

应用于无线体域网的流体可重构穿戴天线

姬宇航, 任 王, 龙明月

浙江工商大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2025年4月24日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月28日

摘 要

本文提出了一种应用于无线体域网的流体可重构穿戴天线。该天线以腰带配饰作为载体满足了佩戴舒适和隐蔽的需求, 采取SMA耦合馈电拓展阻抗带宽解决以阻抗带宽与轴比带宽不匹配的问题。结合特征模分析通过二甲基硅油和乙酸乙酯这两种液体介质合理的填充替代传统切角微扰法引入的不对称结构, 实现一对等幅度正交同相位的简并模分离成等幅度正交且相位相差 90° 的特征模以实现圆极化特性($AR < 3$ dB), 并且通过填充方式的切换实现轴比为线极化($AR = 40$ dB)与圆极化($AR < 3$ dB)的可重构。在圆极化的前提条件下, 通过改变两种液体的填充比例实现谐振频率的可重构, 轴比带宽的频率调谐范围为2.22 GHz~2.53 GHz。每一个轴比带宽都被阻抗带宽完全覆盖且轴比带宽内法向增益最高可达6 dB以上, 规避了传统固体天线采用PIN二极管、变容二极管、MEMS实现可重构所引起额外的功率损耗等弊端。

关键词

3D打印, 特征模分析, 液体天线, 极化频率混合可重构, 穿戴天线

Fluid-Reconfigurable Wearable Antenna for Wireless Body Area Networks

Yuhang Ji, Wang Ren, Mingyue Long

School of Information and Electronic Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou Zhejiang

Received: Apr. 24th, 2025; accepted: May 21st, 2025; published: May 28th, 2025

Abstract

In this paper, a fluid reconfigurable wearable antenna for wireless body area network is proposed. The antenna uses a belt accessory as a carrier to meet the needs of wearing comfort and concealment, and adopts SMA coupling feed to expand the impedance bandwidth to solve the problem of mismatch between the impedance bandwidth and the axial bandwidth. Combined with the eigenmode analysis, the asymmetric structure introduced by the traditional tangential perturbation method is

文章引用: 姬宇航, 任王, 龙明月. 应用于无线体域网的流体可重构穿戴天线[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(3): 570-581. DOI: 10.12677/jsta.2025.133056

replaced by the reasonable filling of two liquid media, dimethyl silicone oil and ethyl acetate, to realize the separation of a pair of equal-amplitude orthogonal in-phase simplex modes into equal-amplitude orthogonal eigenmodes with a difference in phase of 90° to achieve the circularly-polarized characteristic ($AR < 3$ dB), and the switching of the filling method to achieve the axial ratio of the linearly-polarized ($AR = 40$ dB). With circular polarization ($AR < 3$ dB) can be reconstructed. Under the precondition of circular polarization, the reconfigurable resonance frequency is realized by changing the filling ratio of the two liquids, and the frequency tuning range of the axial bandwidth is from 2.22 GHz to 2.53 GHz. Each axial bandwidth is completely covered by the impedance bandwidth and the normal gain within the axial bandwidth can reach up to more than 6 dB, which can avoid the extra power caused by the traditional solid state antenna adopting PIN diode, varactor diode, and MEMS to realize the reconfigurable resonance.

Keywords

3D Printing, Eigenmode Analysis, Liquid Antennas, Polarized Frequency Hybrid Reconfigurable, Wearable Antennas

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着无线通信技术的不断发展,以人体为中心由植入人体内或穿戴在人体表面的传感器和便携式设备等构建的无线体域网日益成为学者研究的重点之一[1]。作为无线体域网中实现通信的重要组成部分,包括智能手环、智能手表、VR眼镜、谷歌眼镜、蓝牙耳机等在内的穿戴设备逐渐普及,已广泛应用在医疗、军事、日常生活等领域中[2]。要使可穿戴设备能够在无线体域网中实现信息传输,天线便是必不可少的一环。作为可穿戴设备的核心元件之一,天线的性能很大程度上决定了设备的优劣,因此对可穿戴天线的研究也随之兴起[3]。

由于无线体域网特殊应用场景,可穿戴天线需要具备以下特点:在非性能指标上,可穿戴天线必须具备轻巧便携、尺寸小、低剖面、佩戴舒适、柔性可共形、生物相容性、易于集成、隐蔽性好、外形美观等特点[4]。在性能指标上,可穿戴更要具有良好的可重构能力[5]。首先,无线体域网可以分为体外通信、体表通信和体内通信三种模式[6],考虑到低频电磁波衍射能力较强、穿透能力强、全向性较好,高频电磁波衍射能力弱、穿透性弱、定向性较好,通常体内通信是低频段,体表通信是中频段,体外通信是高频段,不同的通信模式频段不同,穿戴设备频率可重构能够在多个频段之间切换,满足用户不同通信模式的需求,支持多频段通信提高了设备的通用性和适应性。其次,电磁干扰是一个常见的问题,频率可重构穿戴天线可以根据周围的电磁环境动态选择合适频率,避开干扰频段。再次,人体组织是一种复杂的电磁系统,不同的人体组织具有不同的电磁特性对天线性能会产生不同的影响导致谐振频率产生不同程度的偏移,频率可重构天线可以根据人体的差异性灵活调整天线的频率以抵消人体组织对天线产生的频偏。与此同时,不同的通信场景对极化的要求也不同。总之,良好的频率可重构和极化可重构对于可穿戴天线来说十分的必要[6][7]。

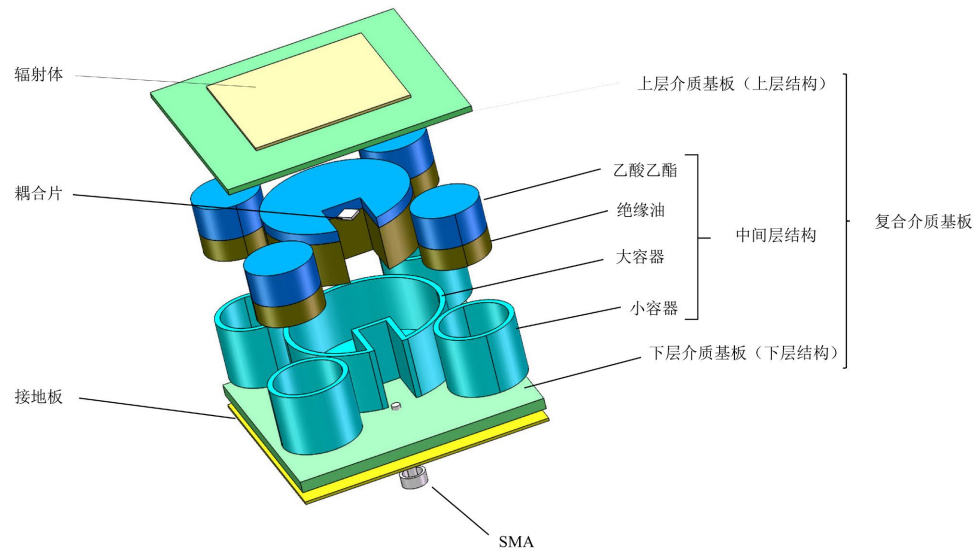
通过加载 PIN 二极管、微机电系统开关、变容二极管等方式实现频率极化可重构是目前最常用的技术手段。虽然上述技术已经发展成熟,但仍然存在以下几个限制:1) 天线上加载电子器件均需要额外的控制电路,增加了天线的设计难度,同时会引入损耗影响天线的辐射性能,而且无法在高功率状态下长

时间稳定工作；2) 射频“开关”仅能实现离散状态的可重构，无法实现连续调谐特性，限制了天线的应用场景[8]-[10]。

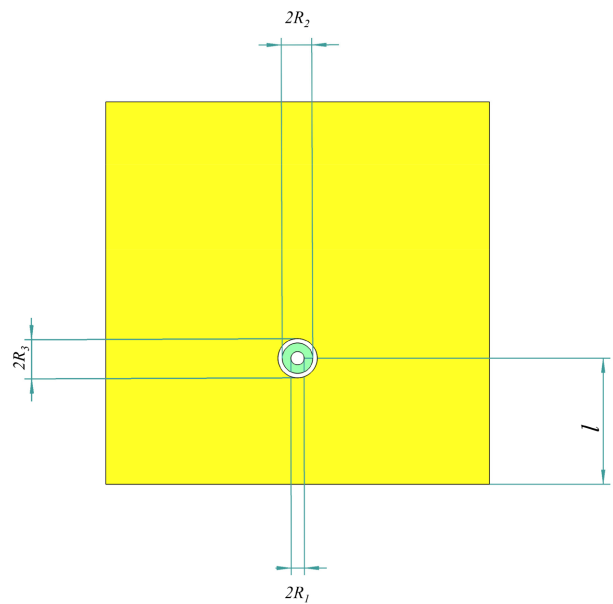
本文提供了一种应用于无线体域网的流体可重构[11]-[21]穿戴天线采用流体天线[20] [22]的形式和液体频率极化可重构的方式，旨在解决目前应用于无线体域网的穿戴天线通过加载 PIN 二极管、微机电系统开关、变容二极管等方式实现频率极化可重构过程中所带来的能量损耗。

2. 模型构建

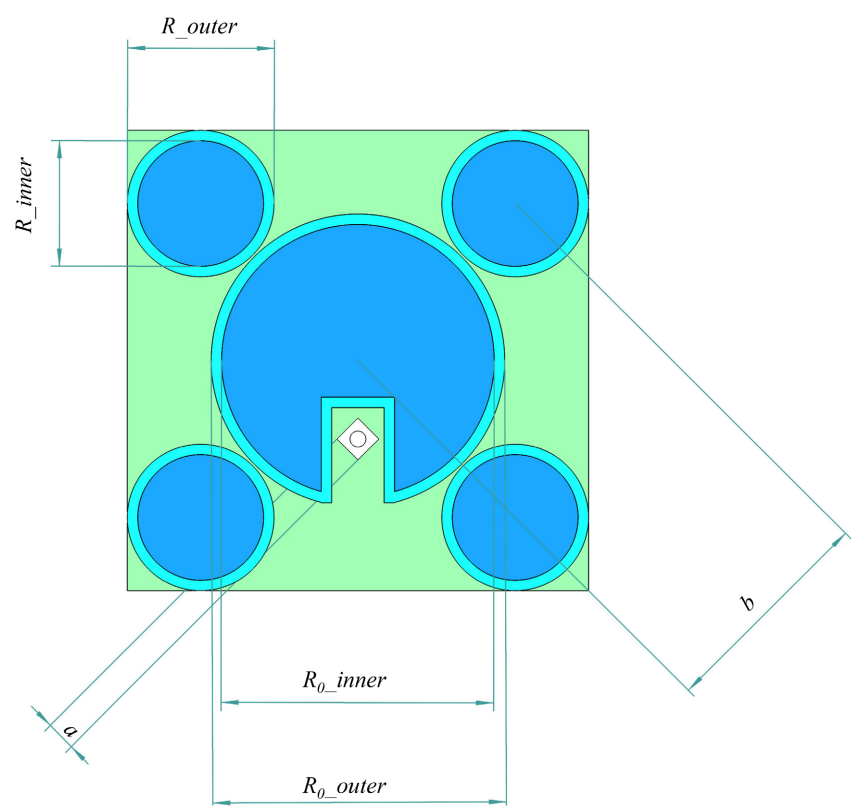
本文提出的应用于无线体域网的流体可重构穿戴天线是一种矩形微带贴片天线，其结构如图 1 所示，包括天线辐射体、接地板、同轴连接器和嵌入其中的复合结构介质基板，将腰带配饰作为载体以寄生形式[23] [24]内嵌在腰带这一配饰前端的卡扣上面以满足穿戴天线佩戴舒适和隐蔽的需求。



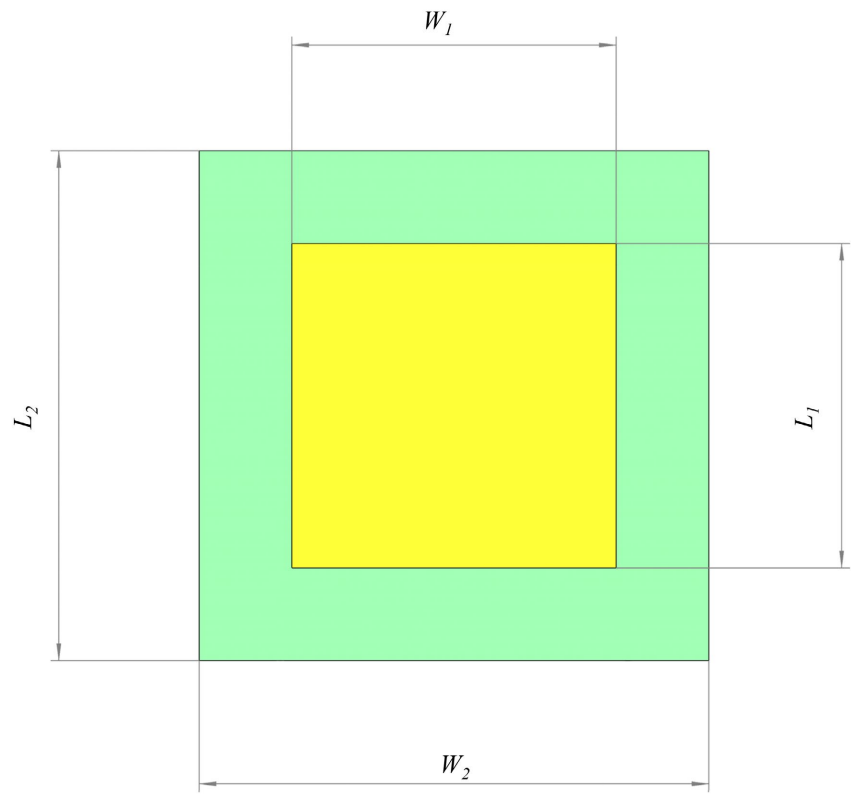
(a) 整体爆炸视图



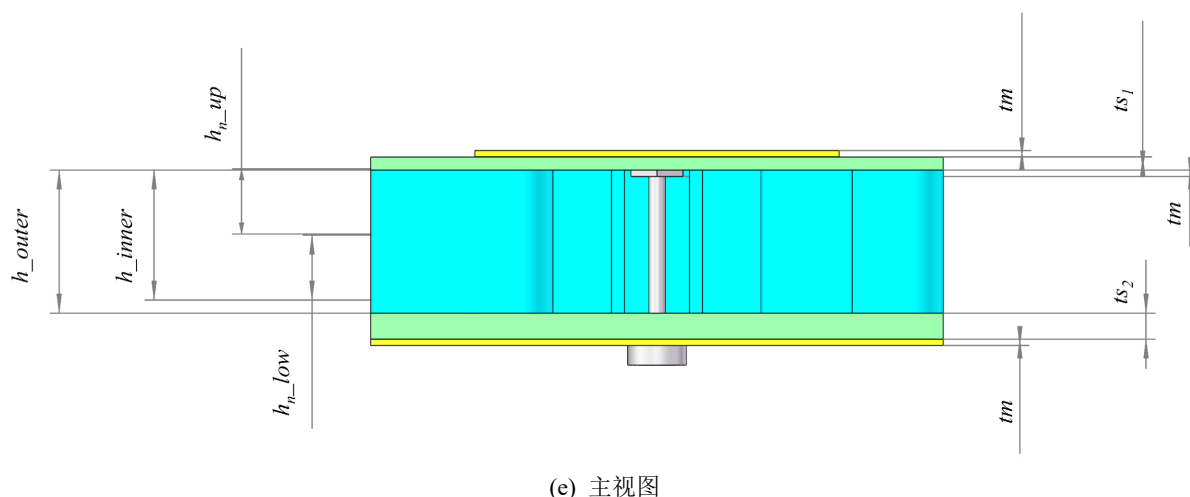
(b) 仰视图



(c) 剖面图



(d) 俯视图



(c) 主视图

Figure 1. Antenna structure**图 1.** 天线结构图

天线辐射体是一块分布在介质基板上表面正中心位置且经过镀锡抗氧化处理尺寸为 $W_1 * L_1 * t_m$ 的矩形紫色铜制贴片。

接地板是一块完全覆盖在介质基板下层表面且经过 OSP 抗氧化处理尺寸为 $W_2 * L_2 * t_m$ 的白色铜制贴片。

介质基板是一种采用固体液体相结合、串并混联方式的三层复合结构，顶层结构和底层结构采用相对介电常数为 4.3、相对磁导率为 1 的 FR4 材质且尺寸分别为 $W_2 * L_2 * t_{s1}$ 和 $W_2 * L_2 * t_{s2}$ 的矩形固体介质基板，中间层结构由 5 个基于相对介电常数为 4、相对磁导率为 1 的透明光敏树脂材质和 3D 打印技术增材制造的圆柱形容器以及盛放在容器里面的流体介质组成，其中 1 个外部半径为 R_{0_outer} ，外部高度为 h_{outer} ，内部半径为 R_{0_inner} ，内部高度为 h_{inner} 的大型圆柱容器位于正中心位置，经过局部切割处理以方便放置同轴探针，其他 4 个外部半径为 R_{outer} ，外部高度为 h_{outer} ，内部半径为 R_{inner} ，内部高度为 h_{inner} 的小型圆柱容器位于四个拐角处，其四个圆心位于方形介质基板对角线上且距离中心位置 b 。

由于可穿戴天线的特殊应用场景，穿戴天线穿戴过程必然伴随着一定程度的运动特性。流体天线中流体介质在穿戴和运动过程中所表现出来的流动性势必会导致穿戴性能不稳定。流体介质采用相对介电常数为 2.7、相对磁导率为 1 的二甲基硅油绝缘油(变压器油)和相对介电常数为 6、相对磁导率为 1 的乙酸乙酯这两种液体，密度较大沉在下方的绝缘油和密度较小浮在上面的乙酸乙酯存在明显分层现象，利用液体不相溶分层原理以克服穿戴过程中流体天线的流动性所带来的不稳定性能。

为了拓展阻抗带宽以解决阻抗带宽与轴比带宽不匹配的问题，天线采取同轴连接器底面间接耦合馈电。所述同轴连接器外导体与接地板相连充当接地线，其外(半)径为 R_3 、内(半)径为 R_2 ，同轴探针半径为 R_1 ，穿过介质基板与上层介质基板底面附着的边长为 a 的方形金属铜制耦合片相连充当信号线实现对距离辐射贴片中心水平距离为 $L/2 - 1$ 处的间接耦合激励。

如图 2 所示，为了满足可穿戴天线在佩戴时的隐蔽性和舒适性需求，提出一种以腰带配饰为载体的创新设计方案——将天线以寄生形式内嵌于腰带前端的功能性卡扣结构。该设计通过利用卡扣本身的复合材料作为天线的支撑结构，将天线的馈电结构以及与之相连的射频电路模块集成并隐藏于腰带夹层中，进一步减少对外部结构的干扰。这种寄生式集成方案既能避免传统外置天线的突兀感，又能提升穿戴舒适度与隐蔽性，适用于军事、医疗监测或智能服装等对隐蔽通信要求较高的场景。

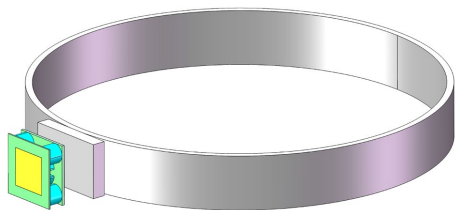


Figure 2. Antenna integration and wearing
图 2. 天线的集成与佩戴

3. 参数分析

在参数分析之前，先深入分析液态选择并详细解释选择二甲基硅油和乙酸乙酯这两种流体介质的依据。液态材料有很多，但是像乙醇以及碳酸丙烯酯这种易燃易爆或者易挥发液体，很难给天线带来稳定的性能可能会引发电气故障。甚至会存在安全风险，如果在电气设备附近发生泄漏，遇到火源可能引发火灾或爆炸。因此，一般只有三己基十四烷基氯化磷、1-乙基-3-甲基二氰胺等离子液体，纯水盐水(海水)等水基溶液，乙酸乙酯、丙酮、乙腈等有机溶剂适合做天线介质的液体材料。本文打算在乙酸乙酯、丙酮、乙腈，绝缘油、苯、二恶烷、水中做出选择。苯、二恶烷虽然都是低损耗的液体材料，但是毒性阻碍了它们在天线中的应用，为了考虑实验安全，本文采用无毒液体作为天线的液体材料。鉴于穿戴天线特殊的应用场景，在穿戴和运动的过程中，液体天线必须克服液体的流动性给天线性能上带来的影响，根据不相容分层原理，当密度不同的互不相溶的液体倒入一个容器时，它们会根据密度大小自然分层。密度大的液体会位于底层，密度小的液体则会浮在上层，最终会出现明显的分界面，通过采用不相容液体填满整个容器可以克服液体流动性带来的不稳定。乙酸乙酯和绝缘油这两种不相容会分层的液体是本文的首选。乙酸乙酯的密度一般在 0.900 g/cm^3 左右。而绝缘油分为多种类型，比如矿物油绝缘油的密度一般为 0.880 kg/m^3 左右，硅油绝缘油的密度则为 0.965 kg/m^3 左右。所以通常情况下二甲基硅油绝缘油的密度比乙酸乙酯大，所以当乙酸乙酯和绝缘油两者不相容的液体混合在一起时，密度小的乙酸乙酯就会浮在上层，密度大的绝缘油则会沉在下层。

如图 3 所示，为了使得实验过程更加清晰明了，将中心大容器命名为 Container 0，四周的小容器按照坐标象限的顺序分别命名为 Container 1、2、3、4。

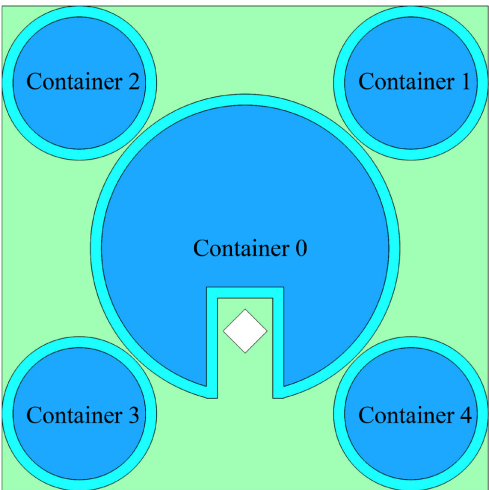


Figure 3. Container number
图 3. 容器编号示意图

h_{n_low} 和 h_{n_up} 表示 Container n 中下层绝缘油和上层乙酸乙酯的高度, 由于两种尺寸的圆柱形容器内部高度都是 10 mm, 也即 $h_{n_up} + h_{n_low} = 10$ mm。本着变量简洁的原则, 接下来的实验只以下层二甲硅油绝缘油的高度 h_{n_low} 为参考变量来进行参数分析。

本文在两种流体介质充满容器的前提下, 通过两种流体介质的填充比例的改变来替代传统单一流体介质尺寸的改变实现穿戴天线的可重构特性。

液体频率可重构的本质就是通过改变容器中二甲基硅油绝缘油(变压器油)和乙酸乙酯这两种流体介质的填充比例从而改变复合介质基板等效介电常数实现频率的可重构。

天线谐振频率与介电常数、尺寸之间的关系有密切的关系, 如公式(1)~(3)所示, 对于辐射贴片尺寸一定的情况下, 天线的谐振频率与介质基板的介电常数成反比。

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0.824t_s \left[\frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{t_s + 0.264} \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{t_s + 0.8} \right)} \right] \quad (1)$$

$$W = \frac{c}{2f\sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (2)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{t_s}{W}}} \right] \quad (3)$$

图 4 展示的是不相容的混合物串联和并联两种混合方式, 往往采用公式(4)(5)展示的串并联等效公式来求解混合物的等效介电常数。

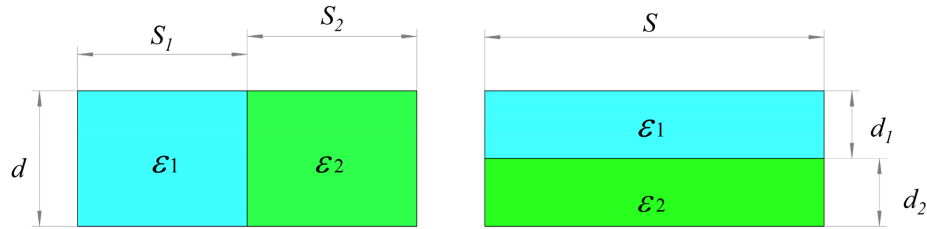


Figure 4. Mixture series-parallel model

图 4. 混合物串并联模型

$$\epsilon_{r\text{串联等效}} = \left(\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} \right)^{-1} d = \left(\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} \right)^{-1} (d_1 + d_2) \quad (4)$$

$$\epsilon_{r\text{并联等效}} = \frac{S_1}{S} \epsilon_1 + \frac{S_2}{S} \epsilon_2 = \frac{\epsilon_1 S_1 + \epsilon_2 S_2}{S_1 + S_2} \quad (5)$$

本文天线每一个容器中乙酸乙酯和绝缘油这两种液体为串联关系, 将乙酸乙酯和绝缘油的介电常数以及高度代入公式(4)可得公式(6)。

$$\epsilon_{\text{container}} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 (h_{n_up} + h_{n_low})}{\epsilon_1 h_{n_low} + \epsilon_2 h_{n_up}} = \frac{10 \epsilon_1 \epsilon_2}{10 \epsilon_2 + h_{n_low} (\epsilon_1 - \epsilon_2)} \quad (6)$$

式中, $\varepsilon_{\text{container}}$ 为每个圆柱容器的液体串联混合等效介电常数。

ε_1 为乙酸乙酯相对介电常数;

ε_2 为绝缘油相对介电常数;

h_{n_up} 为乙酸乙酯高度;

h_{n_low} 为绝缘油高度。

由于 $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$, 所以容器的等效介电常数与绝缘油的高度成反比, 也就是说随着绝缘油的高度升高, 容器的等效介电常数将变小, 复合介质基板的等效介电常数也会变小, 天线的谐振频率将会升高。

如图 5 所示, 在 Container 0 以及周围的 Container 1、2、3、4 全部填充的前提下, 随着 h_{n_low} ($n = 0, 1, 2, 3, 4$) 高度不断升高, 并保持五个容器两种液体的高度时刻保持一致, 天线的谐振频率也不断的向着高频方向移动。

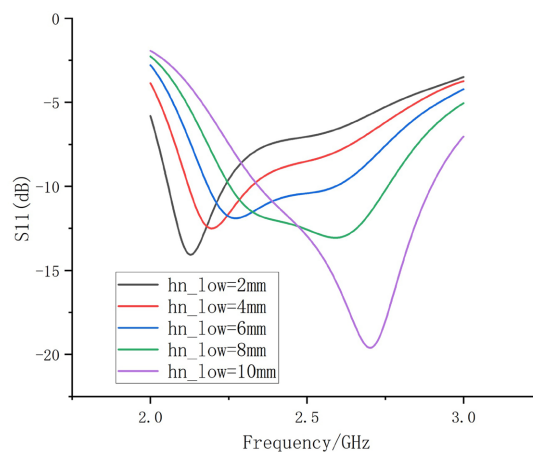


Figure 5. Effect of liquid ratio on resonant frequency

图 5. 液体比例对谐振频率的影响

图 6 展示的是 Container 0 四周的 Container 1、3 填充而 Container 2、4 不填充的前提下通过不断调整 Container 1、3 中两种液体的混合比例时天线的轴比变化情况, 由图可知, Container 1、3 中绝缘油和乙酸乙酯 4:6 填充的情况下, 圆极化带宽最大, 圆极化特性最好。

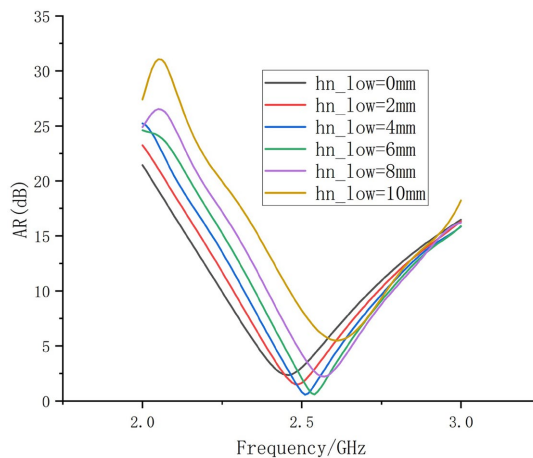


Figure 6. Effect of liquid filling on axial ratio

图 6. 液体填充方式对轴比的影响

使用 CST 电磁仿真软件进行参数优化得到最佳的天线结构尺寸，如表 1 所示。

Table 1. Antenna structure dimensions
表 1. 天线结构尺寸

参数	尺寸	参数	尺寸	参数	尺寸
L_1	28 mm	R_{0_inner}	13 mm	R_3	1.785 mm
W_1	28 mm	R_{0_outer}	14 mm	d	4 mm
t_m	0.035 mm	R_{inner}	6 mm	t_{s1}	1 mm
L_2	44 mm	R_{outer}	7 mm	t_{s2}	2 mm
W_2	44 mm	a	$2\sqrt{2}$ mm	R_1	0.625 mm
h_{inner}	10 mm	$L_2/2-l$	6.5 mm	R_2	1.44 mm
h_{outer}	11 mm	b	$15\sqrt{2}$ mm		
h_{n_up}	-	h_{n_low}	-		

4. 性能测试

针对上述介绍的应用于无线体域网的流体可重构穿戴天线,使用 CST 电磁仿真软件进行了仿真测试,其仿真结果如下。

图 7 展示的是极化可重构过程轴比 - 频率曲线对比效果,当 Container 0 的绝缘油和乙酸乙酯按照 4:6 比例填充的前提条件下,当 Container 1、Container 2、Container 3、Container 4 全部填充并且绝缘油和乙酸乙酯也按照 4:6 的比例填充时,轴比为 40 dB 即表现为线极化特性,当 Container 1 与 Container 3 的绝缘油和乙酸乙酯按照 4:6 的比例填充而 Container 2、Container 4 不填充任何液体的时候,轴比为在 2.4 GHz 频率附近的轴比小于 3 dB 表现为圆极化特性。这表明流体介质的合理填充方式可以代替切角引入不对称结构分离简并模从而实现圆极化特性,并且通过填充方式的改变可以灵活的实现线极化与圆极化的极化可重构。

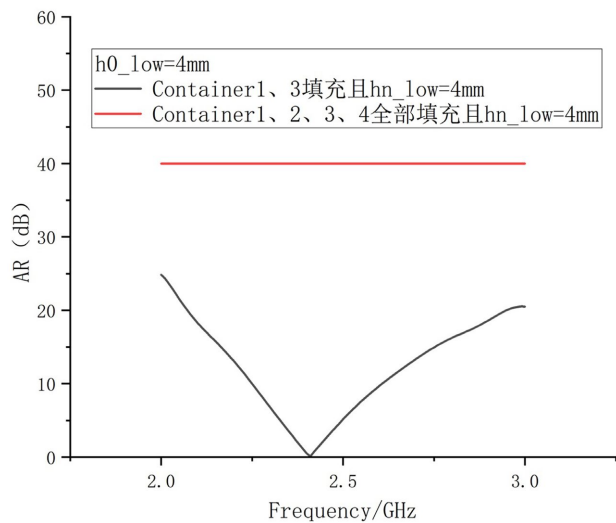


Figure 7. Axial ratio-frequency curve of the reconfigurable polarization process
图 7. 极化可重构过程轴比 - 频率曲线

图 8 展示的是频率可重构过程轴比 - 频率曲线图。在 Container 1、Container 3 的绝缘油与乙酸乙酯按照 4:6 比例填充而 Container 2、Container 4 不填充任何液体的前提条件下进行的。当 Container 0 不断的改变绝缘油和乙酸乙酯的填充比例时，圆极化带宽和谐振频率发生频移。这表明在圆极化的条件下改变(Container 1、2、3、4 填充方式不变的情况下)，改变 Container 0 的填充比例可以实现圆极化带宽形式下的频率可重构，并且调谐范围为 2.22 GHz~2.53 GHz。

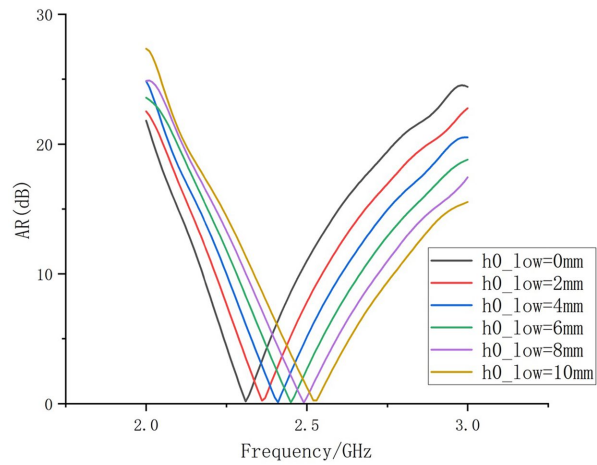


Figure 8. Axial ratio-frequency curve of frequency reconfigurable process
图 8. 频率可重构过程轴比 - 频率曲线

图 9 展示的是频率可重构过程输入回波损耗 - 频率曲线图。同样在 Container 1、Container 3 的绝缘油与乙酸乙酯按照 4: 6 比例填充而 Container 2、Container 4 不填充任何液体的前提条件下，当 Container 0 不断的改变绝缘油和乙酸乙酯的填充比例时，阻抗带宽和谐振频率发生频移。这表明在圆极化的条件下改变(Container 1、2、3、4 填充方式不变的情况下)，改变 Container 0 的填充比例可以实现阻抗带宽形式下的频率可重构。这表明从圆极化带宽和阻抗带宽两个方面来观察，穿戴天线都具有明显的频率可重构特性，而且由于本发明采用的同轴间接耦合馈电，阻抗带宽得以拓展到覆盖整个圆极化带宽，这表明在频率可重构的过程中具有良好的阻抗匹配和圆极化特性。

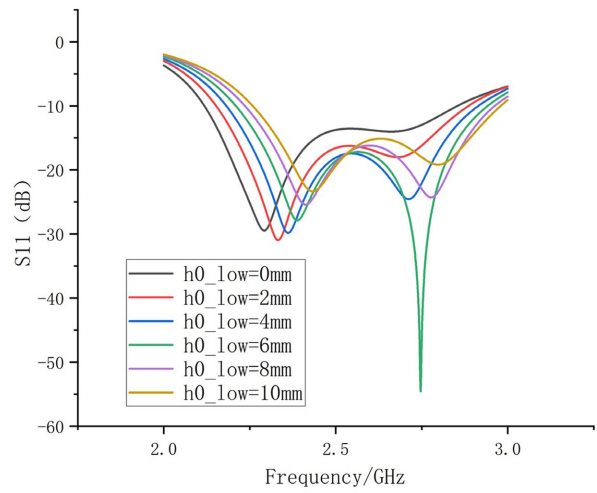


Figure 9. S11-frequency curve of frequency reconfigurability
图 9. 频率可重构过程 S11-频率曲线

图 10 和图 11 展示的是频率可重构过程中的增益 - 频率曲线图和天线远场方向图, 在频率可重构过程中, 每一个状态下的圆极化带宽内的增益都在 6 dB 以上, 这说明频率可重构过程天线的方向性良好。

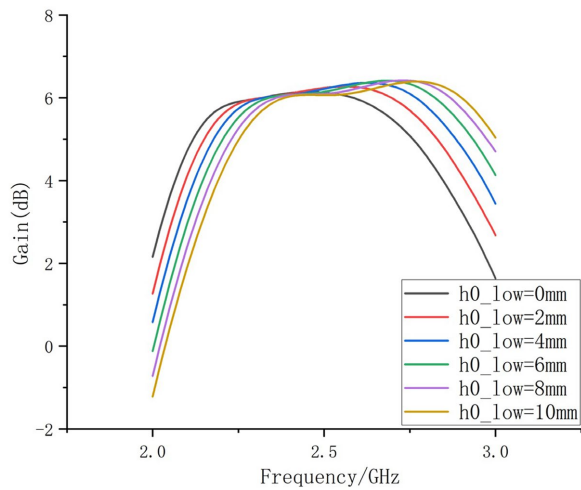


Figure 10. Gain-frequency curve of frequency reconfigurable process
图 10. 频率可重构过程增益 - 频率曲线

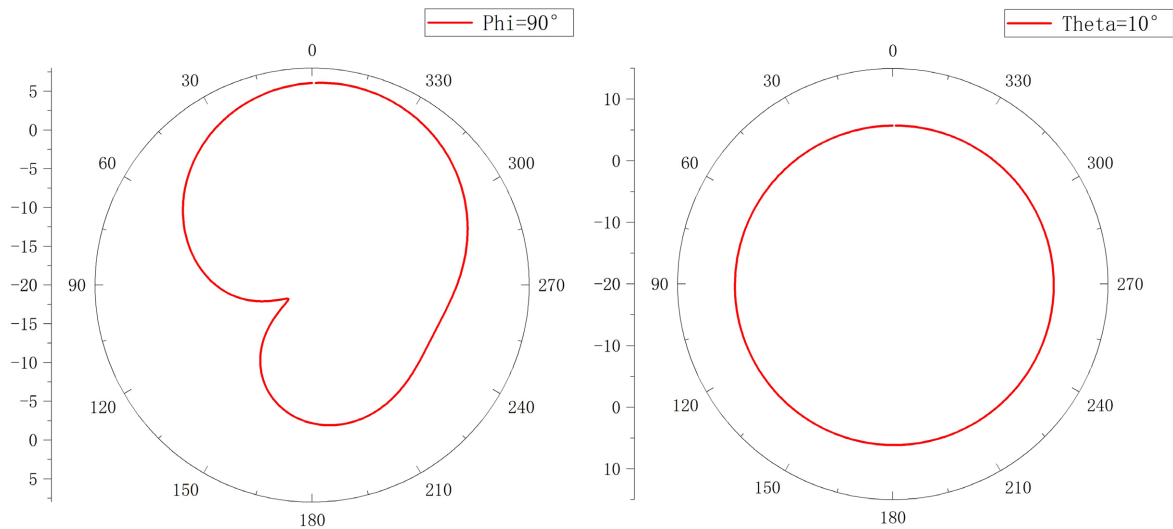


Figure 11. Far-field pattern of 2.4 GHz
图 11. 2.4 GHz 远场方向图

综上可以得出结论, 本发明实施例通过改变液体的填充方式和填充比例可以在方向性良好与阻抗匹配良好的情况下实现极化与频率的混合可重构特性。

穿戴设备频率与极化混合可重构特性能够在多个频段之间以及多种极化方式下切换, 可以根据周围的电磁环境动态选择合适频率避开干扰频段, 可以根据人体组织介电常数等电磁特性的差异性以及对谐振频率产生频偏程度的差异性灵活调整天线的频率以抵消人体组织这一复杂电磁系统对天线产生的频偏, 满足用户不同通信模式、不同应用场景以及不同通信环境下的需求, 提高了设备的通用性和适应性。

基金项目

2024 浙江省教育厅一般科研项目(项目编号: 3100JYN6524001G-0306)。

参考文献

- [1] 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(5): 78-86.
- [2] 耿文斐. 体表/体外双通信模式可穿戴天线研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [3] 吕嘉欣, 任宇辉, 罗文慧, 等. 双频双极化可穿戴天线[C]//中国电子学会. 2023 年全国天线年会论文集(中). 西安: 西北大学信息科学与技术学院, 2023: 3.
- [4] 文冉. 应用于无线体域网通信的可穿戴天线研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
- [5] 胡艳. 用于人体通信的可重构天线及 NFC 技术的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
- [6] 于卓顺. 方向图可重构可穿戴天线的研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [7] 王培杰. 应用于体域网的可穿戴天线系统设计[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.
- [8] 傅艺祥. 可重构水天线的设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [9] 郭芝芳, 储龙威. 基于液态水的频率可重构天线[J]. 无线通信技术, 2024, 33(1): 11-15.
- [10] 任祺. 可重构水天线的研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [11] 梁家军. 基于液态水加载的可重构天线[D]: [博士学位论文]. 深圳: 深圳大学, 2018.
- [12] 王英飞. 液体水天线研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [13] 范飞, 王诗言, 郑闻, 等. 一种频率可重构的倒 L 型纯水天线[C]//中国电子学会. 2021 年全国天线年会论文集. 南京: 南京师范大学, 2021: 4.
- [14] 范飞, 郑闻, 李银, 等. 一种频率可重构的圆极化纯水螺旋天线[C]//中国电子学会. 2022 年全国微波毫米波会议论文集(上册). 南京: 南京师范大学, 2022: 3.
- [15] 许欣, 任祺, 梁青云, 等. 一种极化可重构纯水螺旋阵列天线[C]//中国电子学会. 2021 年全国天线年会论文集. 北京: 军工保密资格审查认证中心, 2021: 4.
- [16] 刘萌瑶, 陈松旻, 赵梓彤, 等. 一种方向图可重构的混合液体天线[C]//中国电子学会. 2023 年全国天线年会论文集(中). 湖南: 湖南大学, 2023: 3.
- [17] 于杰, 张超, 徐剑姣, 等. 一种层叠液体介质谐振器天线[C]//中国电子学会. 2022 年全国微波毫米波会议论文集(下册). 湖南: 湖南大学, 2022: 3.
- [18] 王敏. 混合可重构水天线的研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [19] 范人贵, 褚庆昕. 方向图可重构的水单极子天线阵[C]//中国电子学会. 2015 年全国天线年会论文集(下册). 广州: 华南理工大学电子与信息学院, 2015: 4.
- [20] 李昊展. 基于液体材料的可重构天线设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 深圳: 深圳大学, 2022.
- [21] 谢书敏. 宽带液体天线的研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2022.
- [22] 朱佳佳. 基于无线通信的液体天线研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
- [23] 林成龙. 可穿戴天线和液体天线研究与应用[D]: [博士学位论文]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
- [24] 纪泽鑫. 用于移动健康监测的可穿戴配饰天线研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2023.