

引用格式:张纯,杨曙辉,陈迎潮.可穿戴宽带圆极化天线研究综述[J].中国传媒大学学报(自然科学版),2022,29(05):78-86.
文章编号:1673-4793(2022)05-0078-09

可穿戴宽带圆极化天线研究综述

张纯¹,杨曙辉^{1*},陈迎潮²

1. 中国传媒大学 信息与通信工程学院,北京 100024;
2. 南卡罗来纳大学 电气工程系,哥伦比亚 SC29208)

摘要:互联网的飞速发展让无线体域网的概念进入人们的视野,可穿戴设备由其自身的便捷性而受到青睐。可穿戴天线作为可穿戴设备中收发信号的重要器件,对于它的研究也成为热门方向。其中考虑人体自身的各类特点,可穿戴天线的研究重点通常为小型化、圆极化、宽带化以及低比吸收率(Specific Absorption Rate, SAR)。本文分日常穿戴设备为原型的可穿戴天线、小型化圆极化天线以及可穿戴圆极化天线三部分进行叙述。对近几年国内外可穿戴天线的研究情况进行介绍,并对可穿戴天线的发展趋势进行了分析。

关键词:可穿戴天线;宽带圆极化天线;无线体域网;SAR;小型化

中图分类号:TN92;TN827 **文献标识码:**A

Review of wearable broadband circularly polarized antenna

ZHANG Chun¹, YANG Shuhui^{1*}, CHEN Yingchao²

- (1. School of Information and Communication Engineering, Communication University of China, Beijing 100024, China; 2. The Department of Electrical Engineering, University of South Carolina, Columbia SC29208, USA)

Abstract: The rapid development of the Internet has brought the concept of Wireless Body Area Network (WBAN) into people's vision, and wearable devices are favored by their own convenience. Wearable antenna is an important device for transmitting and receiving signals in wearable devices, and its research has also become a hot direction. Considering the various characteristics of human body, the research of wearable antenna is usually focus on circularly polarization, miniaturization, broadband and low specific absorption rate(SAR). This paper describes the wearable antenna prototyped by daily wearable devices, miniaturized circularly polarization antenna and wearable circularly polarization antenna. The research situation of wearable antenna at home and abroad in recent years is introduced, and the future trend of wearable antenna is analyzed.

Key words: wearable antenna; broadband circularly polarization antenna; Wireless Body Area Network (WBAN); SAR; miniaturization

基金项目:国家自然科学基金(NO.61171039)

作者简介(*为通讯作者):张纯(2000-),女(汉族),湖北黄冈人,硕士研究生。Email: icode@163.com;杨曙辉(1971-),男,博士,教授,主要从事天线设计、电磁超材料及电磁兼容分析等研究。Email: yangshuhui@cuc.edu.cn;陈迎潮(1967-),男,博士,教授,主要从事计算电磁学、信号完整性及电磁超材料等研究。Email: chenying@cec.sc.edu

1 引言

互联网的飞速发展让体域网的概念进入人们的视野,可穿戴天线随着可穿戴设备在市场的推广和热销成为了天线研究的一个热点。可穿戴天线可以应用于医疗监测、物联网和军事等方面。无线体域网发展于无线个域网,是一种以人为核心的无线通信,由置于人体周

围、体表以及体内的传感器节点和一个中心节点构成。这些传感器设备可以通过对人体的体温、心率等重要生理参数或者一些周围的温度等环境参数进行感知和采集,同时无线传输给中心节点。中心节点在接收到这些信息后通过WiFi或者移动蜂窝网络将其发送到远程服务器(如医院、数据中心等)供专业人员进行后续处理^{[1][2]}。无线体域网系统概念图如图1所示。

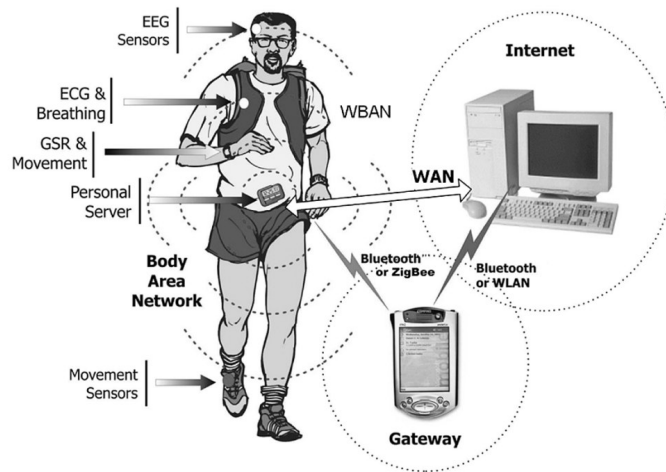


图1 无线体域网系统概念图^[3]

无线体域网可以通过几个分支传感器节点进行工作,最后通过中心节点统一将信息传输给终端系统。分支节点可以直接相互通信,若整个体域网只采用一个设备工作,此设备可作中心节点实时向移动设备反馈信息和向终端系统进行通信。

无线体域网的提出让可穿戴设备吸引了更多目光。可穿戴设备中的天线作为无线通信中的桥梁,也受到了学者们极大的关注。其中应用于体表的可穿戴天线是本文的研究重点。人体复杂的电磁特性和特殊的应用环境要求可穿戴天线要满足小尺寸、低剖面、强的弯曲鲁棒性能和对人体辐射的健康标准(即低比吸收率)等要求^[4]。而为了研究出满足以上要求且高性能的天线,可穿戴天线的研究集中于柔性、小型化、宽带圆极化等。

柔性天线:由于应用于体表的可穿戴天线通常要求能够减少给穿戴者带来的不适感。而柔性天线大多具备低剖面和轻量级的特点,能够解决穿戴不适这个问题。目前研究者提出的柔性天线通常是利用衬底材料实现,一般采用的衬底材料有两大类:一类利用导电织物材料,另一类为印刷天线中的柔性基板^[5]。

小型化:为了增强天线的易穿戴性,可穿戴天线通常要求小型化。不仅仅是因为用于体表的天线可用的空间有限,尤其是部分用于体内的天线,设计的第一要求就是小型化。

宽带圆极化:相较于线极化,圆极化天线有抗干扰能力强、良好的多径反射能力和极化易匹配等优点。宽带圆极化能够保证天线在圆极化中有更宽的工作带宽,应用范围更广^[6]。

人体的存在及其运动增加了极化损失因子,降低了通信的质量和数据传输的准确性。此外可穿戴天线放置在人体不同位置时,其性能也会有所差异。同时天线对人体的辐射也是需要关注的,需要确保SAR值低于国际标准。

本文将对可穿戴天线的基本参数和几类相关的天线类型进行介绍。

2 可穿戴宽带圆极化天线的性能

可穿戴天线的设计要实现优异的性能,需要尽可能实现宽带圆极化、低SAR值等要求。了解参数的具体含义,才能更好在设计天线中进行实践。

2.1 天线的电参数

(1) 天线的工作带宽

一般是指满足天线工作指标的可用频段,可以用 BW 来表示。工程上一般规定为 $|S_{11}| < -10\text{dB}$ 的范围即为其输入阻抗带宽。一般可以表示为绝对带宽 BW_{ab} 和相对带宽 BW_{re} 。

$$BW_{ab} = f_H - f_L \quad (1)$$

$$BW_{re} = \frac{2(f_H - f_L)}{f_H + f_L} \times 100\% \quad (2)$$

其中 f_h 和 f_l 分别为对应的高频和低频。

(2) 极化

极化指的是天线在最大辐射方向上电场矢量随时间的变化方向的特性。常见的极化方式可以分为线极化、圆极化和椭圆极化。线极化:电场强度随时间变化的方向为直线。圆极化:电场矢量在自由空间中随时间变化轨迹为圆形,即电场分量的振幅相同,相位相差 90° 。根据运动方向的不同,可以分为左旋圆极化和右旋圆极化。圆极化相对线极化具备抗干扰性更强、可以减少交叉极化等优点。

(3) 比吸收率(SAR)

比吸收率是指进入人体被吸收的电磁波功率与吸收部分组织质量的比重,也可以说是单位时间内被单位质量的人体组织所吸收的电磁波能量,单位通常为 W/kg 或者 mW/g [7]。

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} |E|^2 \quad (3)$$

其中, σ 为人体特定组织对应的电导率,单位为 S/m , 而 ρ 为人体对应组织的密度,单位为 kg/m^3 , E 为电场强度,单位为 V/m 。

国际上广泛使用和认可的标准主要有两种,分别是国际非电离委员会要求的: 10g 组织的 SAR 值要小于 2W/kg [8]; 美国联邦通信委员会要求的: 1g 组织的 SAR 值不得大于 1.6W/kg [9]。

3 四类可穿戴宽带圆极化天线

3.1 可穿戴天线

常见的可穿戴天线基本可以区分为嵌入式天线和柔性天线。嵌入式天线一般体积较小,易于集成在可穿戴设备中但不一定具备柔性。而柔性天线一般采用织物作为衬底或者利用导电的纺织材料制作天线且直接集成在衣物中,此类天线容易与衣服贴合,

保证了天线的易穿戴性。纺织材料的缺点是,由于与身体运动和变化相关的结构变形,它们的电导率低,天线特性容易恶化。同时由于织物材料介电常数的不稳定性造成了此类天线研究的复杂性 [10]。

嵌入式天线中除了体积较小直接集成于设备中,也有依据日常生活中常穿戴的物品作为原型设计天线,此类天线直接降低了天线占用的空间。类似日常必需的皮带 [11]-[13]、眼镜 [14]、手提包拉链 [15]、鞋带 [16]、手表 [17] 和口罩 [18][19] 等都成为了研究人员制作可穿戴天线的原型。

以皮带天线为例,如图2所示,西安交通利物浦大学研究团队提出了一种将EBG(电磁带隙结构)耦合于接地层用于抑制天线向人体辐射的皮带天线。通过设计出最优的EBG结构,用于天线上降低 SAR 值,此带式天线在 0.5W 输入功率下实现了最大增益为 7.94dBi 和最小比吸收率 0.04W/kg [11]。

中国传媒大学研究团队通过在皮带上等距分布三个相同的天线单元,研究出一种三频段双极化的皮带天线,如图3所示。同时通过在皮带背面安装吸波材料来降低天线的 SAR 值,与上述的天线 [11][12] 不同,它利用天线的皮革作为衬底,在皮革上设计天线结构,保证天线的柔性增加了天线易穿戴性,辐射效率达到了 $46.1\text{-}80.1\%$,同时可以工作于 $2.37\text{-}2.7\text{GHz}$, $2.8\text{-}3.22\text{GHz}$ 和 $5.41\text{-}6.03\text{GHz}$ 三个频段 [13]。

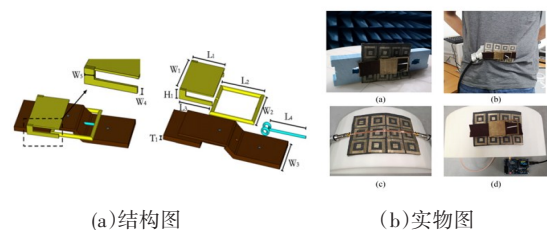


图2 基于EBG结构的可穿戴天线结构与实物图

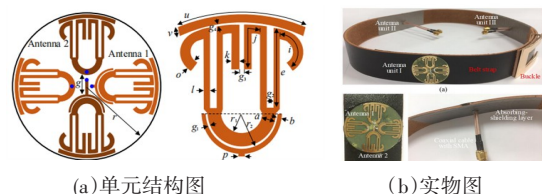


图3 柔性三频双极化MIMO天线的单元图及实物图

相较于嵌入式天线,以柔性织物作为衬底或者以导电织物作为天线制造材料的天线 [20]-[22] 在可穿戴天线的研究领域中也一个热点方向。例如以口罩作为研究物 [18]-[20],设计口罩天线,如图4所示。通过把医用外科口罩作为介质基板,利用导电纱将设计完成的射频标签纺织在口罩上制成天线,可达到的增益为 1.09dBi [18]。

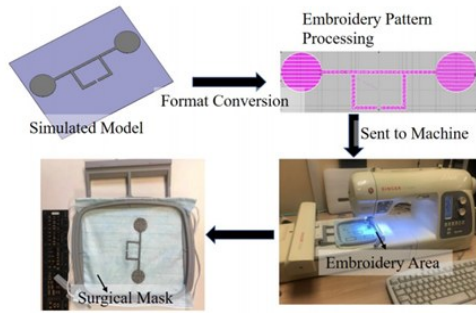


图4 织物口罩天线结构与实物图

如图5所示,利用Rogers 5880作为介质基板,制造一种轻量级的传感器嵌入口罩内部,整体天线由在中心频率为1.5GHz的弯折线天线、3GHz的倒F天线以及小型倍频器组成^[20]。同样都是应用于口罩的可穿戴天线,一种是以导电织物作为制作材料的柔性天线,另一种是以弯折性的印制板为材料设计的嵌入式天线。不同的设计思路,都实现了比较优越的性能。

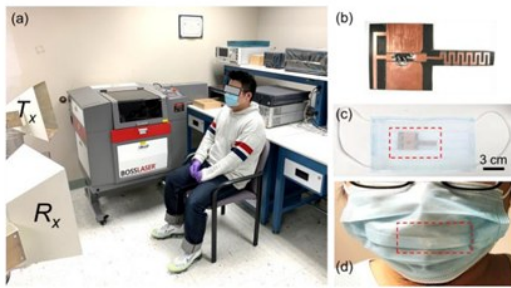


图5 嵌入式传感器口罩天线实物图

通过直接设计天线结构,将天线直接耦合至军用贝雷帽^[21]、手套^[22]等穿戴设备中,如图6所示。由于穿戴衣物等自身的柔性,再利用导电织物作为材料来制作天线,可以设计出完美的柔性天线^{[23]-[26]}。无论柔性天线还是嵌入式天线,满足人体工学设计,可以保证穿戴时使用者的舒适度。尤其是以日常穿戴必需的物件作为设计模型,直接减少了可穿戴天线的放置空间。



(a) 贝雷帽天线实物图 (b) 手套天线实物图

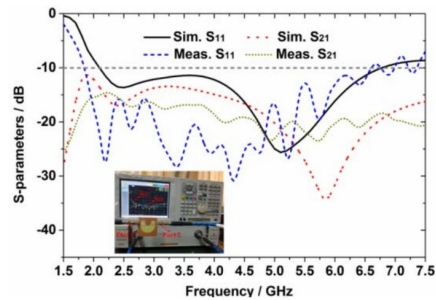
图6 嵌入式贝雷帽天线与手套天线实物图

3.2 宽带圆极化天线

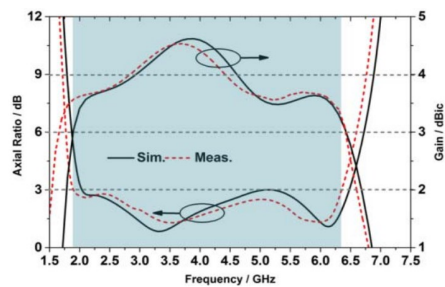
上述的可穿戴天线仅仅从易穿戴性出发,大多都是线极化天线。传统线极化天线存在抗干扰能力差、带宽窄、尺寸大等问题,因此宽带圆极化天线在可穿戴的研究应用中更受研究人员的青睐。

圆极化天线通常通过改变天线结构、增加寄生贴片和调整馈电结构等方式实现圆极化^[27]。小型单馈电圆极化微带天线由于馈送结构简单,通常带宽较窄。因此,提出了多馈电圆极化天线来有效地提高工作带宽,通过两个微带馈电端口来实现宽带圆极化。

如图7所示,该天线由一个U型槽实现宽带CP辐射和两个微带馈电端口组成在同一频段内同时实现左旋和右旋圆极化^[28]。最后达到的阻抗带宽覆盖1.80-6.61GHz,且轴比带宽达到了110.5%(1.83-6.35 GHz),实现了宽带圆极化。但是在可穿戴设备设计中,考虑到可穿戴天线的应用场景,单馈电的方式更适合可穿戴天线这类使用空间有限的天线。



(a) S参数仿真及实测图



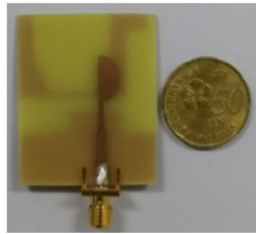
(b)轴比/增益仿真及实测图

图7 U型槽宽带圆极化天线仿真与实测结果图

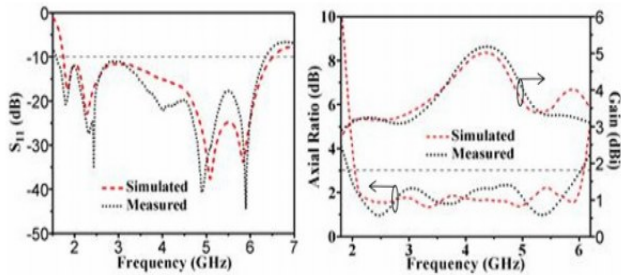
H.Alsariera等设计了一个p形的单极子贴片和带有矩形地面组成的单端口馈电的宽带圆极化单极子天线,如图8所示。通过对地和贴片的结构进行调整以及参数优化来实现宽带圆极化的目的。天线的尺寸相对来说较小,且该天线-10dB的阻抗带宽和3dB轴比带宽分别能够实现118.5%和104.4%^[29]。

不仅是通过调整馈电端口数目,实现宽带圆极化主

要方法还是通过对贴片和接地面的形状进行调整,添加寄生贴片等。其他的有通过调整缝隙的结构以及对贴片和地进行调整来实现圆极化,也有通过调整天线结构使之形成正交模的方式来实现圆极化^{[30]-[40]}。



(a)实物图



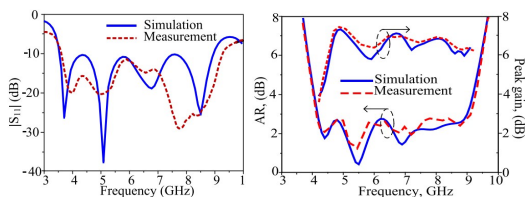
(b) S11 仿真及实测图 (c)轴比/增益仿真及实测图

图8 P形宽带圆极化天线结构图及测量仿真结果图

T. T. Le设计一种缝隙宽带圆极化天线,缝隙与打印在基板另一侧的50Ω微带馈线接近耦合,如图9所示。通过调整两个半圆形缝隙,可以实现两个相邻的圆极化模式并进行组合实现了一个宽带的右旋圆极化。在-10dB以下的带宽为3.63-9.21GHz,同时达到了74.3%的轴比带宽4.18-9.12 GHz。与上述的双端口宽带圆极化^[28]和单极子宽带圆极化天线^[29]相比,这是一种新的宽带圆极化天线的设计思路^[35]。



(a)实物图



(b) S11 仿真及实测图 (c)轴比/增益仿真及实测图

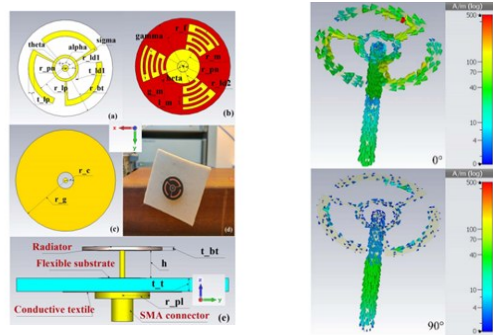
图9 缝隙宽带圆极化天线实物图及测量仿真结果图

为了调整天线获得更宽的圆极化频带,在研究中可以采用特征模的分析方式对表面电流进行分析。以上的研究方法在实际设计宽带圆极化的过程中都可以进行参考使用。由于此处讨论的宽带圆极化应用于可穿戴设备的天线中,因此主要关注轻量级、体积小、紧凑的宽带圆极化天线。

3.3 可穿戴圆极化天线

如果只以实现宽带圆极化为目的,大部分天线尺寸较大,不适合用于可穿戴设备。为了保证天线的可穿戴性,天线需要尽可能做到低剖面。在可穿戴天线中,由于天线要求要尽可能减少对人体的影响,微带天线具备低后瓣、高指向性的优势而受到众多学者的青睐。由于小型化、宽带圆极化、高效率是可穿戴天线的设计重点,尝试设计微带圆极化天线,利用织物作为制作材料同时尽量保证天线低剖面,尽可能实现宽带圆极化^[41]。

X.Hu提出首个具有全向辐射的圆极化按钮天线,且利用了导电纺织物材料使得天线更易于与日常衣物集合,如图10所示。它由一个按钮、支撑轴、易弯折介质板以及织物层和接地层组成。实物制成后直径仅有1 cm左右,整体尺寸符合实际的按钮尺寸。由电偶极子和三个辐射臂产生90°相位差来实现圆极化。通过调节角度和优化半径等参数来实现圆极化的最优值。相较于其他同类天线,尺寸较小增益较高,能够实现全向辐射。其中阻抗带宽范围为5.68-5.91 GHz,圆极化轴比带宽范围为5.72-5.91 GHz,增益能达到2.1dBiC。在小尺寸的天线设计中,能保证增益符合要求^[42]。



(a)实物图 (b)电流分布图

图10 圆极化按钮天线实物图与电流分布图

M.Kanagasabai利用日常衣物中常见的牛仔织物作为基底来设计圆极化天线,整体天线尺寸为25 × 30 × 1.4mm³,如图11所示。在尺寸较小的同时也保证了增益范围在2.3-4.4 dBi。在设计中由于在不同频率下牛仔织物的介电常数和损耗系数有所波动,增加

天线的设计难度。设计中利用单馈法,通过改进八角条形单极子天线和不对称的L形地面来实现初步圆极化。再利用交叉的十字短棒和截断槽来拓宽轴比,实现了超宽带圆极化。天线实现了阻抗带宽范围为3.09 -11 GHz,轴比范围为3.4-10 GHz。小型化单馈织物天线通过合理的设计实现了超宽带圆极化,同时保证SAR值低于国际标准^[43]。

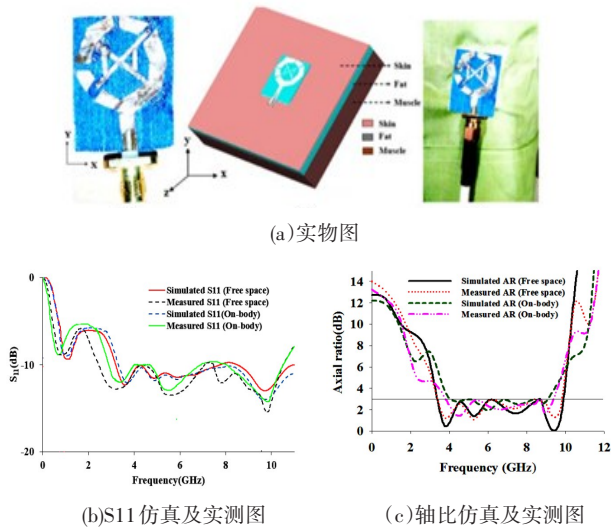


图11 超宽带圆极化织物天线实物图与仿真实测结果图

S. Kumar所设计的MIMO天线由两个镰刀状贴片和一个共同的地平面组成,如图12所示。每个天线元件由一个微带线馈电激发,一个倒L形条是在地面上支持实现圆极化。天线在织物上制作,整体尺寸较小,阻抗带宽和轴比分别能覆盖3.6-13 GHz和5.2-7.1 GHz。由于天线在织物上制作能保证天线的柔性同时双端口让圆极化更易实现宽频带宽。但在实际应用中,由于双端口相较于单端口更复杂,占用空间更大且成本更高。

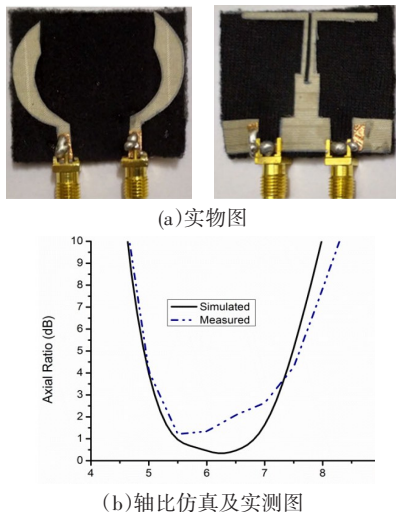


图12 可穿戴织物宽带圆极化天线实物图与轴比实测图

3.4 低SAR值天线

在可穿戴天线的设计中,除了实现可穿戴宽带圆极化天线的设计,如何降低天线对人体的辐射,在尽可能保证天线优异性能的前提下,实现国际标准以下甚至更低的SAR值成为了研究中必须考虑的问题。

目前已经发表的文献中,有通过设计金属反射层来降低SAR值,也有研究人员利用EBG结构^{[46]-[51]}、AMC结构^{[52]-[56]}和吸波结构^[12]等材料和结构实现了大幅降低SAR值。

Ubaid Ullah提出了一个几何上简单和紧凑的圆极化天线,具有单向辐射特性,用于离体通信。天线结构整体较简单,能够实现较好的圆极化,如图13所示。天线的阻抗带宽和轴比均覆盖了5.16-6.13 GHz。同时通过在距离介质板四分之一波长的下方加入了一个高损耗的介质板来减少后向辐射,直接降低了天线的SAR值^[45]。

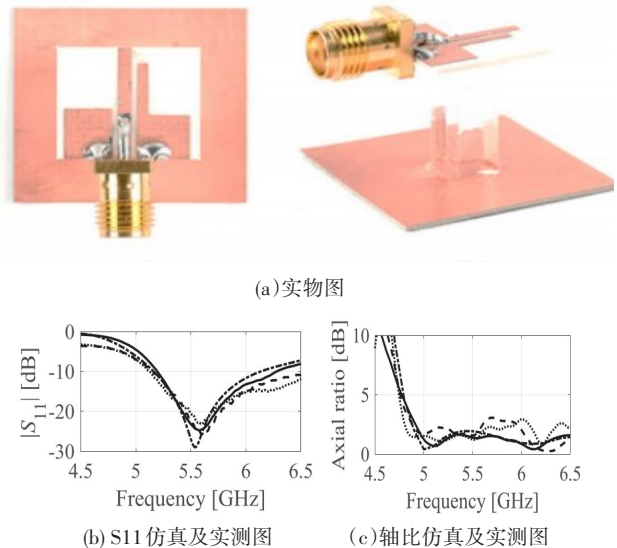
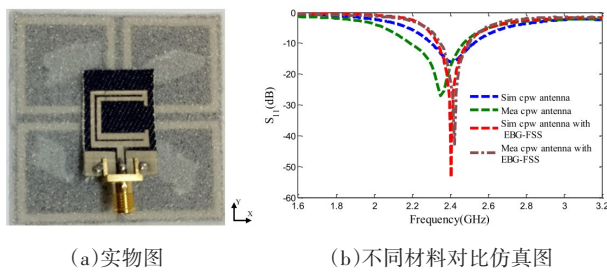


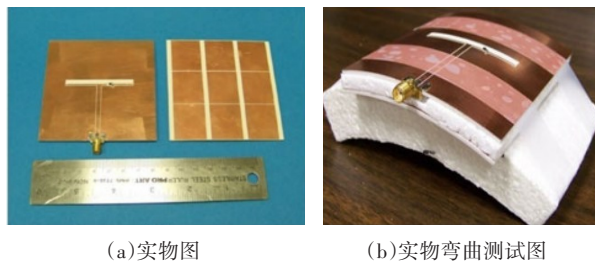
图13 可穿戴单向辐射圆极化天线实物图及仿真结果图

Adel团队提出了一种基于电磁带隙设计和频率选择表面的可穿戴织物CPW天线,如图14所示。通过对EBG的形状进行设计,同时优化测试来得到最佳的结构,模拟仿真出最佳结果。添加EBG-FSS结构后天线的SAR值降低了95%,增益提高到6.55dBi,前后比提高了13 dB。此可穿戴天线为线极化天线,根据测量结果在保证天线大幅降低SAR值的基础上,此结构还让天线实现了更好的阻抗匹配。相较于上述的天线,此天线由织物做成,具备更好的易穿戴性^[47]。

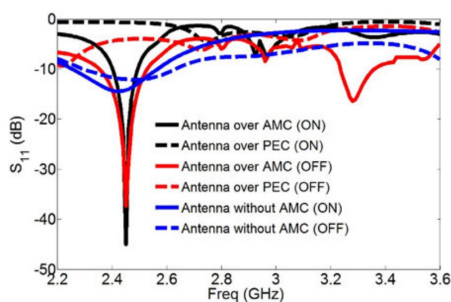


(a)实物图 (b)不同材料对比仿真图
图14 可穿戴织物EBG-FSS天线实物图及仿真结果图

Saud利用人工磁导体(Artificial Magnetic Conductor, AMC)设计了一种可穿戴柔性可重构天线,天线主要由一个缝隙和一个寄生贴片组成,通过二极管的开关来实现天线的可重构,如图15所示。由于缝隙和寄生贴片的工作频率和极化不同,通过将一个人工磁导体(AMC)表面与天线集成实现了降低比吸收率(SAR)。该天线在柔性基板上设计和制造,天线可弯折保证了天线在穿戴的使用背景下的实用性^[53]。



(a)实物图 (b)实物弯曲测试图



(c)不同材料仿真S11参数图

图15 可穿戴柔性可重构AMC天线实物图及仿真结果图

以上四种类型的相关天线实际上大多只是在某个方面或者某几个方面实现了比较优越的性能,但一个性能优异的天线通常要求整体都能达到最佳标准。制作一个优异的可穿戴天线还是需要尽可能同时满足可穿戴小型化、强鲁棒性、宽带圆极化、低SAR值等要求。

4 结论

近些年万物互联概念的提出,通信技术的发展也备受瞩目。人们追求电子设备的小型化、便携

化,可穿戴设备具有巨大的潜在市场。可穿戴天线作为可穿戴设备中必不可少的元件在研究中也更受关注。从线极化到圆极化,从窄带到超宽带,可穿戴天线逐渐发展。可穿戴宽带圆极化天线在确保天线的柔性和穿戴性下实现了更加优越的性能。未来可穿戴天线依然有很大的研究价值,而小型化、易穿戴、宽带圆极化、低SAR值始终是一个具备优秀性能可穿戴天线追求的目标。除了天线设计本身,在设计中我们应当关注在人体活动时造成的弯折等情况对天线性能的影响,应当保证天线在外界干扰中仍能保持性能不变。

参考文献(References):

- [1] 欧阳峰,张宇.无线体域网研究进展综述[J].电子科技,2016,29(12):173-179.
- [2] 童宣锋.可穿戴天线在无线体域网中的应用研究[D].苏州大学,2019.
- [3] R S H Istepanian, E. Jovanov and Y T Zhang. Guest Editorial Introduction to the Special Section on M-Health: Beyond Seamless Mobility and Global Wireless Health-Care Connectivity [J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2004, 8 (4):405-414.
- [4] 王超.应用于无线体域网的可穿戴天线设计[D].安徽大学,2021.
- [5] 王博宁.可穿戴小型化时域超宽带天线研究与设计[D].电子科技大学,2020.
- [6] 陈什和.小型化和圆极化超宽带天线的设计与研究[D].桂林电子科技大学,2021.
- [7] J Trajkovikj, A K Skrivervik. Diminishing sar for wearable uhf antennas [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14(2): 1530-1533.
- [8] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300ghz) [J]. Health Physics, 1998, 75(4): 494-522.
- [9] K Chan, R Cleveland, D Means. Evaluating compliance with fcc guidelines for human exposure to radiofrequency electromagnetic fields [J]. FCC OET Bull, 2001, 65: 1-42.
- [10] M M H. Mahfuz et al. Wearable Textile Patch Antenna: Challenges and Future Directions [J]. IEEE Access, 2022, 10:38406-38427.
- [11] R Pei. Wearable EBG-Backed Belt Antenna for Smart On-Body Applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(11):7177-7189.
- [12] R Pei. Wearable Belt Antenna for Body Communication Networks [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Networks [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation

- Letters, 2020.19(12):2043-2047.
- [13] S Yang, L Zhang, W Wang and Y Zheng. Flexible Tri-Band Dual-Polarized MIMO Belt Strap Antenna Toward Wearable Applications in Intelligent Internet of Medical Things [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022.70(1):197-208.
- [14] Y Wang, J Zhang, F Peng and S Wu. A Glasses Frame Antenna for the Applications in Internet of Things [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5):8911-8918.
- [15] G Li, Y Huang, G Gao, X Wei, Z Tian and L A Bian. A Handbag Zipper Antenna for the Applications of Body-Centric Wireless Communications and Internet of Things [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(10):5137-5146.
- [16] G Li, Z Tian, G Gao, L Zhang, M Fu and Y Chen. A Shoe-lace Antenna for the Application of Collision Avoidance for the Blind Person [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(9):4941-4946.
- [17] G Li, G Gao, J Bao, B Yi, C Song and L A Bian. A Watch Strap Antenna for the Applications of Wearable Systems [J]. IEEE Access, 2017, 5:10332-10338.
- [18] C Luo, I Gil and R Fernández-García. Textile UHF-RFID Antenna Embroidered on Surgical Masks for Future Textile Sensing Applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022.
- [19] G M Bianco and G Marrocco. Sensorized Facemask With Moisture-Sensitive RFID Antenna [J]. IEEE Sensors Letters, 2021, 5(3):1-4.
- [20] L Zhu, T D Ha, Y H Chen, H Huang and P Y Chen. A Passive Smart Face Mask for Wireless Cough Monitoring: A Harmonic Detection Scheme With Clutter Rejection [J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2022.
- [21] H Lee, J Tak and J Choi. Wearable Antenna Integrated into Military Berets for Indoor/Outdoor Positioning System [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1919-1922.
- [22] R K Singh, A Michel, P Nepa, A Salvatore, M Terraroli and P Perego. Compact and Wearable Yagi-Like Textile Antennas for Near-Field UHF-RFID Readers [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(3):1324-1333.
- [23] A Ashyap, et al. Inverted E-Shaped Wearable Textile Antenna for Medical Applications [J]. IEEE Access, 2018, 6: 35214-35222.
- [24] 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.
- [25] S H Li and J Li. Smart patch wearable antenna on Jeans textile for body wireless communication [C]. 2018 12th International Symposium on Antennas, ropagation and EM Theory (ISAPE), 2018, 1-4.
- [26] A Yadav, V Kumar Singh, A Kumar Bhoi, G Marques, B Garcia-Zapirain, and I de la Torre Diez. Wireless Body Area Networks: UWB Wearable Textile Antenna for Telemedicine and Mobile Health Systems [J]. Micromachines, 2020, 11(6).
- [27] 秦开元. 宽带高增益圆极化天线设计 [D]. 华侨大学, 2018.
- [28] R Xu, J Li, J Yang, K Wei and Y Qi. A Design of U-Shaped Slot Antenna With Broadband Dual Circularly Polarized Radiation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(6):3217-3220.
- [29] H Alsariera, Z Zakaria and A Awang Md Isa. A Broadband P-Shaped Circularly Polarized Monopole Antenna With a Single Parasitic Strip [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(10):2194-2198
- [30] M S Ellis, Z Zhao, J Wu, X Ding, Z Nie and Q H Liu. A Novel Simple and Compact Microstrip-Fed Circularly Polarized Wide Slot Antenna With Wide Axial Ratio Bandwidth for C-Band Applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(4): 1552-1555.
- [31] K Ding, C Gao, Y Wu, D Qu and B Zhang. A Broadband Circularly Polarized Printed Monopole Antenna With Parasitic Strips [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16:2509-2512.
- [32] M Nosrati and N Tavassolian. Miniaturized Circularly Polarized Square Slot Antenna With Enhanced Axial-Ratio Bandwidth Using an Antipodal Y-strip [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16:817-820.
- [33] B Xu, Y Zhao and L Gu. Broadband Circularly Polarized Filtering Monopole Antenna for C-Band Applications [C]. 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, 2020, 697-698.
- [34] M Midya, S Bhattacharjee and M Mitra. Broadband Circularly Polarized Planar Monopole Antenna With G-Shaped Parasitic Strip [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(4):581-585.
- [35] T T Le, H H Tran and H C Park. Simple-Structured Dual-Slot Broadband Circularly Polarized Antenna [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018. 17(3): 476-479.
- [36] M Samsuzzaman, M T Islam and M J Singh. A Compact Printed Monopole Antenna With Wideband Circular Polar-

- ization[J]. IEEE Access, 2018, 6:54713-54725.
- [37] H H Tran, N Nguyen-Trong and A M Abbosh. Simple Design Procedure of a Broadband Circularly Polarized Slot Monopole Antenna Assisted by Characteristic Mode Analysis[J]. IEEE Access, 2018, 6:78386-78393.
- [38] K Oteng Gyasi et al. A Compact Broadband Circularly Polarized Slot Antenna With Two Linked Rectangular Slots and an Inverted-F Feed Line[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 12:7374-7377.
- [39] H Tang, K Wang, R Wu, C Yu, J Zhang and X Wang. A Novel Broadband Circularly Polarized Monopole Antenna Based on C-Shaped Radiator[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 964-967.
- [40] Z Chen, et al. Compact Wideband Circularly Polarized Loop Antenna Based on Dual Common and Differential Modes [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022.
- [41] 花鹏成. 宽带圆极化天线研究[D]. 西安电子科技大学, 2017.
- [42] X Hu, S Yan, J Zhang, V Volski and G A E Vandenbosch. Omni-Directional Circularly Polarized Button Antenna for 5 GHz WBAN Applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(8): 5054-5059.
- [43] M Kanagasabai, P Sambandam, M G N Alsath, S Palaniswamy, A Ravichandran and C Girinathan. Miniaturized Circularly Polarized UWB Antenna for Body Centric Communication [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(1):189-196.
- [44] S Kumar, et al. Wideband Circularly Polarized Textile MIMO Antenna for Wearable Applications [J]. IEEE Access, 2021, 9:108601-108613.
- [45] U Ullah, I B Mabrouk and S Koziel, A Compact Circularly Polarized Antenna With Directional Pattern for Wearable Off-Body Communications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(12): 2523-2527.
- [46] S Velan, et al. Dual-Band EBG Integrated Monopole Antenna Deploying Fractal Geometry for Wearable Applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 249-252.
- [47] 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.
- [48] U Ali, et al. Design and SAR Analysis of Wearable Antenna on Various Parts of Human Body, Using Conventional and Artificial Ground Planes[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2017, 12(1): 317-328.
- [49] A Y I Ashyap, Z Z Abidin, S H Dahlan, H A Majid, and F C Seman. A Compact Wearable Antenna Using EBG for Smart-Watch Applications [C]. 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), 2018, 1477-1479.
- [50] A Y I Ashap, et al. Flexible Wearable Antenna on Electromagnetic Band Gap using PDMS substrate[J]. TELKOMNIKA, 2017, 15(3):1454.
- [51] A Y I Ashyap, Z Z Abidin, S H Dahlan, H A Majid, M R Kamarudin, and R A Abd-Alhameed. Robust low-profile electromagnetic band-gap-based on textile wearable antennas for medical application [J]. 2017 International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Innovative Structures, and Applications (iWAT), 2017, 158-161.
- [52] P Saha, D Mitra, and S K Parui. Control of Gain and SAR for Wearable Antenna Using AMC Structure[J]. Radio engineering, 2021, 30(1): 81-88.
- [53] S M Saeed, C A Balanis, C R Birtcher, A C Durgun, and H N Shaman. Wearable Flexible Reconfigurable Antenna Integrated With Artificial Magnetic Conductor[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16:2396-2399.
- [54] K Agarwal, Y X Guo, B Salam, and L C W Albert. Latex based near-endfire wearable antenna backed by AMC surface[J]. 2013 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-BIO), 2013, 1-3.
- [55] S il Kwak, D U Sim, J H Kwon, and Y J Yoon. Design of PIFA With Metamaterials for Body-SAR Reduction in Wearable Applications [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59(1): 297-300.
- [56] M El Atrash, M A Abdalla, and 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, 2019, 67(10): 6378-6388.