

引用格式:王宜颖,徐远铮,周成贵,曾昭峰,逯贵祯.用于体域网无线能量传输的定向纽扣天线研究[J].中国传媒大学学报(自然科学版), 2022,29(06):75-80.
文章编号:1673-4793(2022)06-0075-06

用于体域网无线能量传输的定向纽扣天线研究

王宜颖¹,徐远铮¹,周成贵¹,曾昭峰¹,逯贵祯^{2*}

(1.桂林电子科技大学,桂林 541004;2.中国传媒大学,北京 100024)

摘要:可穿戴技术的进步正推动着体域网组网技术的发展,需要研究向体域网设备提供无线能量传输的定向辐射天线技术。它是以5.8 GHz的纽扣天线为辐射体,并在适当位置添加了人工磁导体(AMC)结构形成定向辐射。其中,人工磁材料的横向尺寸与纽扣天线顶部结构的圆形直径一致以不额外增加整体尺寸,其余包括馈电部分均采用全织物材料。其次,采用真实手臂模型,将两款相同的天线分别置于手臂弯曲处和上臂处进行仿真和测试,结果显示仿真和测试的一致性良好。最后,对人体吸收率SAR值进行研究,其值低于通用标准。

关键词:体域网;无线能量传输;人工磁材料;纽扣天线;SAR值

中图分类号:TN828 文献标识码:A

Research on directional button antenna for wireless power transfer on body area network

WANG Yiyi¹, XU Yuanzheng¹, ZHOU Chenggui¹, ZENG Zhaofeng¹, LU Guizhen^{2*}

(1. Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 2. Communication University of China, Beijing 100024, China)

Abstract: The current progress of wearable technology is promoting the development of networking technology for body area network. Therefore, the directional radiation antenna is studied in order to provide wireless energy for the wearable equipment of body area network. This antenna works at 5.8 GHz and takes the button antenna as radiator, then the artificial magnetic conductor (AMC) structures are placed at an appropriate position to form directional radiation. Here, the transverse dimension of the artificial magnetic material is consistent with the diameter of the top loaded circular structure on the button antenna so no extra dimension is added, while the rests are made of all fabric material, including the feeding part. Next, the real arm model is adopted, and the simulation and the measurement are implemented for the two same antennas placed at the bend of the arm and the upper arm, respectively, where they agree well. The SAR value of human body is investigated at last, and they are lower than the general criterion.

Keywords: body area network; wireless power transfer; artificial magnetic materials; button antenna; SAR value

1 引言

用于监测生理信号或无线通信的手环、手表等可穿戴设备已经步入到我们的日常生活。可以预测,随

着技术的发展,以柔性材料为衬底的相关通信技术也将陆续出现。未来6G通信的需求更为相应的体域网组网技术的发展带来了新的契机。

作者简介(*为通讯作者):王宜颖(1982-),男,博士,讲师,主要从事电磁理论和微波技术研究。Email: yiyi@guet.edu.cn;逯贵祯(1957-),男,博士,教授,主要从事电磁理论和微波技术研究。Email: luguizhen@cuc.edu.cn

目前以柔性材料为主的体域网研究主要集中在三个方面,即人体通道特征研究^[1-3]、用于体表体外通信可穿戴天线技术研究^[4-10]和植入式无线能量传输研究或能量收割技术研究^[11-13]。关于人体通道特征,学者们分别研究了不同位置的路径损耗^[1]、体表上点对点通信^[2]和统计路径损耗模型^[3]。相应的可穿戴天线类型有缝隙天线^[4]、分形天线^[5]、方向图可重构天线^[6]、准八木天线^[7]和纽扣天线^[8-10]等。其中,为了减少天线对人体的辐射,在设计可穿戴缝隙天线时添加了电磁带隙技术^[4]。而纽扣天线作为一种新颖的天线结构于2009年被提出,由于其全向辐射的特性多用于研究体表传输特性,同时研究结果表明该结构不易受到人体活动的影响^[8-10]。文献[8]研究了双极化双频段的纽扣天线以适应无线局域网的应用,而在文献[9]中研究者采用圆形条带、Y型和L型缝隙实现了天线的三频带和小型化特征;文献[10]实现了全向辐射的圆极化天线设计。此外,植入式无线能量传输收割技术的研究主要集中在通过设计植入式天线对患者进行术后监测等功能^[11],以及为了解决以后可穿戴设备的充电问题,能量收割技术也逐渐被重视^[12-13]。

可以看出,在未来体域网中不仅需要通信技术,更需要能量传输技术。但是,目前所提出的体内无线能量传输主要用于体内传输,目的是解决医疗健康方面的疾病,而对于体表无线能量传输却没有相关的研究。于是依据现有技术的发展特点,体表无线能量传输的理念^[14]被提出,目的是通过人体活动产生的动能给体表或体内的可穿戴设备进行充电,这样不仅可以实现能量供给,还可以实现与外界的通信。为了更加有效地实现能量供给,本文研究基于人工磁材料(AMC)实现沿体表定向辐射的纽扣天线。该天线主要由顶部加载介质材料的单极子天线、平行于天线的AMC周期结构和微带馈电三部分组成。将两个相同的定向天线分别放置于手臂弯曲处(无线能量传输天线)和大臂处(通信天线),研究体表无线能量传输的特征。

2 定向纽扣天线

2.1 AMC结构

实现定向辐射的技术是加载反射板,这样不仅可以提高天线的增益还可以减小后向辐射。常规的反射板由金属面(PEC)构成,此时要求天线距离PEC的长度为 $1/4\lambda$,这里 λ 为电磁波的波长。若将这一距离

应用到可穿戴纽扣天线的设计中,就会造成天线整体尺寸过大,不利于天线的小型化和集成化。因此,需要一种新的结构作为反射板,既可以满足全反射需求,又可以实现天线的集成化。

人工磁导体(AMC)是一种电磁超表面结构,由边界条件可知,其具有很高的表面阻抗。依据电磁波的传播特性可得,以AMC作为反射板时,天线与其之间的距离远小于一个波长。相较于PEC而言,AMC可以减少单极子天线与其之间的间距,并通过适当调整单极子天线顶部加载介质的尺寸,实现单极子天线和AMC加载的一体化。

依据文献[15-16]中提及的理论和方法,针对ISM频段中的5.8 GHz频段,本文设计出的方形AMC结构如图1所示。其中,图1(a)为最终的 3×3 周期单元结构,而图1(b)为相应的单元结构。

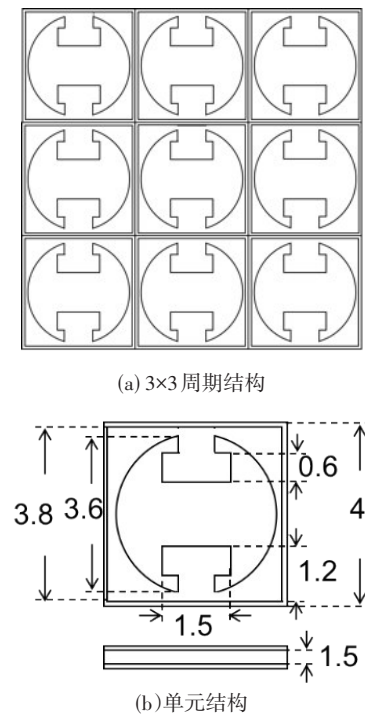


图1 AMC结构

每个AMC单元由三层结构组成,分别为上层的谐振金属结构层、中介质层和位于最下方的完整金属地面层。其中,位于中间层的介质基板是常规尺寸的微波材料F4B,其相对介电常数为6.15,损耗角正切值为0.0045,厚度为1.5毫米。该厚度影响着AMC结构的谐振频率,或者说可以根据具体的厚度来设计出相应的AMC单元。另外,上层的金属结构采用上下和左右互相对称的设计,通过调整上下内插T型结构

的尺寸可以调整单元的谐振特性和单元的反射相位。最终的 AMC 单元尺寸见图 1 (b) 所示,这里的单位是毫米。其中,介质基板四周比上层 AMC 结构均长 0.1 毫米。采用 CST 软件对该尺寸所对应的参数进行仿真,对应的结果如图 2 所示,其中图 2(a)和图 2(b)分别表示 AMC 结构的反射系数和相位分布。从中可以看出,在谐振频点处可以实现全反射,因其实部接近 1、虚部接近 0;而且其 -90° 至 90° 的反射相位保证了 AMC 的全反射特性。

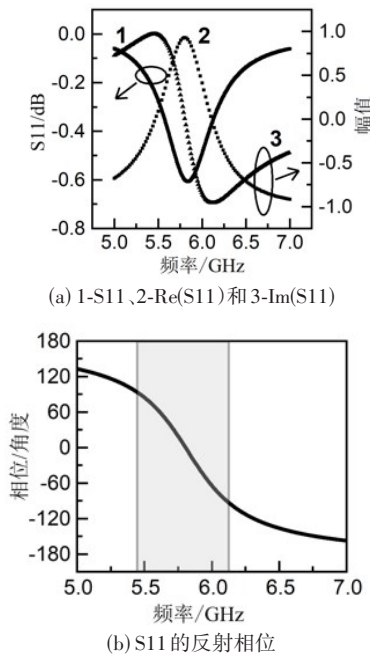


图2 AMC单元结构相关参数

2.2 定向纽扣天线结构

纽扣天线的辐射体是单极子天线,设计时采用微带线进行馈电。未加载 AMC 结构的示意图如图 3(a) 所示,从上到下分别为圆形顶部加载介质层、圆柱介质层、单极子天线、底部圆形加载层、微带馈电线、微带线介质层和微带线地面层组成。其中,单极子天线圆形顶部和底部加载介质基板为微波复合材料 TP,其材料电参数分别为 $\varepsilon=10.2$, $\tan\delta=0.0013$;单极子顶部加载的圆柱介质为 FR4 环氧棒;微带馈电线采取全织物设计,其中微带线和地面均采用导电织物(电阻率小于 0.05,材料为金属镍和铜的复合物),而衬底层为 100% 全棉织物,其厚度为 1.5 毫米、相对介电常数和损耗角正切值分别为 1.6 和 0.02。

定向纽扣天线结构如图 3(b)、(c)和(d)所示。其中,图 3(b)为在 5.8 GHz 加载 AMC 结构时沿 xz 平面

的侧视图,图 3(c)为加载 AMC 结构时沿 xy 平面的俯视图,图 3(d)为加载 AMC 结构时沿 yz 平面的正视图。从中可以看出,AMC 结构被加载到了靠近微带线馈电的一侧,这样可以减少单极子天线辐射对微带线馈电的影响。另外,由于 AMC 结构的横向尺寸与圆形顶部加载介质的直径相同和 AMC 结构与单极子天线间距较小,可以使 AMC 结构和顶部加载的单极子天线能较好地融合为一体。最终优化后的天线参数值如表 1 所示,相应的天线原型实物图见图 4。

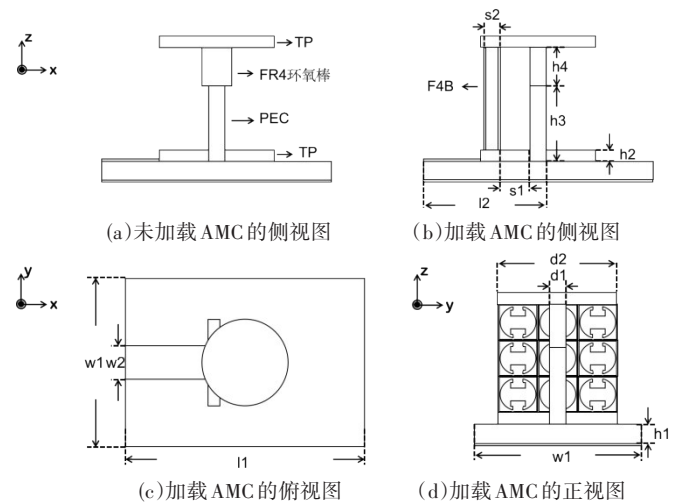


图3 定向纽扣天线结构



图4 定向纽扣天线实物

表1 天线尺寸(单位:毫米)

| l1 | l2 | w1 | w2 | h1 | h2 |
|-----|------|----|----|-----|-----|
| 28 | 15.5 | 20 | 5 | 1.5 | 1 |
| h3 | h4 | d1 | d2 | s1 | s2 |
| 8.8 | 4.2 | 3 | 12 | 2.3 | 1.2 |

3 结果分析

3.1 仿真软件选择

CST 软件在仿真周期超材料结构时采用具有频域有限元算法的频域求解器进行仿真,具有建模简

单、仿真速度快和计算准确的优势。而XFDTD软件在计算人体吸收率时,采用时域有限差分算法,在分析生物电磁效应方面的数据更具有准确性,故此仿真时采用CST得到超材料结构和天线结构,并将该结果导入XFDTD中进行对比。

基于超材料结构的天线性能对比分析展示在图5,这包括了反射系数和E面主极化的极坐标图对比。从中可以看出两个软件的仿真结果由于算法的不同而产生了一定的偏差,但是仍然具有很好的一致性,所以下面讨论的仿真结果均基于XFDTD软件。

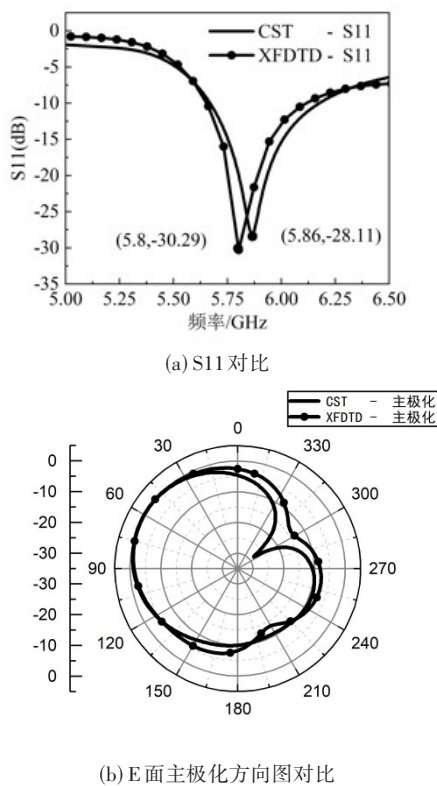


图5 CST & XFDTD仿真对比

3.2 手臂对天线性能影响分析

由于本文研究的重点是放置于手臂上的无线能量传输天线技术,故针对特定个体进行建模。所研究的对象是身高165厘米、体重52公斤、年龄为26岁的中国女性,通过3D扫描成像设备对其手臂进行扫描,再通过缩放原理建立真实的三层固态模型^[14]。这里仍然将负责无线能量传输(WPT)的天线放在手臂弯曲处,目的是将手臂运动产生的动能进行收集和发射;将负责通信的天线模块放置大臂处,负责收集无线能量传输天线发射过来的能量,进行必要的体表和体外通信,并且与WPT天线相距为140毫米。据此可

以更精确地研究手臂和天线的相互影响。天线反射系数的对比分析展示在图6中。其中,图6(a)展示了考虑手臂存在时仿真和测量反射系数的对比,测量的谐振频率相对仿真而言向高频偏移了160MHz,相对偏移仅为2.8%;测量所得的相对带宽也在一定程度上被展宽,这是因为馈电的织物微带线部分无法被精确的模拟导致,这也是织物天线中普遍存在的情况。总体而言,二者吻合较好。图6(b)展示了仅在手臂上放置WPT天线和同时放置通信天线情形下的结果对比,可以看出WPT天线的谐振频率会往高频偏移、带宽也会减少。这主要是由于两个天线位置太靠近形成了一定的耦合,并且由于手臂存在表面波也是一个主要的影响因素;该结果与文献[14]中所采用的八木宇田天线具有类似的特征。

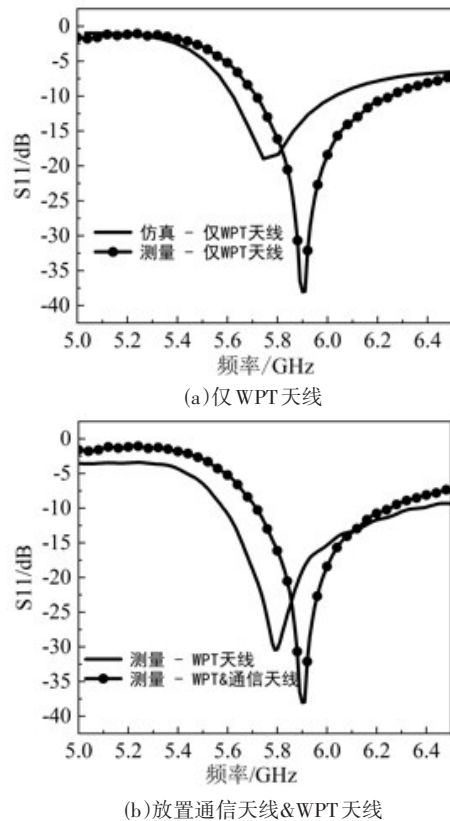


图6 定向纽扣天线参数特性

基于上述反射系数的对比结果,对WPT天线和通信天线间的传输系数进行了仿真和测量分析,如图7所示。其中,黑线是仿真结果,带圆形的黑线代表测量结果。可以看到,仿真的曲线随着频率的增加而逐渐减少,而测量结果正好具有相反的趋势,但是二者在所关心的5.8GHz的频段内误差仅在2dB以内,这能较好地满足后续的分析需求。产生误差的主要原

因是天线谐振频点的差异以及天线放置于人体时仿真和测试天线对应角度无法完全一致。

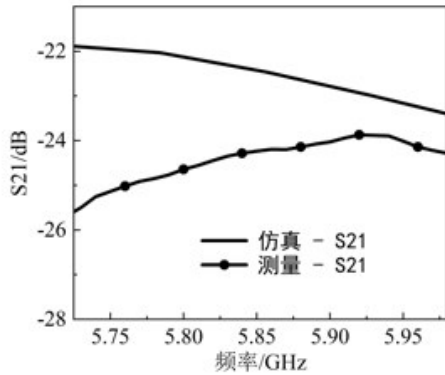


图7 测量与仿真S21对比

天线方向图的测试结果展示在图8中。其中,图8(a)和图8(b)展示了在5.9GHz时仿真和测试的E/H面方向图的对比。对于E面图的测量,其结果只对手臂上方的部分进行了对比分析,这是因为下方区域由于手臂的阻挡等辐射较小和测试的可操作性较差造成的;对于H面图,依据仿真结果中辐射的最大角度方向位,通过建立一定的测量支架进行360°测试分析。测量时,将接收的标准天线和待测天线的间距设置为约 $10\lambda_0$ (λ_0 为空气中电磁波的波长)以尽可能模拟远场,这个距离是考虑到头部存在影响所做的综合结果;另外,反射和接收天线所处的手臂位置导致我们无法完成在手臂上表面的180°范围内进行测试,仅能测试的最大范围约为162°。

从图8(a)和(b)所示仿真和测量方向图的数据对比中可以看出,无论是主极化还是交叉极化二者吻合较好,并且E面图的上翘角度也几乎一致。其中测量数据的抖动主要是由天线共形导致实测时真实的形变无法与仿真完全一致等造成的。

3.3 天线对手臂影响分析

从图8(a)和(b)所示仿真和测量方向图的数据对比中可以看出,无论是主极化还是交叉极化二者吻合较好,并且E面图的上翘角度也几乎一致。从手臂存在时天线方向图的倾斜可以看出,天线对手臂的影响也是明显存在的,这影响着传输效率和人体吸收率。

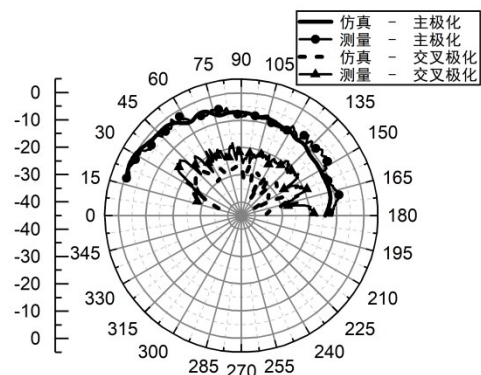
天线的传输效率与插入损耗之间的关系为:

$$T = 10^{S_{21}(dB)/10} \times 100\% \quad (1)$$

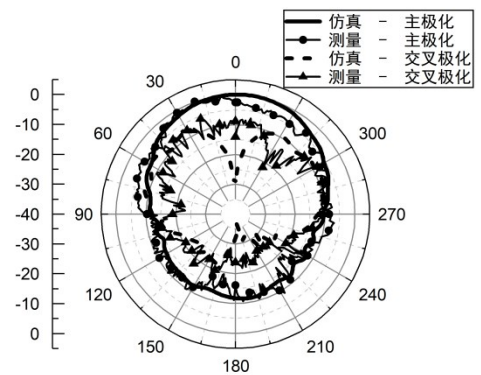
通过计算可得,该定向纽扣天线在空气中的传输效率为0.06%,而放置人体手臂上可以达到0.4%。与之前的八木天线相比,放置于手臂上后,天线的传输

效率得到了大幅度提升,在那里考虑人体存在时的传输效率仅为 $7.6 \times 10^{-4}\%$ 。这说明研究沿着体表传输的定向纽扣天线更适合于体域网无线能量传输,相比而言,定向纽扣天线的辐射形成了较大的沿体表传输的平面波,从而增强了传输效率,而全织物八木天线由于有朝向手臂的直接辐射导致电磁波会透过或者绕射过手臂以致于沿体表传输的表面波减少。

遵照欧洲电工标准化委员会规定平均10g人体组织比吸收率(SAR值)和美国联邦委员会规定平均1g人体组织SAR值的标准,本文研究定向辐射纽扣天线对人体SAR值的影响。仿真结果显示,在输入功率为1W时,10g和1g皮肤层人体组织在天线工作频率处SAR值分别为 9.06×10^{-4} w/kg和 9.06×10^{-4} w/kg;在脂肪层分别为 7.52×10^{-5} w/kg和 7.52×10^{-5} w/kg;在肌肉层分别为 2.02×10^{-3} w/kg和为 6.41×10^{-3} w/kg。这些都远低于上述欧洲和美国标准对SAR值的要求。



(a) E面测量与仿真对比



(b) H面测量与仿真对比

图8 人体手臂及测量结果对比

4 结论

依据现有研究成果和未来发展趋势,在所提出的无线能量传输理念的指引下,本文提出了沿体表传输

的定向辐射纽扣天线结构,其在单极子天线附近加载 AMC 周期结构形成定向辐射。在该天线设计中, AMC 的横向尺寸与单极子天线的加顶圆形介质层直径相等,形成了不额外增加天线横向尺寸的结构形式。再依据中国人种群特点,采集了特定的中国女性手臂进行了三层固态模型建模,通过相应仿真和测试结果的对比分析确定了模型的有效性。最后,通过对天线不放置于手臂和放置手臂上性能的变化分析,探究了天线和手臂的相互影响。通过分析得知,该定向纽扣天线能够有效地提高天线的传输效率和降低人体比吸收率。这为后续研究低剖面和高频率的天线提供了必要的基础。

参考文献(References):

- [1] Mendes C, Peixeiro C. On-body transmission performance of a novel dual-mode wearable microstrip antenna [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(9): 4872-4877.
- [2] Sanz-Izquierdo B, Miller J A, Batchelor J C, et al. Dual-band wearable metallic button antennas and transmission in body area networks [J]. *IET Microwaves Antennas and Propagation*, 2010, 4(2): 182-190.
- [3] Brizzi A, Pellegrini A, Zhang L, et al. Statistical path-loss model for on-body communications at 94 GHz [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(11): 5744-5753.
- [4] Gao G, Hu B, Wang S, et al. Wearable circular ring slot antenna with EBG structure for wireless body area network [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(1): 434-437.
- [5] Arif A, Zubair M, Ali M, et al. A compact, low-profile fractal antenna for wearable on-body WBAN applications [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(5): 981-985.
- [6] Sun H, Hu Y, Ren R, et al. Design of pattern-reconfigurable wearable antennas for body-centric communications [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(8): 1385-1389.
- [7] Singh R K, Michel A, Nepa P, et al. Wearable dual band Quasi Yagi antenna for UHF RFID and 2.4 GHz applications [J]. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2020, 4(4): 420-427.
- [8] Yin X, Chen S J, Fumeaux C. Wearable dual-band dual-polarization button antenna for WBAN applications [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(12): 2240-2244.
- [9] Sambandam P, Kanagasabai M, Natarajan R, et al. Miniaturized button-like WBAN antenna for off-body communication [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(7): 5228-5235.
- [10] Hu X, Yan S, Zhang J, et al. Omni-directional circularly polarized button antenna for 5 GHz WBAN applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(8): 5054-5059.
- [11] Kim S, Ho J S, Poon A. Wireless power transfer to miniature implants: transmitter optimization [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(10): 4838-4845.
- [12] Chong Y W, Ismail W, Ko K, et al. Energy harvesting for wearable devices: a review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(20): 9047-9062.
- [13] Vital D, Bhardwaj S, Volakis J L. Textile-based large area RF-power harvesting system for wearable applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(3): 2323-2331.
- [14] Wang Y, Xu Y, Wang B, et al. Wireless power transfer on human arm for future body area network [C]//*IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, 2021: 29-30.
- [15] Foroozesh, Alireza, Shafai, et al. Investigation into the application of artificial magnetic conductors to bandwidth broadening, gain enhancement and beam shaping of low profile and conventional monopole antennas. [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59(1): 4-20.
- [16] Kyriazidou C A, Contopanagos H F, Alexopoulos N G. Space-frequency projection of planar AMC's on integrated antennas for 60 GHz radios [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(4): 1899-1909.

编辑:王谦