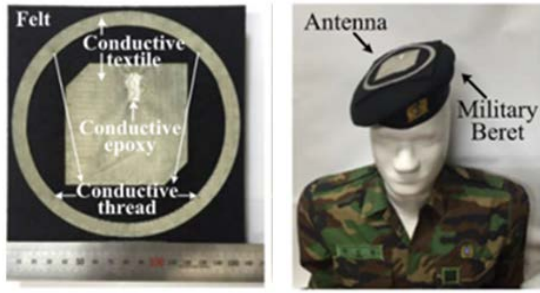


图 6 拉链天线<sup>[10]</sup>

#### 4.2 柔性可穿戴天线

柔性可穿戴天线最大的特点是介质板采用的都是易弯折的柔性材料，如牛仔布料，纺织布，毛毡材料，聚酰亚胺材料等。但是这增大了天线制造的复杂度，而传统的焊接方法不能直接将辐射贴片与介质板连接起来，因此要采用其它的手段，常用的方法是把辐射贴片用铜箔剪裁好，然后使用粘合剂将其与柔性材料连接起来。如果辐射贴片结构复杂，那么用铜箔剪裁就会有一定弊端。此外，馈电处的焊接工艺会对天线性能造成影响。

柔性可穿戴天线的剖面较低，尺寸一般较大，但是天线良好的弯曲特性使其能够与人体共形，从而可以忽略尺寸的影响，通常利用电磁带隙结构/人工磁导体/高阻抗表面等结构减小背向辐射。2017 年，Lee 等人设计了一款集成到军事贝雷帽中的双频段天线<sup>[12]</sup>，天线结构如图 7 所示。短截贴片可以应用在室外环境的 GPS 定位中，环形贴片工作在 TM<sub>41</sub> 高阶谐振模式，具有单极子辐射特性，适用于室内定位。其谐振频点为 915 MHz 和 1.575 GHz，覆盖了带宽 902-928 MHz ISM 频段和 1.563-1.587 GHz L1 GPS 频段。利用柔性材料将天线集成到贝雷帽中能够很好的实现隐蔽效果，有利于军事作战。



(a)俯视图 (b)集成到军事贝雷帽中的天线  
图 7 军事贝雷帽天线<sup>[12]</sup>

Simorangkir 等人用聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 作为基底设计了一款超宽带可穿戴天线<sup>[65]</sup>, 基底的背面用一个全地板可弯曲结构来减小比吸收率, 天线的辐射结构是带有两个弧形的简单微带天线, 见图 8, 它工作在 3.1-10.6 GHz, 驻波比小于 2.2, 增益是 4.53 dBi, 输入功率是 0.5 W 时, 比吸收率值小于 2 W/kg, 符合 FCC 要求。



(a)正视图 (b)弯曲图  
图 8 超宽带可穿戴天线<sup>[65]</sup>

2018 年, ashyap 等人提出了一种带有电磁带隙结构的高效率的共面波导天线<sup>[14]</sup>, 如图 9 所示。它工作在 2.4 GHz, 带宽为 8.3%, 应用在医疗体域网中。介质板采用牛仔布料的柔性衬底, 电磁带隙结构与天线间隔 1.7 mm, 且和介质板之间用泡沫填充, 和地平面之间用柔性衬底填充, 泡沫厚度为 1 mm, 介质板厚度是 0.7 mm。与没有加电磁带隙结构的单独天线对比, 前后比提高了 13 dB, 增益提高 6.55 dBi, SAR 值减小了 95%, 保持高度等参数不变, 将理想电导体平面与电磁带隙结构分别作为反射面对比, 发现当反射面为理想电导体时, 反射系数的值在 -10 dB 以上, 天线不能在 2.4 GHz 处正常谐振, 因此带有电磁带隙结构的天线性能最好。文献[23]研究了一种基于人工磁导体结构的低剖面偶极子天线, 将天线放到人体模型上时, 带有人工磁导体结构的天线与单独偶极子天线相比, 反射系数的仿真结果变化较小, 而且加有人工磁导体结构的天线背向辐射减小, 增益增大。这说明结合人工磁导体, 电磁带隙等周期性结构可以改善天线性能, 如提高增益, 减小比吸收率等<sup>[14]-[18]</sup>。

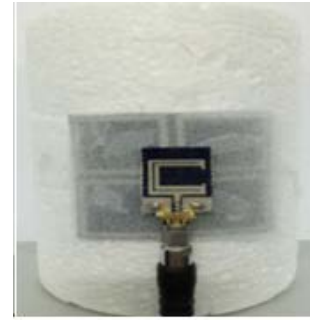
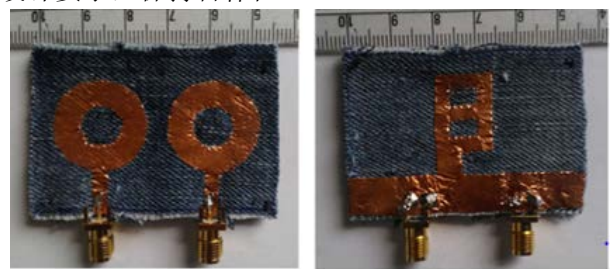


图 9 带有电磁带隙结构的高效率的共面波导天线实物图<sup>[14]</sup>

Biswas 等人提出了一种紧凑型 MIMO 可穿戴天线<sup>[25]</sup>, 采用牛仔布料作为介质板, 辐射贴片为两个紧邻的环形结构, 在双元件多输入多输出天线背面的中间位置放置“8”字形短截线, 进一步改善端口隔离度, 其结构图见图 10。文献[59]-[61]提出的是柔性可重构天线, 通过 PIN 管的开关特性改变电流路径, 实现频率可重构和极化可重构, 其中文献[61]实现的是频率可重构和方向图可重构, 通过改变天线谐振结构的长度而改变频率和方向图。2019 年 Ali 等人提出了一种共面波导馈电的柔性圆极化可穿戴天线<sup>[75]</sup>, 天线尺寸为 20 mm × 15 mm, 频点为 5.2 GHz, 3 dB 轴比带宽是 1.24%, 天线尺寸对 3 dB 轴比带宽有一定限制, 在不影响穿戴要求的情况下, 可以适当增大天线尺寸以提高轴比带宽。

柔性可穿戴天线也是向着多频点/宽频带, 高增益, 高效率, MIMO, 可重构的方向研究, 设计重点在于天线与人体共形后, 应将人体运动和周围环境的影响降到最低, 使各方面的性能指标依然满足设计要求, 保持鲁棒性。



(a)天线正面 (b)天线背面  
图 10 紧凑型 MIMO 可穿戴天线<sup>[25]</sup>

#### 4.3 可植入式天线

可植入式天线被广泛应用在医疗领域, 将天线植入人体内观测人体生命特征参数的变化, 对医疗事业作出了巨大贡献。

Wang 等人提出了一款应用于无线胶囊内窥镜检查的可植入式天线<sup>[41]</sup>, 该天线的操作频带可以覆

盖医疗设备无线电通信服务频段(401-406 MHz), 实现的最大增益为-31.5 dBi, 天线具有全向辐射模式, 无论胶囊的位置和方向如何, 接收器都能够检测到发射信号。输入功率低于 1.7 mW 可以保证 SAR 值满足 FCC 标准。该天线的优点在于: 天线和胶囊的外壁共形且具有超宽带特性(相对带宽为 134.2%), 这使得它可以克服当胶囊通过消化道内的不同组织时发生的失谐影响, 并且仍然支持高数据速率传输, 其天线结构如图 11 所示。

文献[42]中提出的小型圆极化可植入天线由两层介质板, 贴片和地板组成, 采用高介电常数的介质板及加载交指电容, 实现天线的小型化, 开槽引入微扰结构实现圆极化。文献[44]中的天线结构如图 12 所示, 环形环上的两个短截线形成圆极化, 环上的方形槽可以使天线小型化, 中间圆形贴片上的 Z 形槽是用来提高阻抗匹配和改善轴比带宽的, 最后获得的阻抗带宽是 8.3%, 轴比带宽是 2.49%。为满足比吸收率值的限制, 发射功率应低于 2.18 mW。为减轻植入式天线对人体造成的不适性, 设计了一款柔性缝隙型可植入天线 [43], 衬底采用的是 20  $\mu\text{m}$  厚的聚酰亚胺柔性材料, 天线在肌肉, 皮肤, 小肠和胃等组织中都能覆盖文献中要求的频段, 最大增益为-22.7 dBi。质量轻带宽宽的特性使其成为植入医疗设备天线中的选择之一。

可植入式天线有效口径很小, 而增益一般都是负值。为了减小天线进入人体后, 不同组织对它的影响, 需要在天线外部增加一个覆盖层, 通过手术的方式将天线放到人体内。由于人体的移动, 建立稳定的通信链路是至关重要的, 圆极化波具有抗多径效应, 通信角度的改变不会导致极化失配, 因此可植入式天线更多的采用的是圆极化模式 [44]。

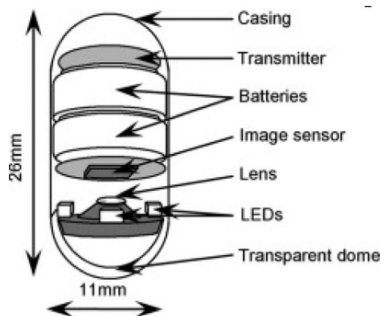


图 11 超宽带胶囊内窥镜可植入式天线 [41]

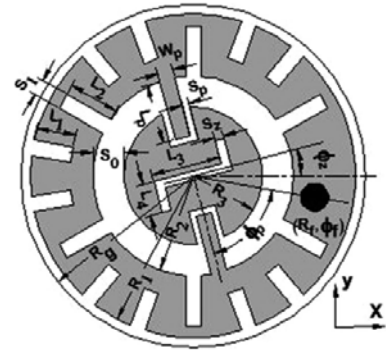


图 12 小型圆极化可植入式微带天线 [44]

可植入式天线的类型还包括小型化 MIMO 天线和可重构式天线。应用在医疗设备无线电服务频段 (401-406 MHz) 的双元件小型化可植入式单极子天线 [71] 的辐射贴片和地面均采用的螺旋线结构, 减小了天线尺寸, 在两个辐射贴片之间增添三个折叠条可以提高天线间的隔离度, 其值达到-26 dB。极化可重构倒 F 天线 [72] 工作在 2.45 GHz, 两组正交的 PIN 二极管的开关状态可以调节天线的极化方式, 接地层附近刻蚀了两个 DC 焊盘和两个电感作为射频扼流圈给 PIN 二极管提供偏置电压。方向图可重构植入式单极子天线 [73] 的介质板上下层金属通过一个短路柱连接, 在短路柱的附近有两个开关控制电流流向, 从而改变辐射方向图。

## 5 总结

由于可穿戴天线的应用场景特殊, 放置于人体上或者人体附近, 这样对天线的比吸收率有一定要求。考虑到人体的有损特性以及人的活动, 周围环境如湿度、温度等因素的影响, 所设计的可穿戴天线在弯曲或者褶皱的情况下, 其性能依然稳定。针对体域网中具体的应用场景, 设计的可穿戴天线的谐振点, 极化方式和辐射模式均有不同要求。圆极化天线接收线极化天线信号时, 线极化天线可以任意摆放, 这使得圆极化模式成为研究热点。加载射频器件可以实现天线的可重构, 加载多个谐振结构形成多频或宽带可穿戴天线。通过结合电磁带隙, 人工磁导体等周期性结构提高天线增益, 减小背向辐射, 降低比吸收率。利用 MIMO 技术减小信号多径衰落, 提高分集增益, 增强传输可靠性和抗干扰能力。利用牛仔布, 纺织布等易于与衣物集成的材料做衬底可以使天线更好的与人体共形, 增强用户的舒适感, 在军事领域中, 还有利于天线的隐藏。小型化刚性可穿戴天线因为体积小, 便于佩戴在人体上, 且具有鲁棒性, 其研究也备受关注。可植入式天线的设计除了要考虑以上问题, 还要考虑生物

相容性。

未来的可穿戴天线将向着更加时尚的外观、体积小、轻薄、便于穿戴，用户舒适感，多频或超宽带等性能以适应多种工作场景，可重构，降低比吸收率的方向发展。随着科技的不断进步，医疗系统的不断完善使得可植入式天线成为研究重点，将天线植入到人体内进行医疗检测对患者来说是一个福音。

## 参考文献

- [1] A. Y. I. Ashyap, Z. Z. Abidin, S. H. Dahlan, H. A. Majid, M. R. Kamarudin, R. A. Abd-Alhameed. Robust low-profile electromagnetic band-gap-based on textile wearable antennas for medical application[C]. International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Innovative Structures, and Applications (iWAT), Athens, 2017: 158-161.
- [2] A. Y. I. Ashyap et al. Compact and low-profile textile EBG-Based antenna for wearable medical applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2550-2553.
- [3] S. Seneviratne et al. A survey of wearable devices and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4): 2573-2620.
- [4] M. Chan, D. Estève, J.-Y. Fourniols, C. Escriba, E. Campo. Smart wearable systems: Current status and future challenges[J]. Artif. Intell. Med. Nov. 2012, 56(3): 137-156.
- [5] 董雅儒, 李书芳, 洪卫军. 可穿戴天线研究综述[J]. 信息技术, 2018, 000(004): 26-32, 58.
- [6] X. Y. Zhang, H. Wong, T. Mo, Y. F. Cao. Dual-band dual-mode button antenna for on-body and off-body communications[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, Aug. 2017, 11(4): 933-941.
- [7] S. Das, D. Mitra. A compact wideband flexible implantable slot antenna design with enhanced gain[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Aug. 2018, 66(8): 4309-4314.
- [8] Yu-Fa Zheng, Guang-Hua Sun, Qi-Kai Huang, Sai-Wai Wong, Li-Sheng Zheng. Wearable PIFA antenna for smart glasses application[C]. IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM), Guangzhou, China, 2016: 370-372.
- [9] Y. Wang, J. Zhang, F. Peng, S. Wu. A glasses frame antenna for the applications in Internet of Things[J]. IEEE Internet of Things Journal, Oct. 2019, 6(5): 8911-8918.
- [10] G. Li, Y. Huang, G. Gao, X. Wei, Z. Tian, L. Bian. A handbag zipper antenna for the applications of body-centric wireless communications and Internet of Things[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Oct. 2017, 65(10): 5137-5146.
- [11] X. Yin, S. J. Chen, C. Fumeaux. Wearable dual-band dual-polarization button antenna for WBAN applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Dec. 2020, 19(12): 2240-2244.
- [12] H. Lee, J. Tak, J. Choi. Wearable antenna integrated into military berets for indoor/outdoor positioning system[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1919-1922.
- [13] P. B. Samal, P. Jack Soh, Z. Zakaria. Compact and wearable microstrip-based textile antenna with full ground Plane designed for WBAN-UWB 802.15.6 application[C]. European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Krakow, Poland, 2019: 1-4.
- [14] A. Y. I. Ashyap et al. Highly efficient wearable CPW antenna enabled by EBG-FSS structure for medical body area network applications[J]. IEEE Access, 2018, 6: 77529-77541.
- [15] R. Pei et al. Wearable EBG-backed belt antenna for smart on-body applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, Nov. 2020, 16(11): 7177-7189.
- [16] G. Gao, B. Hu, S. Wang, C. Yang. Wearable circular ring slot antenna with EBG structure for wireless body area network[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Mar. 2018, 17(3): 434-437.
- [17] K. Agarwal, Y. Guo, B. Salam. Wearable AMC backed near-endfire antenna for on-body communications on latex substrate[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Mar. 2016, 6(3): 346-358.
- [18] M. El Atrash, M. A. Abdalla, H. M. Elhennawy. A wearable dual-band low profile high gain low SAR antenna AMC-backed for WBAN applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Oct. 2019, 67(10): 6378-6388.
- [19] 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(06): 724-733.
- [20] Pekka Salonen, Mikko Keskilammi, 郭玉春, 曹国英. 可



- 穿戴式柔性天线[J]. 通信对抗, 2010, (02): 60-64.
- [21] 杨竟松, 金杰. 具有带阻特性的可穿戴超宽带单极子天线的研究[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2020, 53(03): 21-24.
- [22] S. Ismail, A. Barton, P. Gaydecki, N. Karimian, S. Karimian. Design and development of a compact wearable dipole GPS antenna[C]. European Microwave Conference (EuMC), London, UK, 2016: 96-99.
- [23] W. Li, W. Chung, F. Hsiao, T. Kao, M. Huang. Conformal integrated multi-layer thin-film antenna by novel LITA technologies for smartwatch wearable device applications[C]. International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Okinawa, Japan, 2016: 22-23.
- [24] 邱永峰, 刘柱, 蒋建辉, 潘少鹏, 申婉婷, 李高升. 基于人体常规饰品的新型可穿戴天线研究概述[A]. 2019 年全国天线年会论文集(下册)[C]. 中国电子学会: 中国电子学会天线分会, 2019: 3.
- [25] Biswas A K, Chakraborty U. Compact wearable MIMO antenna with improved port isolation for ultra-wideband applications[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2019.
- [26] 禹忠, 冯飞妮, 秦婷. 一种双频段 LoRa 紧凑型可穿戴开槽平面天线[J]. 微电子学, 2019, 49(04): 534-538, 544.
- [27] T. T. Le, T.-Y. Yun. Miniaturization of a dual-band wearable antenna for WBAN applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Aug. 2020, 19(8): 1452-1456.
- [28] A. Ruaro, J. Thaysen, K. B. Jakobsen. Wearable shell antenna for 2.4 GHz hearing instruments[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Jun. 2016, 64(6): 2127-2135.
- [29] J. Zhang, S. Yan, X. Hu, G. A. E. Vandenbosch. Dual-band dual-polarized wearable button array with miniaturized radiator[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, Dec. 2019, 13(6): 1583-1592.
- [30] E. F. N. M. Hussin et al. A wearable textile dipole for search and rescue application[C]. International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA), Ras Al Khaimah, United Arab Emirates, 2016: 1-4.
- [31] R. Joshi et al. Dual-band, dual-sense textile antenna with AMC backing for localization using GPS and WBAN/WLAN[J]. IEEE Access, 2020, 8: 89468-89478.
- [32] 蒋之浩. 高性能新型体外通信可穿戴天线[A]. 2017 年全国微波毫米波会议论文集(中册)[C]. 中国电子学会: 中国电子学会微波分会, 2017: 1.
- [33] C. Mendes, C. Peixeiro. A dual-mode single-band wearable microstrip antenna for body area networks[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 3055-3058.
- [34] 肖伟宏, 聂在平. 应用于 MIMO 系统终端的腰带式可穿戴天线[J]. 电波科学学报, 2007, (01): 108-112.
- [35] S. M. Saeed, C. A. Balanis, C. R. Birtcher, A. C. Durgun, H. N. Shaman. Wearable flexible reconfigurable antenna integrated with artificial magnetic conductor[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2396-2399.
- [36] D. Wen, Y. Hao, M. O. Munoz, H. Wang, H. Zhou. A compact and low-profile MIMO antenna using a miniature circular high-impedance surface for wearable applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Jan. 2018, 66(1): 96-104.
- [37] 王培杰, 程铨峪, 杨凌升. 一款应用于 5.8GHz 的 ISM 频段两单元可穿戴天线系统设计与实现[J/OL]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1063.N.20180330.1543.018.html>. 2018-03-30/2021-03-14.
- [38] P. Sambandam, M. Kanagasabai, R. Natarajan, M. G. N. Alsath, S. Palaniswamy. Miniaturized button-like WBAN antenna for off-body communication[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Jul. 2020, 68(7): 5228-5235.
- [39] 卢忠花, 王卿璞, 鲁海瑞, 袁帅, 王丹丹. 柔性可穿戴电子的新进展[J]. 微纳电子技术, 2014, 51(11): 685-691, 701.
- [40] A. Iqbal, A. Smida, A. J. Alazemi, M. I. Waly, N. Khaddaj Mallat, S. Kim. Wideband circularly polarized MIMO antenna for high data wearable biotelemetric devices[J]. IEEE Access, 2020, 8: 17935-17944.
- [41] J. Wang, M. Leach, E. G. Lim, Z. Wang, R. Pei, Y. Huang. An implantable and conformal antenna for wireless capsule endoscopy[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Jul. 2018, 17(7): 1153-1157.
- [42] 张蕾, 陈强, 姜文. 小型圆极化可植入天线设计[A]. 2019 年全国天线年会论文集(下册)[C]. 中国电子学会: 中国电子学会天线分会, 2019: 3.
- [43] 丁宇星, 李鹏, 薛鹏飞, 常劲龙, 宗卫华. 新型共面波

- 导馈电柔性缝隙型可植入天线研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2019, 34(03): 74-78.
- [44] R. Li, Y. Guo, B. Zhang, G. Du. A miniaturized circularly polarized implantable annular-ring antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 2566-2569.
- [45] S. Yan, G. A. E. Vandenbosch. Design of wideband button antenna based on characteristic mode theory[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, Dec. 2018, 12(6): 1383-1391.
- [46] A. Kumar Biswas, S. S. Pattanayak, U. Chakraborty. Evaluation of dielectric properties of colored resin Plastic button to design a small MIMO antenna[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Nov. 2020, 69(11): 9170-9177.
- [47] B. Mandal, A. Chatterjee, P. Rangaiah, M. D. Perez, R. Augustine. A low profile button antenna with back radiation reduced by FSS[C]. *European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Copenhagen, Denmark, 2020: 1-5.
- [48] S. J. Chen, D. C. Ranasinghe, C. Fumeaux. A robust snap-on button solution for reconfigurable wearable textile antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Sept. 2018, 66(9): 4541-4551.
- [49] X. Hu, S. Yan, G. A. E. Vandenbosch. Compact circularly polarized wearable button antenna with broadside pattern for U-NII worldwide band applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Feb. 2019, 67(2): 1341-1345.
- [50] H. Xiaomu, S. Yan, G. A. E. Vandenbosch. Wearable button antenna for dual-band WLAN applications with combined on and off-Body radiation patterns[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Mar. 2017, 65(3): 1384-1387.
- [51] H. Yang, X. Liu. Wearable Dual-band and dual-polarized textile antenna for on- and off-body communications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Dec. 2020, 19(12): 2324-2328.
- [52] S. Bhattacharjee, S. Maity, S. R. B. Chaudhuri, M. Mitra. A compact dual-band dual-polarized omnidirectional antenna for on-body applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Aug. 2019, 67(8): 5044-5053.
- [53] H. H. Tran, N. Nguyen-Trong, H. C. Park. A compact wideband omnidirectional circularly polarized antenna using TM<sub>01</sub> mode with capacitive feeding[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Jan. 2019, 18(1): 19-23.
- [54] X. Liang et al. Wideband circularly polarized antenna with dual-mode operation[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Apr. 2019, 18(4): 767-770.
- [55] S. N. Mahmood, A. J. Ishak, A. Ismail, A. C. Soh, Z. Zakaria, S. Alani. On-off body Ultra-Wideband (UWB) antenna for wireless body area networks (WBAN): A Review. *IEEE Access*, 2020, 8: 150844-150863.
- [56] W. Farooq, M. Ur-Rehman, Q. H. Abbasi, K. Qaraqe. A circular patch frequency reconfigurable antenna for wearable applications[C]. *IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2015: 103-106.
- [57] A. Javed, B. Bhellar, F. A. Tahir. Reconfigurable body worn antenna for Bluetooth and WiMAX[C]. *International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*, Islamabad, Pakistan, 2015: 571-573.
- [58] E. Cil, S. Dumanli. The design of a pattern reconfigurable antenna suitable for smart glasses[C]. *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC Workshops)*, Istanbul, Turkey, 2019: 1-4.
- [59] H. Lee, J. Choi. A polarization reconfigurable textile patch antenna for wearable IoT applications[C]. *International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Phuket, Thailand, 2017: 1-2.
- [60] M. S. Shakhirul, M. Jusoh, A. H. Ismail, M. R. Kamarudin, H. A. Rahim, T. Sabapathy. Reconfigurable frequency with circular polarization for on-body wearable textile antenna[C]. *European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Davos, Switzerland, 2016: 1-4.
- [61] A. da Conceição Andrade, I. P. Fonseca, S. F. Jilani, A. Alomainy. Reconfigurable textile-based ultra-wideband antenna for wearable applications[C]. *European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Davos, Switzerland, 2016: 1-4.
- [62] H. Sun, Y. Hu, R. Ren, L. Zhao, F. Li. Design of pattern-reconfigurable wearable antennas for body-centric communications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Aug. 2020, 19(8): 1385-1389.
- [63] S. I. Mondal, R. P. Ghosh. Multiband wearable

- antennas[C]. International Conference on Microelectronics, Computing and Communications (MicroCom), Durgapur, India, 2016: 1-5.
- [64] S. Ramdani, I. Pratama, Basari. Single coaxial feed microstrip GPS antenna aimed at wearable device application[C]. IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), Kuta, Bali, Indonesia, 2019: 247-250.
- [65] R. B. V. B. Simorangkir, A. Kiourti, K. P. Esselle. UWB wearable antenna with a full ground plane based on PDMS-embedded conductive fabric[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Mar. 2018, 17(3): 493-496.
- [66] A. Alemaryeen, S. Noghianian. On-body low-profile textile antenna with artificial magnetic conductor[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Jun. 2019, 67(6): 3649-3656.
- [67] G. A. Casula, R. Colella, Z. N. Chen, L. Catarinucci, G. Mazzarella. Conformal circularly-polarized shoe-integrated antenna based on leather substrate and conductive fabric for Bluetooth low energy body-centric links[C]. International Workshop on Antenna Technology (iWAT), Bucharest, Romania, 2020: 1-3.
- [68] 张明振, 金杰, 常宇慧, 王舒. 基于 PDMS 材料的柔性双频天线的研究[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2018, 51(06): 13-17.
- [69] B. Hu, G. Gao, L. He, X. Cong, J. Zhao. Bending and on-arm effects on a wearable antenna for 2.45 GHz Body Area Network[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 378-381.
- [70] P. J. B. Clarricoats, Z. Hai, R. C. Brown, G. T. Poulton, G. E. Crone. A reconfigurable mesh reflector antenna[C]. International Conference on Antennas and Propagation, ICAP 89 (Conf. Publ. No.301), Coventry, UK, 1989, 1: 112-116.
- [71] S. Xiao, C. Liu, Y. Li, X. M. Yang, X. Liu. Small-size dual-antenna implantable system for biotelemetry devices[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 1723-1726.
- [72] X. Yang, H. Wong, J. Xiang. Polarization reconfigurable Planar Inverted-F antenna for implantable telemetry applications[J]. IEEE Access, 2019, 7: 141900-141909.
- [73] V. T. Nguyen, C. W. Jung. Radiation-pattern reconfigurable antenna for medical implants in MedRadio band[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 106-109.
- [74] 李明玖, 熊祥正, 廖成, 冯菊. 一种新型三频段植入式天线的设计[J]. 电子元件与材料, 2017, 36(03): 68-71.
- [75] A. M. Ali, M. El Atrash, S. R. Zahran, M. A. Abdalla. A low profile flexible circularly polarized antenna for wearable and WLAN applications[C]. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, Atlanta, GA, USA, 2019: 1603-1604.