

【校庆特稿】

一种高增益超薄柔性可穿戴天线阵列设计

张洪欣, 贾心雨

(北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876)

摘要:为克服微带天线增益较低的限制并提高天线的整体性能,基于聚酰亚胺材料和十字形单元,提出并设计了一种超薄柔性可穿戴的高增益天线阵列。该天线阵列由 16 个十字形天线单元均匀分布在 4×4 的拓扑结构中组成,体积为 $72 \text{ mm} \times 72 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$,最大增益可达 9.7 dBi,天线单元工作频段为 5.75~5.83 GHz,中心频率为 5.8 GHz,相比于现有文献的微带天线平均增益提升了 3.87 dB。对天线阵列进行了实物制作及测试,测试结果与仿真结果吻合较好,证明了该设计方案的可行性和实用性。

关键词:微带天线;天线阵列;高增益;柔性可穿戴

中图分类号: TN 820

文献标识码: A

DOI: 10.13486/j.issn.2097-4973.2024.01.002

0 引言

随着以人体为中心的通信技术的发展和可穿戴电子市场的兴起,对可穿戴电子通信设备的研究已经成为一个热点问题。可穿戴电子设备中最重要的部件之一是可穿戴天线,与普通刚性印刷天线相比,可穿戴天线具有突出的灵活性和集成能力。柔性可穿戴天线可以应用于传感、跟踪、自动支付、访问控制和其他柔性移动设备等,在医疗、运动健康、智能家居等领域发挥重要作用^[1-2]。

文献[3]提出了一种具有 EBG 结构的可穿戴天线压力传感器,采用柔性硅橡胶板作为介质基板,该天线工作在 2.45 GHz 频段。EBG 结构减少了天线对人体的辐射,SAR 降低了 99% 以上;同时,EBG 结构将天线的前向辐射增益从 1.63 dBi 提高到了 4.36 dBi。文献[4]提出并研究了一种厚度为 4.68 mm 的新型天线,该天线可在 6~12 GHz 的超宽带频率范围内工作,设计的主要思想是将 5×5 单元的 MTS 结构加载到设计的天线上,以增加工作带宽。文献[5]分析了弯曲对纺织天线性能的影响,其中被测天线由毛毡基板制成,工作在 2.45 GHz,天线的测量工作频率范围为 2.33~2.5 GHz,2.45 GHz 时增益为 4.7 dBi,并通过沿 X 轴和 Y 轴在不同半径和角度上弯曲结构来检查天线的鲁棒性。文献[6]提出了两种工作于 2.4 GHz 的紧凑型基于纺织品的平面偶极子和环形天线,天线采用厚度为 0.44 mm 的迷彩军用印花,使用导电铜线的棉质牛仔布和缝纫刺绣技术制成,并在受试者的各个位置(例如躯干和四肢关节)上进行测试;基于围绕人体不同组织弯曲后的反射系数研究了天线的性能,实验表明,在所有情况下,天线的谐振频率均接近 2.4 GHz,回波损耗均低于 -10 dB;人体的存在会对天线辐射方向图产生影响,导致前后比增加,也使天线更具指向性。总体而言,该刺绣纺织天线的性能能够适用于室内环境中各种以身体为中

收稿日期:2024-06-14

基金项目:国家自然科学基金项目(62071057)

第一作者简介:张洪欣(1969—),男,山东滨州人,教授,博士,博士生导师,主要从事电磁辐射信息安全、电磁兼容、脑机接口技术等研究。E-mail: hongxinzhang@bupt.edu.cn

心的可穿戴应用。

微带天线的不足之处在于其较低的增益性能,该缺陷源于其结构特性,其中增益的大小与介质基板的厚度紧密相关。为了克服这一缺陷,理论上可以通过增加介质基板厚度来提升天线的增益。然而,在微带天线被应用于可穿戴设备的情境下,这种方法的可行性受到了限制,因为过厚的介质基板可能不利于与人体表面的良好共形匹配。

鉴于此,本文提出并设计了一种新型的超薄、柔性可穿戴天线阵列,旨在克服上述的限制并提高天线的整体性能。选择天线阵列技术作为研究对象,主要是因为相较于单个天线,天线阵列的增益可以显著提升。因此,本文所设计的天线阵列不仅可以满足可穿戴设备对薄型化的需求,而且在保持良好匹配特性的同时,显著提高了无线通信系统的传输效率和覆盖范围。

1 聚酰亚胺十六阵元天线设计

在天线阵列设计中,将 16 个十字形天线单元均匀分布在 4×4 的拓扑结构中构成了均匀平面阵列,结构如图 1 所示。

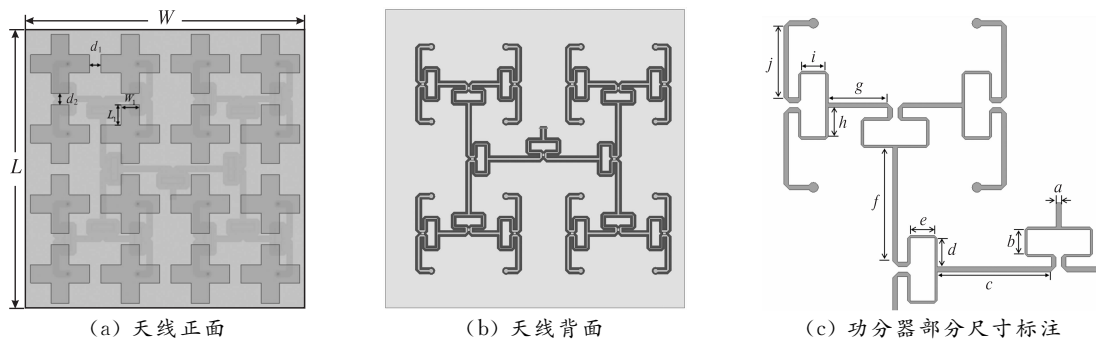


图 1 天线阵列结构示意图

天线设计选用双层厚度 h 为 0.2 mm 的聚酰亚胺(相对介电常数 $\epsilon_r = 3.2$, 损耗角正切 $\tan \delta = 0.0018$) 作为介质基板,天线的辐射贴片和接地板均为铜。该阵列天线采用威尔金森功分器并行馈电结构,该馈电方式能够确保电磁能量以等幅同相的形式进行传输,从而有效避免了串行馈电结构中由于能量不等幅引起的阵列天线方向图倾角问题。阵列天线利用同轴馈电机理为功分器结构的中央节点提供能量输入。16 元天线阵列的最终设计尺寸如表 1 所示。

表 1 聚酰亚胺阵列天线尺寸

参数	W	L	b	e	h	W_1	L_1	c	f	i	d_1	a	d_2	g	j
数值	72	72	2.655	2.62	3.14	4.7	5.2	12.45	12.45	2.62	2.9	0.54	3.14	6.45	7.76

1.1 天线阵列仿真分析

利用仿真电磁软件 HFSS 对自由空间状态下天线阵列的回波损耗进行了仿真分析,并给出了阵列天线的电流分布、远场方向图以及增益曲线。

使用电磁仿真软件 HFSS 对自由空间状态下的 4×4 阵列天线模型进行仿真,天线的 S_{11} 参数曲线如图 2 所示。从图中可以观察到,阵列天线的工作频率范围为 5.75~5.83 GHz,中心频率为 5.8 GHz,在该频点下的 S_{11} 参数值为 -20.92 dB,满足小于 -10 dB 的设计要求。

为了进一步优化提出的阵列天线结构,采用单一变量法研究了一些重要参数对天线性能的影响。

一是改变天线阵元边与边的间距 d ,使其在 2.8~2.9 mm 变化,步进值为 0.1 mm, S_{11} 曲线变化如图 3 所示。从图 3 可以看出,天线工作频率随着 d 的增大先增大后减小。 d 为 2.9 mm 时天线工作在 5.8 GHz,因此选取 $d=2.9$ mm 为最优值。

二是改变天线阵元的边长 W_1 , 使其在 4.6~4.8 mm 变化, 步进值为 0.1 mm, S_{11} 曲线变化, 如图 4 所示。从图 4 可以看出, 随着 W_1 的增大, 天线的工作频率先向低频移动后向高频移动。 W_1 为 4.7 mm 时天线工作在 5.8 GHz, 因此选取 $W_1=4.7$ mm 为最优值。

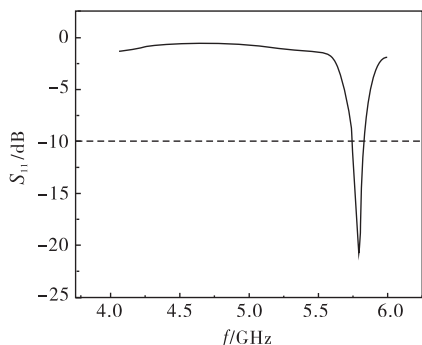


图 2 S_{11} 仿真结果曲线图

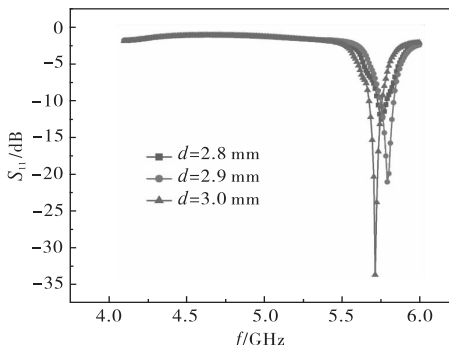


图 3 天线阵列不同 d 值 S_{11} 仿真图

所设计的天线阵列在 5.8 GHz 时的表面电流分布如图 5 所示。通过分析表面电流分布图可以得出以下结论: 当该天线在 5.8 GHz 的频率下工作时, 电流主要集中于每个阵元的特定结构部分, 这充分表明在此设计中, 威尔金森功分器有效地实现了电流的均匀分布。具体来说, 这种均匀分布的效果体现在了 16 个阵元上, 进一步验证了所设计功分器的良好性能和电流分配的均衡性。

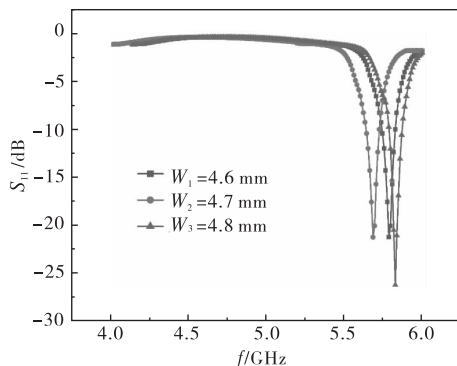


图 4 天线阵列不同 W_1 值 S_{11} 仿真图

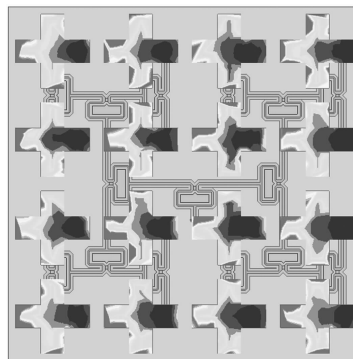


图 5 电流分布示意图

1.2 天线附着在人体表面状态分析

为了验证阵列天线集成在人体组织上的性能稳定性, 将阵列天线分别共形于人体手臂和大腿外侧进行仿真分析。在 HFSS 仿真软件中创建人体组织模型, 该模型由皮肤、脂肪和肌肉三层组成, 各层参数如表 2 所示。

表 2 人体组织参数参考表

组织结构	厚度/mm	介电常数	电导率/($S \cdot m^{-1}$)
皮肤	2	36.90	1.46
脂肪	3	5.28	0.10
肌肉	10	50.40	1.88

天线模型与人体模型的距离为 5 mm, 结构示意图如图 6 所示。通过全波仿真分析得到了阵列天线在不同情况下的反射系数曲线, 如图 7 所示。图 7 中曲线分别表示天线放置在自由空间时的反射系数曲线、天线围绕人体大腿弯曲时的反射系数曲线、天线围绕人体手臂弯曲时的反射系数曲线。通过对比三条曲线, 可以明显观察到如下现象: 当天线在大腿弯曲处变形时, 天线的工作频点变为 5.74 GHz; 当天线在

手臂弯曲处发生形变时,天线的工作频点变为 5.7 GHz。这是由于手臂曲率较小,天线承受的形变更为明显,导致其工作频率出现了更为明显的偏移。经过以上分析,可以得出结论:鉴于该天线仅工作在单一频率,它更适合集成于人体背部等不易导致天线显著折弯的部位。

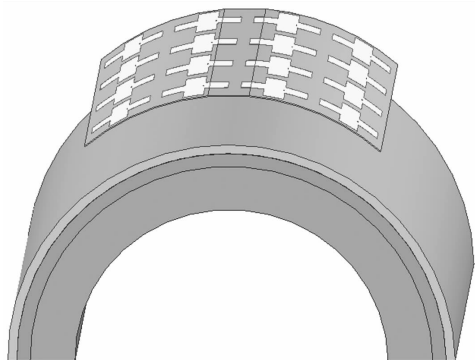


图 6 天线围绕人体组织弯曲示意图

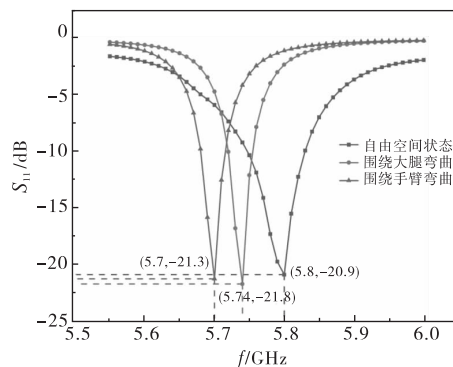
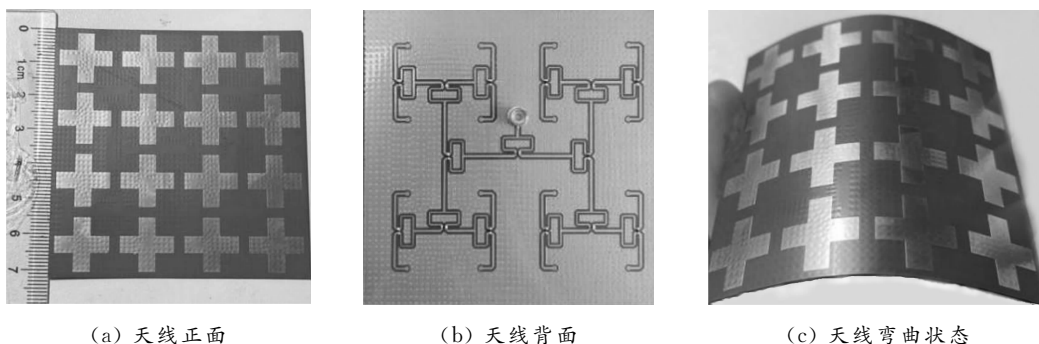


图 7 天线阵列与手臂、大腿共形前后 S_{11} 曲线

2 天线加工与测试分析

根据设计方案加工制作了阵列天线实物。将天线阵列印制于 $72\text{ mm} \times 72\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$ 的聚酰亚胺柔性介质板上,天线的实物如图 8 所示。由图 8 可以看出,阵列天线尺寸较小且具有柔韧性,可应用于可穿戴领域。



(a) 天线正面

(b) 天线背面

(c) 天线弯曲状态

图 8 天线阵列实物图

使用矢量网络分析仪对处于自由空间状态下的阵列天线进行了测试,测试结果与仿真结果对比情况如图 9 所示。可以观察到两者在趋势上呈现出高度的一致性。在测试频率为 5.8 GHz 时,天线的 S_{11} 参数实测值为 -17.6 dB ,这表明天线在所述工作频率下具有良好的匹配性能。实测值与仿真值之间存在的微小差异可能是由多种因素造成的,包括加工误差、测量设备的准确性以及仿真模型与实际物理结构的微小差异等。

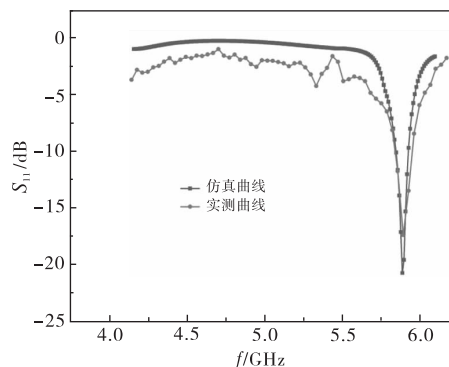


图 9 天线阵列 S_{11} 参数仿真与测试对比图

天线远场辐射方向图的仿真与测试对比结果如图 10 所示。由图 10 可以看出,测试曲线与仿真曲线的走向基本一致,天线在 5.8 GHz 时呈单向辐射,具有良好的辐射性能。天线增益曲线的仿真与测试对比结果如图 11 所示。由图 11 可以看出,天线增益的实测曲线与仿真曲线走向基本吻合,验证了设计方案的可行性。

在表 3 中,将本文设计的超宽带天线与一些现有文献中的天线在多个关键性能指标上进行了对比,包

括天线的体积、增益性能、工作频段以及 S_{11} 参数等。

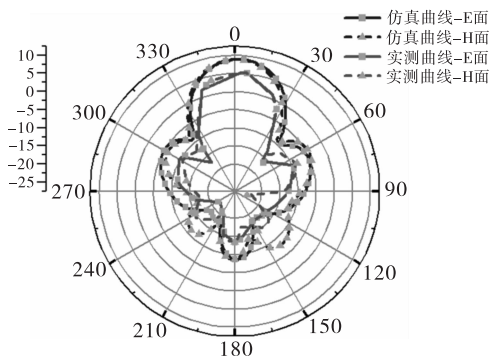


图 10 天线阵列 5.8 GHz 远场辐射方向图

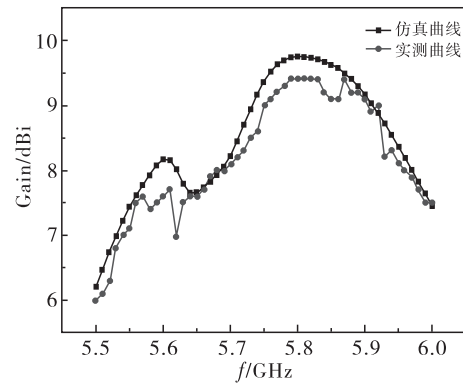


图 11 天线阵列增益图

由表 3 可知,本文设计的天线在保持较薄物理厚度的同时,达到了较高的增益水平。此外,天线的 S_{11} 值表现良好,表明其具有优异的匹配特性,非常适合应用于可穿戴系统中,确保了在紧凑的空间内实现高效的无线通信功能。

表 3 与现有论文工作对比

文献	体积/ mm^3	增益/dBi	工作频段/GHz	S_{11} /dB
[7]	$52 \times 52 \times 1.5$	5.3	2.35~2.45	-19.8
[8]	$40 \times 100 \times 2.4$	2.1	2.1~3.2	-22.3
[9]	$50 \times 50 \times 4$	7.23	4.72~6.19	-23.6
[10]	$42 \times 35 \times 1$	7.53	2.4~2.485	-20.05
本文	$72 \times 72 \times 0.4$	9.7	5.75~5.83	-20.9

3 结论

本文设计了一种基于聚酰亚胺材料的高增益超薄柔性可穿戴天线阵列。利用 16 个十字形天线单元均匀分布在 4×4 的拓扑结构中构成了均匀平面阵列,天线尺寸为 $72 \text{ mm} \times 72 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$,工作频率在 5.8 GHz 时,最大增益可达 9.7 dBi。与现有文献相比,本文所设计的天线阵列具有超薄特性,便于用于穿戴设备,并且具有较大的增益提升。此外,对阵列天线的弯曲特性以及人体不同部位对天线的影进行了仿真分析,并对天线进行了实物加工制作以及测试分析。仿真和测试结果表明,所设计的天线阵列具有较高的增益,能够满足可穿戴设备的需求。

参考文献:

- [1] AL-GBURI A J A, ISMAIL M M, MOHAMMED N J, et al. Electrical conductivity and morphological observation of hybrid filler: silver-graphene oxide nanocomposites for wearable antenna[J]. Optical materials, 2024, 148. DOI:10.1016/j.optmat.2024.114882.
- [2] PHUKAN A, BHATTACHARYYA N S. Frequency self-compensating technique for mitigating detuning effects due to bending for wearable patch antennas[J]. Engineering research express, 2023, 5(4). DOI:10.1088/2631-8695/ad04ab.
- [3] NIE H K, XUAN X W, REN G J. Wearable antenna pressure sensor with electromagnetic bandgap for elderly fall monitoring[J]. AEU-international journal of electronic and communication, 2021, 138. DOI:10.1016/j.aeu.2021.153861.

- [4] MUHAMMAD H A, ABDULKARIM Y I, ABDOUL P A, et al. Textile and metasurface integrated wide-band wearable antenna for wireless body area network applications[J]. AEU-international journal of electronic and communication, 2023, 169. DOI:10. 1016/j. aeue. 2023. 154759.
- [5] ADAM I, KAMARUDIN M R, RAMBE A H, et al. Investigation on wearable antenna under different bending conditions for wireless body area network (WBAN) applications[J]. International journal of antennas and propagation, 2021, 2021(Pt. 1): 5563528. 1-5563528. 9. DOI:10. 1155/2021/5563528.
- [6] VARMA S, SHARMA S, JOHN M, et al. Design and performance analysis of compact wearable textile antennas for IoT and body-centric communication applications[J]. International journal of antennas and propagation, 2021, 2021(Pt. 2): 7698765. DOI:10. 1155/2021/7698765.
- [7] KHAJEH-KHALILI F, SHAHRIARI A, HAGHSHENAS F. A simple method to simultaneously increase the gain and bandwidth of wearable antennas for application in medical/communications systems[J]. International journal of microwave and wireless technologies, 2021, 13(4): 374-380. DOI:10. 1017/S1759078720001075.
- [8] DOUHI S, ISLAM T, SARAVANAN R A, et al. Design of a flexible rectangular antenna array with high gain for RF energy harvesting and wearable devices[J]. Zhurnal nano ta elektronnoi fizyky, 2023, 15(3). DOI:10. 21272/jnep. 15(3). 03010.
- [9] GAO G P, MENG H J, GENG W F, et al. Design of a wide bandwidth and high gain wearable antenna based on nonuniform metasurface[J]. Microwave and optical technology letters, 2021, 63(10): 2606-2613. DOI:10. 1002/mop. 32937.
- [10] WANG Y, BAO J Q, TIAN Y W, et al. Design of high gain wearable antenna based on wireless body area network communications[J]. Journal of physics: conference series, 2021, 1971(1): 012018. DOI 10. 1088/1742-6596/1971/1/012018.

Design of an Ultra-thin Flexible Wearable Antenna Array with High Gain

ZHANG Hongxin, JIA Xinyu

(School of Electronic Engineering,

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: To overcome the limitation of low gain in microstrip antennas and to improve overall antenna performance, an ultra-thin flexible wearable antenna array with high gain is proposed and designed based on polyimide material and cross-shaped elements. This antenna array consists of 16 cross-shaped antenna elements uniformly distributed in a 4×4 topology, with dimensions of $72 \text{ mm} \times 72 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$. It can achieve a maximum gain of 9.7 dBi and operates in the frequency band of 5.75~5.83 GHz, with a center frequency of 5.8 GHz. Compared to the average gain of microstrip antennas reported in existing literature, the designed antenna array offers an improvement of 3.87 dB. Finally, the antenna array is fabricated and tested, and the test results closely matching the simulations, demonstrating the feasibility and practicality of this design.

Keywords: microstrip antennas; antenna array; high gain; flexible wearable

(责任编辑:贾晶晶)

引用格式 张洪欣,贾心雨.一种高增益超薄柔性可穿戴天线阵列设计[J].山东航空学院学报,2024,41(1):9-14.
ZHANG H X, JIA X Y. Design of an ultra-thin flexible wearable antenna array with high gain[J]. Journal of Shandong University of Aeronautics, 2024, 41(1): 9-14.