

# 一种基于超表面的宽带圆极化天线，用于生物医学遥测

张凯、马里埃拉·萨雷斯托尼埃米D、IEEE高级会员、萨米·米利马基、平·杰克·索、IEEE高级会员、陈娟、严森、IEEE会员

摘要 -

本文介绍了一种基于超表面 (MS) 的宽带可穿戴圆极化 (CP) 天线，用于与体内设备通信。该天线由一个交叉偶极子、一个MS平面和一个CP馈电网络组成。馈电网络在交叉偶极子的每相邻臂之间产生一个准90°相位延迟。这产生CP辐射，并减少遥测天线和植入式天线之间的极化失配。MS由一个5×5单元阵列组成，作为交叉偶极子的反射器以改善前向辐射，同时保持低剖面结构。这是通过设计在操作频段内具有近零相位反射的单元格来实现的。为了适应贴身使用，天线完全采用柔性材料设计。纺织导电元件嵌入到PDMS基底中。其尺寸为106×106×5毫米<sup>3</sup> (在3.5 GHz时为1.24λ×1.24λ×0.05λ)。结果显示，从2.25 GHz到6 GHz的-10 dB阻抗带宽为90%。3 dB轴比带宽从2.9 GHz到4.95 GHz为52%，最大身上增益为-10.5 dBi。最后，对天线的比吸收率 (SAR) 评估表明其值远低于FCC的限制。

索引词 - 生物医学遥测、圆极化天线、可穿戴天线、宽带天线。

## 一、引言

生物医学遥测技术，涉及植入式与可穿戴无线体域网 (WBAN) 环境。它们之间的感知、诊断和通信需要电子模块和天线来接收/传输来自/至人体内植入天线的信号，这些信号通过外部贴身的体表天线进行[1],[2]。尽管迄今为止为此目的引入的大多数天线都集中在线极化 (LP) 天线上，但与植入式传感器的通信可能更为复杂。

稿件于2024年1月5日收到；2024年2月26日接受。发表日期为2024年3月1日；当前版本日期为2024年6月4日。本工作部分由中国国家自然科学基金资助，项目编号为61971340和61901351；部分由陕西省重点研发计划资助，项目编号为2022GY-114；部分由芬兰科学院研究委员会资助，项目编号为355643。(通讯作者：Sen Yan。)

张凯任教于西安工业大学自动化与信息工程学院，中国西安710048 (电子邮箱：kai.zhang@xaut.edu.cn)。

Mariella Sarestoniemi 和 Ping Jack Soh 就职于芬兰奥卢大学无线通信中心 (CWC)，邮编90570 奥卢。

Sami Myllymaki 就职于芬兰奥卢大学微电子 (MIC) 研究所，邮编90570 奥卢。

陈娟和Sen Yan

就职于西安交通大学信息与通信工程学院，中国西安710049 (电子邮箱：sen.yan@xjtu.edu.cn)。

数字对象标识符 10.1109/LAWP.2024.3372197

由于在人体内运作时它们可能具有动态的位置和方向，因此存在这一问题。为了克服这一问题，圆极化 (CP) 在减少极化损失、衰落和多径效应方面非常有效[3]、[4]。

为了实现CP特性，文献中提出了各种设计方法。在[5]中，使用线性极化馈电结构激发极化旋转人造磁性导体（AMC）的不同电流分布，以在不同频段产生双极化。另一种产生CP辐射的方法是采用孔径耦合馈电结构、L形槽和微带线，基于特征模理论在[6]中激发两个具有90°相位差的正交模式。在[7]中，提出了一种新颖的CP激发方法。引入了一个L形短柱作为双环槽馈电结构上的虚拟输入端口，以便在实际端口被激发时产生90°相位延迟。虽然在自由空间中展示了卓越的性能，但众所周知，当可穿戴天线用于生物遥测在人体上运作时，其反射和远场特性可能会有显著不同。因此，必须在幻影上进行优化以确保适当的性能。

除此之外，这些天线中使用的刚性材料可能会显著影响用户的舒适度。在[8]中，为一种植入式系统设计了一款紧凑的超宽带刚性LP天线，该系统的工作频率为3.1至10.6 GHz，在10毫米深度植入时的传输损耗为-14分贝。在文献[9]中提出了一种用于微波成像的另一种半柔性天线。刚性单极子天线位于一个半砖块中心，以便直接将天线附着到身体上。在文献[10]中，提出了一种生物匹配的喇叭形天线，由充满水的孔洞组成，以模仿其整个带宽下底层组织的频率依赖介电常数。评估该天线在发送和接收模式下以不同旋转角度操作时的传输性能（S12）表明，由于这些旋转引起的极化不匹配会极大地恶化链路。为了克服这一问题，提出了一种极化可重构的LP天线[11]，能够通过位于偶极臂上的PIN二极管在 $0^\circ, +45^\circ, 90^\circ$ 和 $-45^\circ$ 之间切换。在文献[12]中，介绍了一种用于植入式系统的CP接收天线。辐射器上应用了角截断来产生CP波，而使用4 x 4 MS阵列进行极化转换。然而，该天线是刚性的，且带宽较窄。此外，天线与人体组织之间的距离潜在变化使其性能容易受到影响。因此，减少反射和极化不匹配是遥测天线的重要问题。

具有新颖电磁特性的超表面（MS）已成功集成到可穿戴天线中

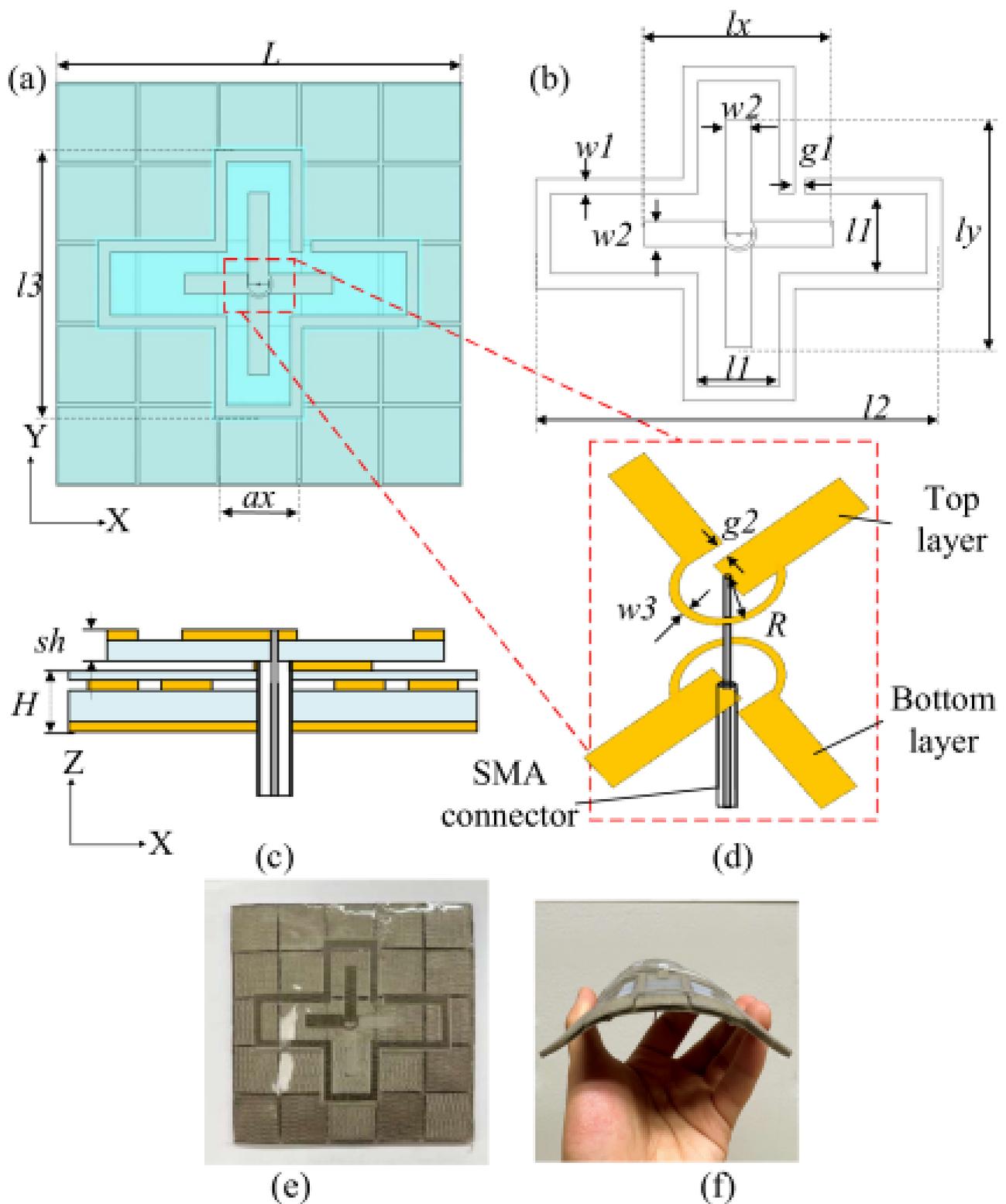


图1. 天线模型。(a) 俯视图，(b) 馈电结构，(c) 侧视图，(d) 馈电结构，(e) 原型，以及 (f) 其灵活性。 $L=106$ 毫米， $ax=20.48$ 毫米， $w1=3.13$ 毫米， $w2=5.48$ 毫米， $w3=0.71$ 毫米， $lx=39.28$ 毫米， $ly=48.49$ 毫米， $g1=2.30$ 毫米， $g2=0.21$ 毫米， $sh=2.00$ 毫米， $H=3.50$ 毫米， $l1=16.96$ 毫米， $l2=84.46$ 毫米， $l3=71.10$ 毫米， $R=3.66$ 毫米（单位：毫米）。

提高它们的性能[13]、[14]。其最重要的例子之一是应用活动调制补偿（AMC）平面，这些平面可以作为反射器，扩展天线的带宽并保持低剖面，无论是在线极化（LP）还是圆极化（CP）天线中[15]、[16]。与可穿戴天线集成的AMC平面在[17]、[18]和[19]中表明提高了辐射效率和阻抗匹配。然而，一个关键的区别在于它们的辐射方向。它们都表现出离体辐射模式。除此之外，基于多硅（MS）的辐射器可以是紧凑的可穿戴天线，设计用于在特定频率下

共振，并且可以使用特殊的馈电结构进行激发[20]、[21]、[22]。在提高可穿戴性方面，聚二甲基硅氧烷（PDMS）聚合物因其电特性的柔韧性和稳定性而广泛用于可穿戴天线和组件[19]、[20]、[21]。这克服了基于纺织品的可穿戴天线（如毛毡和牛仔布）的缺点，因为PDMS是防水、透明且适用于宽广的温度范围（-60至200°C）。已有多篇报道表明几种基于PDMS的可穿戴天线在自由空间表现出优异的性能[23]、[24]、[25]。

本信提出了一种高度灵活且宽带的圆极化（CP）天线，该天线向人体辐射，用于从2.26 GHz到6 GHz频率范围内的生物医学遥测操作。

四个逆时针旋转的臂，每个臂提供90°的相位延迟，集成到天线中以产生右手螺旋极化（CP）。使用各向异性介质（AMC）平面来重定向辐射朝向人体，以提高前向增益和传输链路，同时保持低剖面结构以及机械灵活性。仿真和测量结果表明，当天线在具有90%分数阻抗带宽和47.4%分数轴比（AR）带宽的人体模型上运行时，性能令人满意。据我们所知，这是首个设计并优化用于直接接触人体组织并具有如此高级别带宽、AR带宽和增益的CP天线。

## II. 天线设计与原理

所提出的天线如图1所示。柔性的聚二甲基硅氧烷（PDMS）基底厚度为2毫米和3.5毫米，相对介电常数为2.75，损耗正切为0.002。该天线的导电元件由嵌入基底中的导电织物形成。该织物的厚度为0.017毫米，有效电导率为 $1.18 \times 10^6$  S/m。由5 x 5贴片阵列组成的AMC平面作为反射器，而交叉偶极子则作为CP辐射器。围绕交叉臂的不连接环用于阻抗匹配。天线原型及其灵活性如图1(e)和(f)所示，所有天线的参数列在图1的标题中。

在整个设计过程中，使用人体模型来优化天线。该模型由三层组织组成，即皮肤层厚度为2毫米，脂肪层厚度为15毫米，肌肉层厚度为15毫米。该幻影块的总体尺寸为200毫米×200毫米×32毫米<sup>3</sup>，其电参数从CST材料库中获得。

### A. 馈电结构

馈电结构的爆炸视图如图1(b)所示。最顶层由一对交叉偶极子和一个带有槽口的条状环组成。同轴电缆的芯线连接到顶臂之一，如图1(d)所示。一条具有90度相位延迟的曲折线连接这一臂与同一层上的另一臂。在图1(b)的底层。最顶层包括一对交叉偶极子，它们被放置在上层的臂上，嵌入基板中。同轴电缆的外导体连接到底层的一个臂上，如图1(d)所示，而使用90度微带线来连接两个底臂。这在相邻的正交臂之间产生四分之一波长的相位差，从而激发右手共轭极化（CP）特性。

### B. 超表面设计

考虑到其在遥测方面的应用，前后比（FBR）对于确保通过/来自人体的信号满意聚焦非常重要。同时，低剖面结构对于确保用户的舒适性很重要。为了实现这两个特性，设计了一个AMC平面，并将其作为磁性导体集成到天线中。

该超表面由使用导电纺织品制成的AMC单元阵列组成，如图1(a)所示。天线的侧视图在图1(c)中展示，黄色标记的是纺织品，蓝色的是聚二甲基硅氧烷（PDMS）。所提出天线的制造过程在文献[25]中有描述。在CST中模拟并优化了该单元，Floquet端口放置在其上方，并且具有周期性结构边界。端口的参考平面设置在单元与自由空间之间的界面上。该独立单元的模拟反射相位在图2(a)中呈现。参考表面的反射相位被展示出来，该单元在3.15至5吉赫兹频率范围内工作，反射相位在±90°范围内。

此外，从图2

(b)可以明显看出，AMC平面能够实现宽带匹配。当评估有无AMC的天线性能时可以观察到这一点。

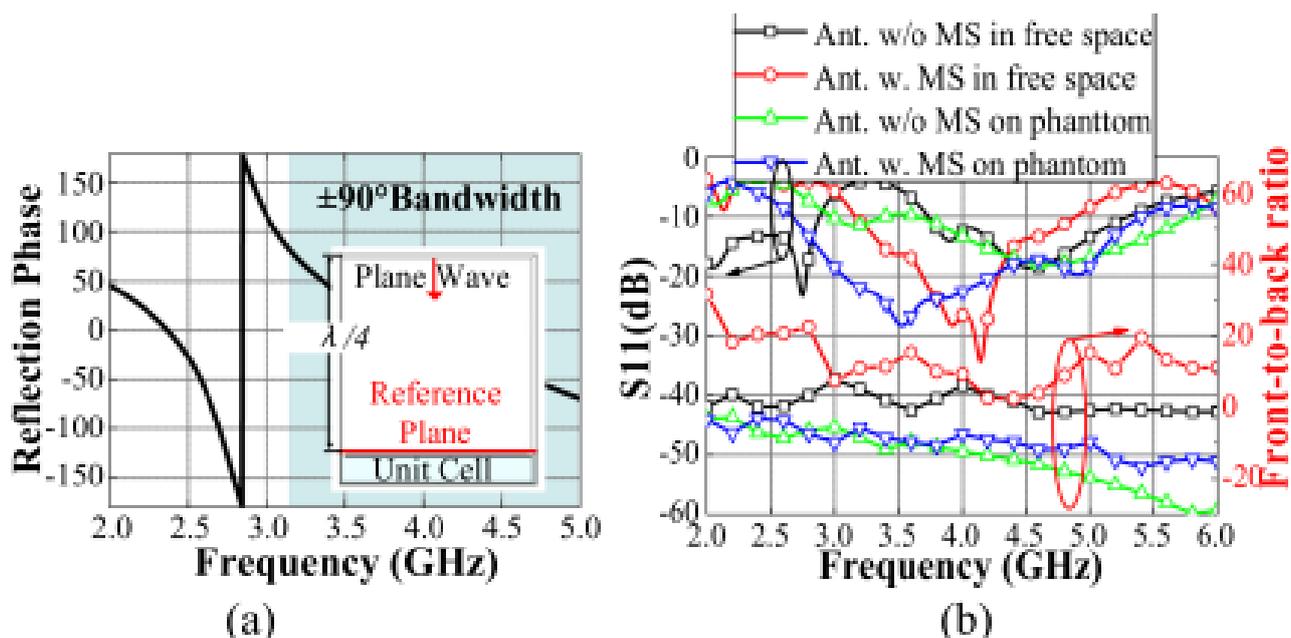


图2. 天线性能。(a) 单元反射相位，(b)  $S_{11}$  和 FBR  $(E_{+z})/(E_{-z})$  结果。w/o 表示无，w. 表示有。

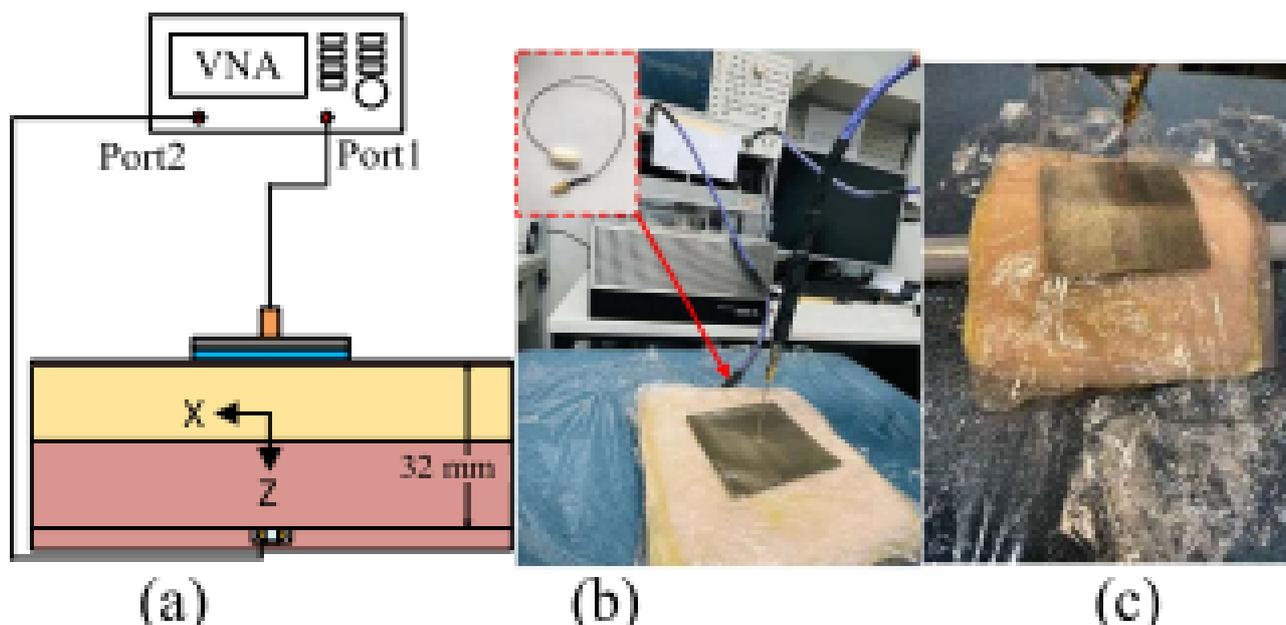


图3。(a)  $S_{12}$  测量装置。(b) 胶囊与所提出天线之间的无线链路测量。(c) 在幻影上对天线的评估。

在幻影上操作时，由于与有损耗的幻影接触，两根天线（有无AMC平面）都在宽带宽内工作。尽管带宽更宽，但在幻影上操作时，没有AMC平面的交叉偶极子的FBR $(E_{+z})/(E_{-z})$ 表现更差，如图2(b)所示，正值表示主波束方向朝向+z，反之亦然。虽然在自由空间中评估时AMC平面增加了FBR，但当天线在其上操作时，来自幻影的反射在一定程度上得到了缓解。此外，随着频率的增加，AMC平面在缓解反射方面的贡献也变得更加明显。

### III. 结果与讨论

为了实验性地评估天线，类似于仿真，PDMS天线被放置在制造的四层半固态幻影上，如图3所示。它由2毫米厚的皮肤、15毫米厚的脂肪、15毫米厚的肌肉以及5毫米厚（底部）的肌肉覆盖组成，如图3(a)

所示。这种半固态幻影模仿了肠道组织[26]。使用SPEAG的电介质评估套件 ( DAK ) 来测量连接到矢量网络分析仪 ( VNA ) 8720ES时每层的电气特性[27]。

## A. S参数性能

用于无线链路评估时，图3(b)所示的可植入胶囊天线被用作参考天线。它被放置在组织块内部，与所提议天线的中心平行[28]。胶囊天线是线极化的，具有全向辐射模式，在体模中的最大增益为-12.6 dBi。图3(a)展示了端口1和端口2。为了评估所提出的共面特性对无线链路的贡献，胶囊天线在绕z轴旋转三个角度 ( 0°、45°和90° ) 时进行了评估。

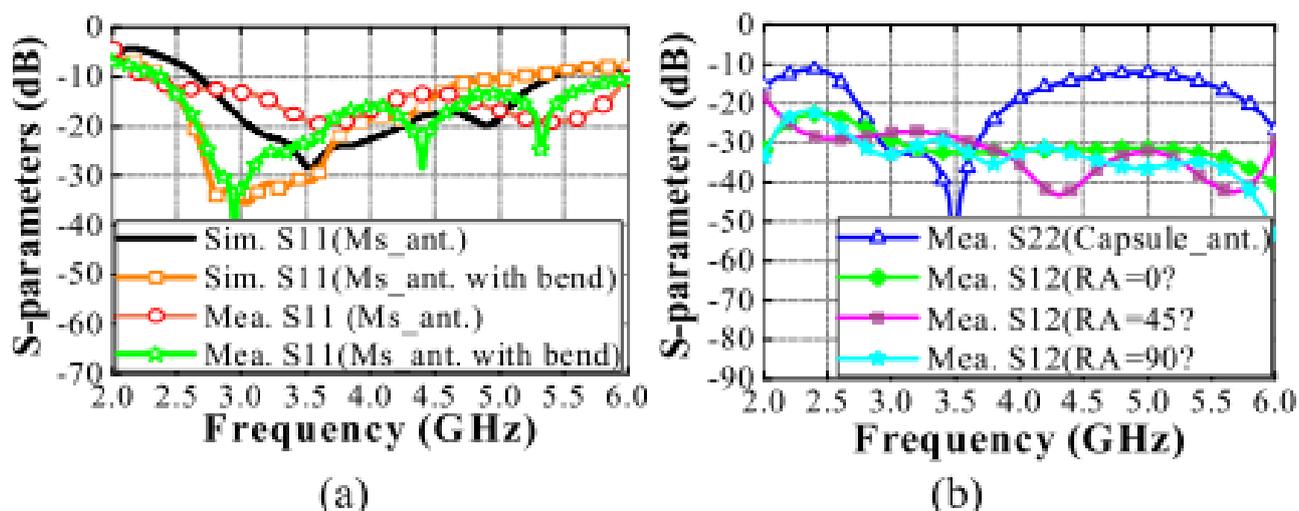


图4. 仿生体上天线的S参数曲线。(a)仿真与测量结果，(b)不同情况下的无线链路测量结果。Ms\_ant.=超表面天线，RA=旋转角度。

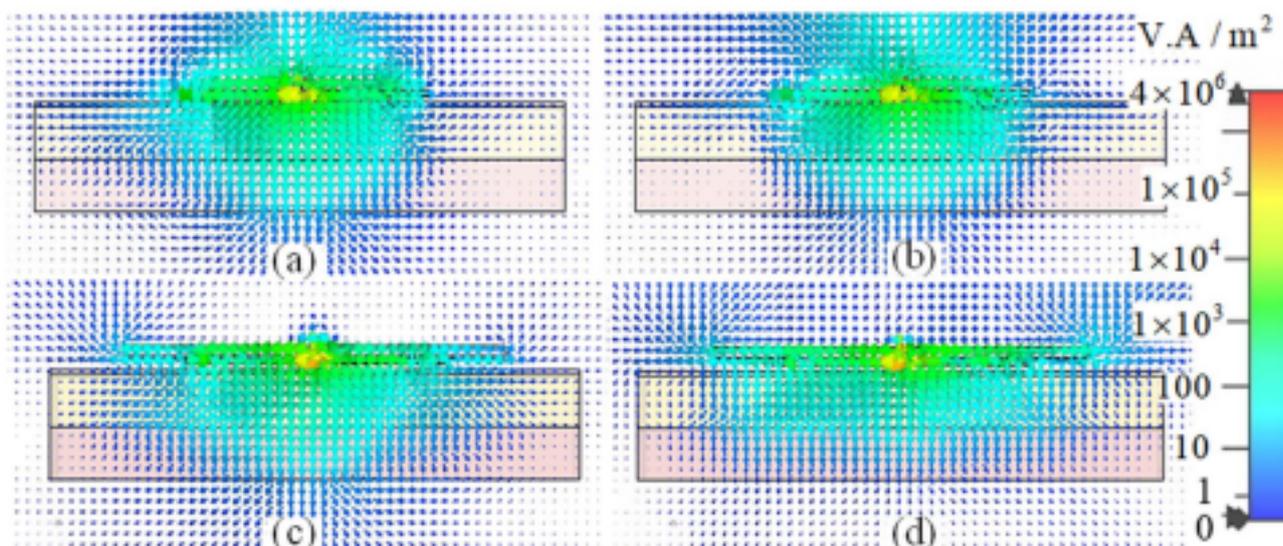


图5. 功率流分布 (a) 在3 GHz时没有应用AMC，(b) 在4 GHz时没有应用AMC，(c) 在3 GHz时应用了AMC，(d) 在4 GHz时应用了AMC。

图4所示结果表明，所提出的天线在仿真中在2.66至5.41 GHz频率范围内工作，在测量中则在2.25至6 GHz频率范围内工作的S<sub>11</sub>值。同时，具有弯曲部分的天线性能也展示在图4(a)和图5(b)中。弯曲天线的S<sub>11</sub>曲线是一致的，显示出稳定的反射性能和在非平坦测试表面上的优异灵活性。测量结果显示由于phantom的损耗和高相对介电常数而具有更宽的带宽。仿真与测量之间观察到的差异可以通过几个因素来解释

。首先，制造的不均匀phantom厚度在实际测试环境中相对于仿真产生了一些变化。其次，人体参数随频率略有变化，但在模拟器中外推时相对一致。最后，制造天线尺寸的轻微偏差影响了其实际的反射系数。

还要注意，所测量的胶囊天线的反射系数由蓝色的S22线表示。从实验的S21曲线来看，在2.5 GHz时的最大传输损耗为22.5分贝。这表明工作频带内链路性能的一致性。在图4(b)中，将该天线的链路性能与文献[2]中的LP人体贴附天线进行了比较。此先前天线被设置为LP接收器，而图3(b)中的胶囊天线则被设置为LP发射器天线。计算了不同旋转角度下工作频带的S12平均值，结果表明在不同旋转角度下CP天线的链路性能优于LP天线。当接收器天线为LP且胶囊天线旋转90°时，结果衰减很大。当胶囊天线相对于所提出的CP天线在体内随机方向旋转时，由于极化不匹配导致的无线链路衰减减小。

表I 与其他相关文献的比较

Ref.	Freq.(GHz)	BW	CP/LP
[2]	3.1-10.6	108%	LP
[3]	2.45	5.7%	CP
[9]	0.8-1.2	40%	LP
[10]	1.4-8.5	69%	LP
[11]	2.2-3.1	34%	LP
This work	2.25-6	90%	CP

BW：带宽，CP/LP：圆极化/线极化，AR：轴比，WL：无线链路。

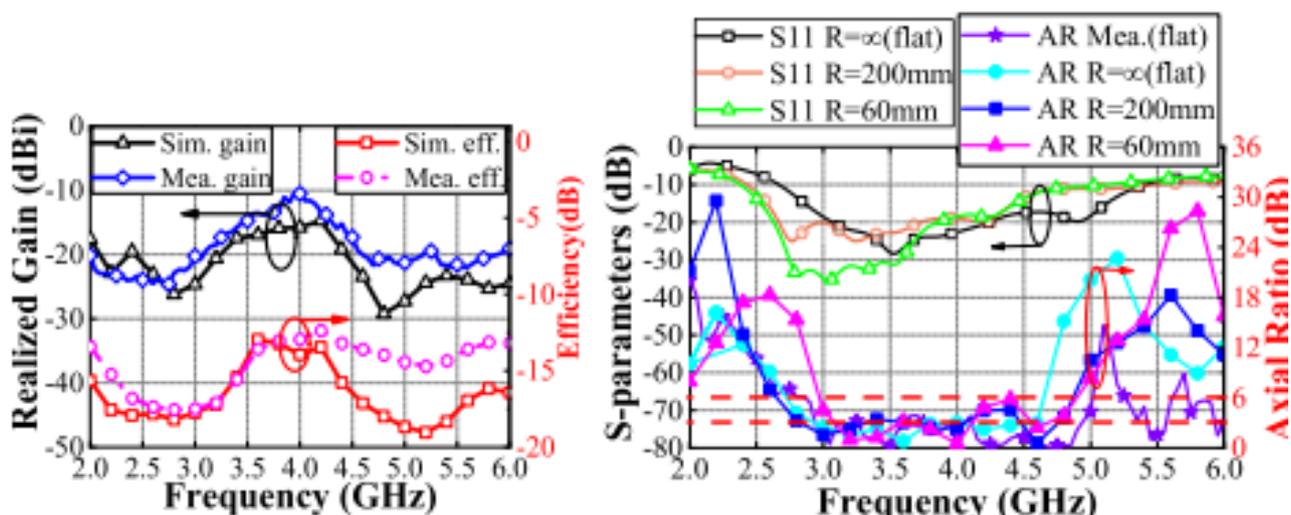


图6. 天线在幻影上的远场性能。(a) 增益 (+z方向) 和效率 (平坦区域) 以及(b) 轴比。

## B. 近场性能

图5展示了在两个主要频率下，有AMC平面和无AMC平面的幻影中波的方向和功率流。幻影每层的能量根据其介电常数和损耗因数具有不同的强度和分布。与没有AMC平面的辐射器相比，背部辐射几乎完全被AMC平面反射，这表明其对天线性能的贡献。

## C. 远场性能

然后使用SATIMO公司的商用近场测量系统评估了天线在幻影上的辐射性能。测量的增益和效率与图6(

a)中的模拟结果进行了比较，显示出令人满意的一致性。由于组织吸收，在4 GHz时测量的实现峰值增益为-10.5 dBi。除此之外，朝向幻影的+z方向的测量轴比在图6(b)中呈现，显示出从2.9 GHz到4.7 GHz的轴比带宽，相对带宽为47.4%。由于天线与水平面不完全对齐以及在制造的幻影中存在轻微的非均匀厚度，测量中观察到小的波动。图7展示了Th+z方向的标准化远场方向图。模拟的+z方向增益在3 GHz时为-24.6 dBi，在4 GHz时为-15.7 dBi，而实际测量的增益在同一频率下分别为-20.2 dBi和-10.5 dBi。图. 6(b)

描述了具有不同曲率半径R的天线在幻影上的性能。结果表明，随着曲率半径的减小，+z方向的增益在3 GHz时为-24.6 dBi，在4 GHz时为-15.7

dBi。值得注意的是，尽管如此，该天线仍在目标频带内工作，且 $S_{11}$

<-10dB，确保其功能性。随着弯曲曲率的增加，AR（轴比）略有恶化。尽管如此，整体AR性能仍保持在6分贝以下，满足大多数实际要求。

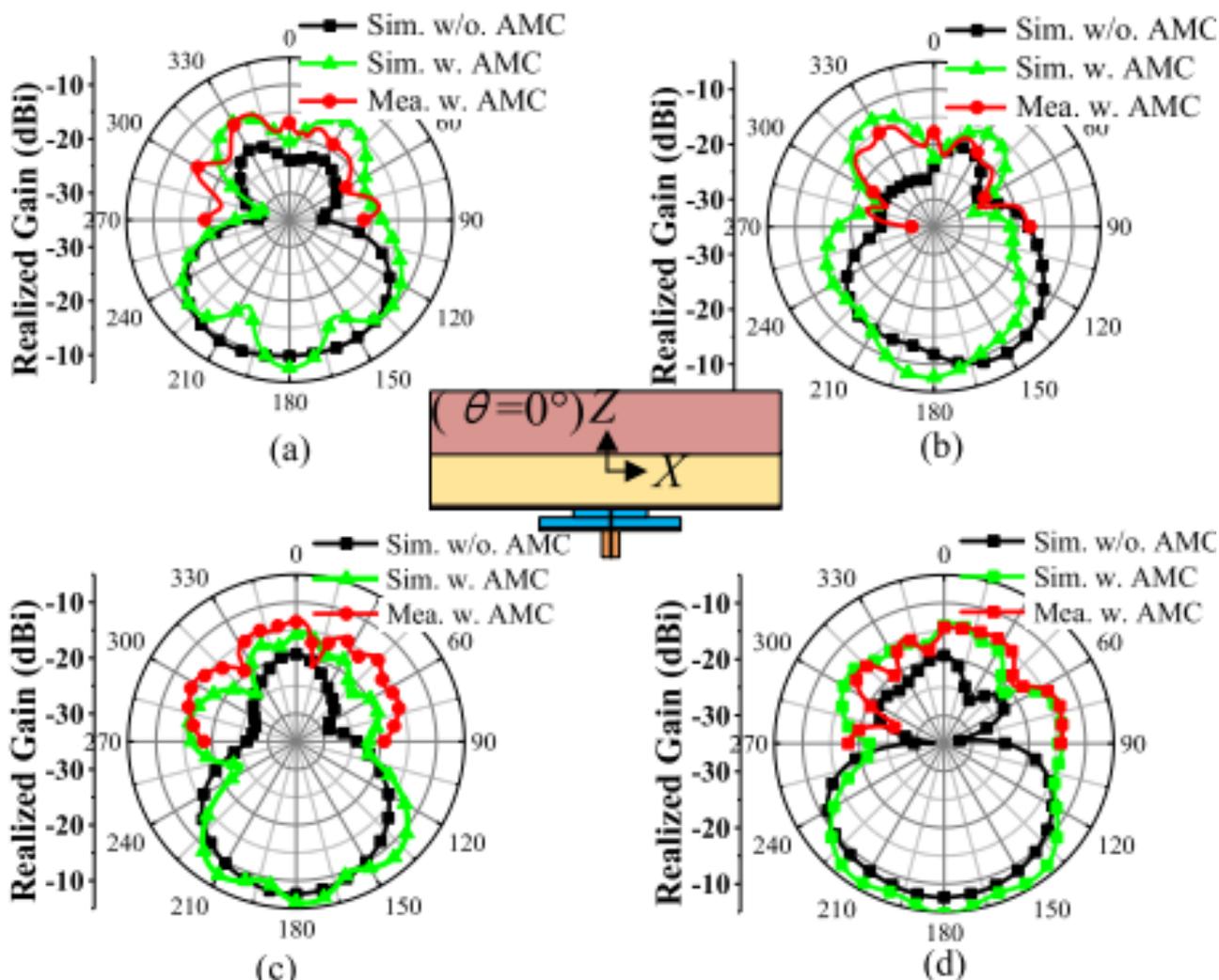


图7. 模拟和测量中的远场方向图。(a) 3 GHz,  $\phi=0^{\circ}$ 。(b) 3 GHz,  $\phi=90^{\circ}$ 。(c) 4 GHz,  $\phi=0^{\circ}$ 。(d) 4 GHz,  $\phi=90^{\circ}$ 。

## D. SAR评估

为了验证其在体应用的潜力，对所提出天线的比吸收率（SAR）进行了评估。根据联邦通信委员会（FCC）标准，当平均到10克实际组织时，SAR水平被规定低于1.6瓦特每千克。在输入功率为0.1瓦特的情况下，3 GHz和4

GHz时的峰值平均SAR值分别为0.97瓦特每千克和0.51瓦特每千克。这两个值都远低于FCC的要求。

## IV. 结论

在这封信中，提出了一种基于柔性宽带共面（CP）微带（MS）的天线，用于植入式胶囊的生物医学遥测。该天线由一个交叉偶极子、一个AMC平面和一个馈电结构组成。一个环形馈电路包含这四个天线元素，并产生共面辐射。该天线使用柔性材料制成，导电部分由导电纺织品构成，并嵌入到聚二甲基硅氧烷（PDMS）基底中。该柔性天线的整体尺寸在3.5 GHz时为106毫米×106毫米×5毫米<sup>3</sup>（ $1.24\lambda \times 1.24\lambda \times 0.05\lambda$ ），具有90%的阻抗带宽（从2.25 GHz到6 GHz，3分贝（dB）的相对带宽为47.4%（从2.9 GHz到4.7 GHz）。朝向身体的最大辐射增益为-10.5 dBi。从表I也可以看出，当与最近的最先进技术设计相比时，所提出的天线在性能上提供了独特的创新和改进。

## 参考文献

- [1] H. M. E. Misilmani, T. Naous, S. K. A. Khatib, 和 K. Y. 卡巴兰，《使用微波成像检测乳腺癌的天线设计调查》，IEEE Access，第8卷，第102570-102594页，2020年。
- [2] M. 萨尔斯托尼埃米，A. 塔帕鲁松桑格姆，J. 维斯安蒙科尔，M. 哈姆莱内，和 J. 伊纳提，《使用解剖学上真实的胃肠模拟模型全面分析无线胶囊内窥镜无线电通道特性》，IEEE Access，第11卷，第35649-35669页，2023年。
- [3] M. 法拉哈尼，M. 阿克巴里，M. 内迪尔，A.-R. 赛巴克，和 T. A. 德尼迪，《毫米波双左/右旋圆极化波束成形网络》，IEEE 天线与传播交易，第68卷，第8期，第6118-6127页，2020年8月。
- [4] A. 阿尔塔夫，Y. 杨，K.-Y. 李，和 K. C. 黄，《圆极化蜘蛛分形介质谐振器天线》，IEEE 天线与无线传播快报，第14卷，第1806-1809页，2015年。
- [5] H. 杨，X. 刘，Y. 范，和 L. 熊，《具有双圆极化的双频段纺织天线，采用偏振旋转自动模式控制进行体外通信》，IEEE 天线与传播交易，第70卷，第6期，第4189-4199页，2022年6月。
- [6] 张志，程宇，罗宏，和陈峰，《低剖面宽带圆极化超表面天线，特征模式分析与模式抑制》，IEEE 天线与无线传播快报，第22卷，第4期，第898-902页，2023年4月。
- [7] 张阳，张阳，黄凯，刘世军，张新宇，和刘强辉，《基于双环槽馈电结构具有线性和圆极化的可重构贴片天线》，IEEE 天线与传播交易，第70卷，第12期，第11389-11400页，2022年12月。
- [8] 巴拉米·H，米尔博佐里吉·S·A，拉什·L·A，和博伊德·B（注：此处原文明显截断，缺少作者姓名和标题，因此无法提供完整翻译。）戈斯兰，《神经记录系统的生物通道建模与植入式UWB天线设计》，IEEE生物医学工程学报，第62卷，第1期，第88-98页，2015年1月。
- [9] D.O. 罗德里格斯-杜阿尔特，J.A.T. 瓦斯奎兹，R. 斯卡帕奇，L. 克罗科，F. 维皮亚纳，《用于微波脑成像系统的砖形天线模块》，IEEE 天线与传播快报，第19卷，第12期，第2057-2061页，2020年12月。

- [10] J.布劳尔特和A.基奥蒂,《生物匹配喇叭:一种新型的1-9 GHz植入式天线,用于低损耗生物医学遥测》,IEEE天线与传播学报,第67卷,第8期,第5054-5062页,2019年8月。
- [11] H.黄, W.林, L.休伊塔玛, E.阿诺德,《多极化可重构天线,用于无线生物医学系统》,IEEE生物医学电路与系统学报,第11卷,第3期,第652-660页,2017年6月。
- [12] T.肖, G.萨曼塔, D.米特拉,《使用圆极化天线的植入式医疗设备的高效无线电力传输系统》,IEEE天线与传播学报,第69卷,第7期,第4109-4122页,2021年7月。
- [13] 张凯, S.J.索, 严森,《基于超表面的紧凑双频段织物天线设计》,IEEE生物医学电路与系统学报,第16卷,第2期,第211-221页,2022年4月。
- [14] 张凯, S.J.索, 严森,《可穿戴天线综述——无线身体区域网络中的基于超材料的天线》,材料,第14卷,第1期,第1-20页,2021年1月。
- [15] S.苏丹·K, H.H.阿卜杜拉, E.A.阿卜杜拉, H.S.艾尔-亨纳维,《使用CMA的基于超表面的双极化MIMO天线,用于5G智能手机》,IEEE Access,第8卷,第37250-37264页,2020年。
- [16] 严森, G.A.E. 范登波斯,《基于超材料结构的辐射方向可重构的可穿戴天线》,IEEE天线与无线传播快报,第15卷,第1715-1718页,2016年。
- 乔希等人,《具有AMC支撑的双频双模纺织天线用于GPS和WBAN/WLAN定位》,IEEE Access,第8卷,第89468-89478页,2020年。
- 乔胡、纳迪尔、马布罗克和拉马希,《一种具有AMC反射器的可穿戴圆极化天线用于WBAN通信》,IEEE Access,第10卷,第12838-12852页,2022年。
- 戴伊、库马尔、阿里夫和安古埃拉,《弹性纺织基底用于设计医疗和物联网应用的紧凑型低剖面基于AMC的天线》,IEEE物联网杂志,第10卷,第6期,第4952-4969页,2023年3月。
- 普雷沃多尔吉、库斯和福木佐科,《具有菱形人造地面结构的宽带圆极化微带贴片天线》,IEEE开放天线与传播杂志,第3卷,第304-313页,2022年。
- 徐、王、梁、齐和高,《结合超表面和强空间填充超谐振器的紧凑型圆极化天线》,IEEE天线与传播学报,第61卷,第7期,第3442-3450页,2013年7月。
- 张、范登波斯和杨,《基于超表面的紧凑型可穿戴天线的新颖设计方法》,IEEE生物医学电路与系统学报,第14卷,第4期,第918-927页,2020年8月。
- 西蒙兰吉里、基奥尔图提和埃塞莱,《基于PDMS嵌入导电织物的UWB可穿戴天线与完整接地平面》,IEEE天线与无线传播快报,第17卷,第3期,第493-496页,2018年3月。

范登波斯

西蒙兰基尔, 杨阳, 马特科维茨·L, 埃斯雷尔·K·P, “一种在聚二甲基硅氧烷基底上的双频双模纺织天线, 用于以身体为中心的通信”, IEEE天线无线传播快报, 第16卷, 第677-680页, 2017年。

西蒙兰基尔·R·B·V·B, 杨阳, 埃斯雷尔·K·P, 泽布·B·A, “一种使用嵌入聚合物的导电织物实现坚固灵活的电子可调天线的方法”, IEEE天线与传播交易, 第66卷, 第1期, 第50-58页, 2018年1月。

迪梅奥等, “用于高达50 GHz的乳腺幻影的仿生材料”, 物理医学生物学, 第64卷, 第5期, 2019年2月, 文章编号055006。

SPEAG, “DAK介电评估套件”, 2023。[在线]。可用网址：<https://speag.swiss/products/dak/overview/>

尚杰和余阳, “一种用于生物医学嵌入式导电织物的超宽带胶囊天线”, IEEE天线与传播交易, 第66卷, 第2548-2551页, 2019年12月。