

基于人工表面等离激元的电调谐液位传感器

侯梓越 马梓睿 刘茂德 杨怡宁 李俊杰^{*} 唐亚南

成都工业学院 自动化与电气工程学院, 中国·四川 成都 611730

摘要: 本文提出了一种基于人工表面等离激元的电调谐柔性微波液位传感器, 该传感结构通过引入 PIN 二极管实现对分裂环谐振环结构 (split-ring resonator, SRR) 的电调谐功能, 使得 SRR 能够在不同偏置状态下被有效调控。仿真结果表明, 通过调节 PIN 二极管的偏置状态, 可改变局部电磁场分布。同时根据不同单元 SRR 对其检测区域中的液位感知后产生的谐振频率偏移, 可实现对液位的检测。该传感器基于介电常数敏感机制工作, 采用非接触式检测方式, 整体设计兼具柔性结构, 可为复杂工况下的液位监测提供一种参考。

关键词: 人工表面等离激元; 分裂谐振环; 液位测量; 微波检测

Design of an Electrically Controlled Liquid Level Sensor Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons

Hou Ziyue, Ma Zirui, Liu Maode, Yang Yining, Li Junjie^{*}, Tang Yanan

School of Automation and Electrical Engineering, Chengdu Technological University, China Sichuan Chengdu 611730

Abstract: This paper proposes an electrically tunable flexible microwave liquid level sensor based on spoof surface plasmon polaritons. By incorporating PIN diodes, the sensing structure enables electrical tuning of the split-ring resonator (SRR), allowing effective control over the SRR under different bias states. Simulation results demonstrate that adjusting the bias state of the PIN diodes can modify the local electromagnetic field distribution. Meanwhile, liquid level detection is achieved by monitoring the resonant frequency shift of individual SRR units in response to the liquid level within their detection zones. Operating on a dielectric constant-sensitive mechanism and employing a non-contact detection approach, the sensor features a flexible structure, providing a potential solution for liquid level monitoring in complex working environments.

Keywords: Spoof surface plasmon polaritons; Split-ring resonator; Liquid level measurement; Microwave detection

0 引言

液位测量作为现代工业的关键技术, 其精确性与稳定性深刻影响化工、能源及环保等多个领域。在化工过程中, 液位监测直接关系反应容器安全与质量控制; 在能源领域, 它是资源调配与库存管理的重要依据; 在环保方面, 则为水文监测与洪涝预警提供关键支撑。尤其在航空航天领域, 飞机燃油系统的精准液位数据不仅是航程规划与油耗优化的基础, 更是保障飞行安全和供油稳定的关键。在飞行姿态与速度频繁变化的复杂工况下, 具备柔性特征的稳定液位监测能有效预防供油异常, 确保动力系统持续可靠运行, 为飞行安全与任务成功提供重要保障。因此, 发展高性能液位测量技术对推动工业进步与保障关键系统运行具有深远意义。

目前, 液位传感器根据检测方式主要分为非接触式与接触式两类。非接触式中, 雷达液位计通过检测液面反射回波确定液位, 其操作效率与校准精度虽得到了改进, 但仍受水蒸气和容器壁回波影响^[1,2]。超声波液位计通过接收

声脉冲反馈实现液面定位, 孙等人^[3]指出其在石化领域具有可靠性高、维护量少的优点, 但测量精度受温度与压力影响。接触式液位计中, 磁浮子式利用浮标位置感知液位变化, 周等人^[4]研究表明其在高温、高压及腐蚀性环境中表现优异, 具有量程大、结构简单的特点, 但在低温或高黏度介质中易出现偏差。光纤式液位计依据不同介质中光波长与折射率差异进行测量, 通过优化提升了检测精度, 但仍面临工艺复杂与解调难度大的问题^[5,6]。电容式液位计根据液位变化引起电容率改变的原理, 王等人^[7]证实了其适用于高温、高压及强腐蚀介质, 且不受粘度、密度与工作压力影响, 但存在操作复杂、维护困难的问题。压力式液位计通过液体压力重量变化检测液位, 姬等人^[8]优化了设备与环境配置, 提升了测量真实性与准确性, 但无法获取具体液面信息。综上, 现有液位测量技术均受其原理与结构限制, 在不同应用条件下存在适应性或可靠性不足的问题。因此, 发展一种基于微波检测原理, 兼具强环境适应性、高可靠性的新型液位传感方案具有明确必要性。

本文提出一种基于人工表面等离激元 (Spoof Surface Plasmon Polaritons, SSPPs) 的电调谐微波液位传感器, 兼具结构柔性与环境适应性的液位传感器, 为复杂工况下的液位检测提供了新方案。

1 相关理论

人工表面等离激元 (SSPPs) 在液位检测中的应用, 基于其独特的电磁约束能力及对介质扰动的高敏感性。Tang 等人^[9] 研制的亚波长等离激元超材料有效解决了传统液位传感器的环境适应性问题, 为微波频段的电磁调控提供了新途径。在此基础上, 通过 SSPPs 传输线加载开口谐振环 (Split-Ring Resonator, SRR) 结构, 实现了非金属管道的缺陷检测与定位, 其可调谐特性为电调谐的柔性液位传感器的设计开辟了新思路^[10,11]。Pendry 等人^[12] 首次提出的凹槽阵列结构能够在微波与太赫兹频段强烈束缚电磁波, 使其传播模式呈现出对介电常数微小变化的显著响应。因此, SSPPs 在检测介质扰动、分析介电变化及构建高灵敏传感器方面具有突出优势, 为其在液位监测等领域的应用奠定了坚实基础。

通过调整 SRR 单元的几何参数 (如周期长度、齿形轮廓等) 可以有效调控谐振频率。其 LC 谐振电路的谐振频率为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_0}} \quad (1)$$

其中 L_s 为组成开口环微带线的电感, C_0 为环之间的分布电容。通过相关计算可得出 SRR 结构的自谐振频率^[13]。

通过将 SSPPs 结构与可重构 SRR 单元的相结合, 实现了对场分布和谐振频率的精确调控, 并通过监测 S 参数中截止频率与谐振频率的变化, 以达到液位检测与定位的目的。

2 传感器设计与分析

本文所设计传感器整体结构如图 1(a), 采用柔性聚酰亚胺材料 (介电常数为 3.5, 正切损耗为 0.0027, 厚度为 0.07mm) 作为介质基板。黄色部分均为铜材质, 厚度均为 0.035mm。由三个功能部分组成。第 I 部分为共面波导结构, 其尺寸为: $w=30\text{mm}, w_1=13.82\text{mm}, l_1=2\text{mm}, g=0.18\text{mm}, e=2\text{mm}$, 旨在实现与传统微波器件或信号源之间的高效阻抗匹配, 确保信号的高效传输。第 II 部分由渐变梯度方形结构与曲线形接地结构组成, 其主要功能是进行共面波导模式至 SSPPs 模式的能量转换与阻抗过渡。该部分通过特定尺寸的渐变方形的宽度 $h_1 \sim h_5=0.8\text{mm} \sim 4\text{mm}$ (间隔为 1.8mm) 与符合特定曲线方程 $y=C_1 e^{\alpha x}+C_2$, $C_1=(y_2-y_1)/$

$(e^{\alpha x_2}-e^{\alpha x_1})$, $C_2=(y_1 e^{\alpha x_2}-y_2 e^{\alpha x_1})/(e^{\alpha x_2}-e^{\alpha x_1})$ 的接地结构, 其中, $P_1(x_1, y_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2)$ 为曲线的起止坐标。第 III 部分为核心功能区域, 以开口谐振环 (SRR) 为单元的周期性结构构成, SRR 个数可根据检测需求调整以决定测量范围, 其中各 SRR 单元均通过 0.2mm 的正方形铜片与微带线形成电连接。其背面的贴片单元, 蓝色为电感用于与外部直流源相连, 并阻隔高频信号; 红色为 PIN 二极管, 通过不同偏置状态对电场进行调控。

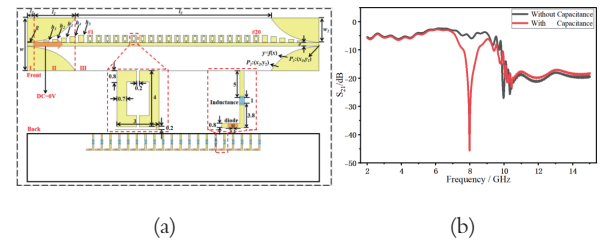


图1 (a)传感器示意图 (b)有无电容的 S_{21} 传输曲线对比

在 SRR 上部的开口处接入一个 PIN 二极管。通过控制其偏置电压实现电阻与电容状态的切换, 正偏时表现为一个阻值随电压增大而减小的可变电阻器; 反偏时表现为一个电容。当 SSPPs 设置为空载时, S 参数如图 1(b), 可以看到, 在对其中一个二极管施加反向电压时会出现一个明显的阻带, 验证了二极对电场调控的可行性。

在验证电场调控的可行性后, 建立了如图 2(a) 的液位检测仿真模型。将传感器贴合在容器外表面, 容器材料为特氟龙, 介电常数为 2.10, 正切损耗为 0.0002, 厚度为 1mm。待测液选用介电常数为 2.5 的油。

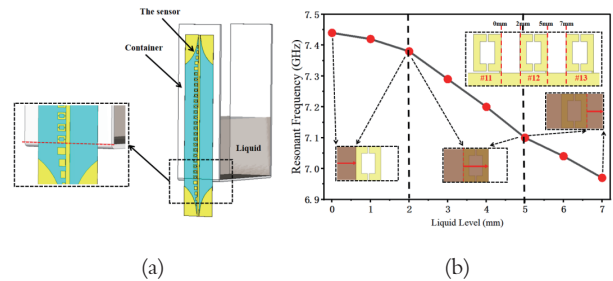


图2 (a)液位检测仿真示意图 (b)液面位于单元不同位置时谐振频率变化情况

在建立上述检测模型后, 进行液位测量和仿真, 将第 12 个 SRR 处的 PIN 二极管反向偏置, 并将油作为待测液, 将第 11 个 SRR 末端 ($t=0$) 作为液位起点, 第 13 个始端 ($t=7$) 作为终点, 进行单元周期前后液位递增仿真检测。结果如图 2(b), 谐振频率由 $t=0$ 时的 7.44GHz 下降到了 $t=7$ 时的 6.98GHz (t 表示 1mm 为单位的液面递增参数)。由于 SRR 下方液体变化, 电磁场传输的局域特性会随着介质由液体、液体-气体、气体的三种状态逐渐变

化（等效介电常数逐渐增大），而谐振频率逐渐减小。利用该结果，通过检测谐振频率的偏移，即可达到液位测量的目的。

3 结语

本文提出了一种电控式 SSPPs 液位传感器，并从理论、结构与仿真验证了其可行性与性能优势。传感器以共面波导输入、通过渐变结构实现高效能量耦合，并在核心区集成周期性 SRR 单元，构建了可电控的 SSPPs 传输通道。仿真结果显示，通过控制不同位置 SRR 单元的偏置状态，可实现对特定区域电磁场分布的选择性调控，从而有效感知液位变化。在液位递增时，传感器表现出明显的谐振频率偏移行为，谐振点由 7.44 GHz 随液位上升逐渐移动至 6.98 GHz，证明了对介电常数变化的敏感性。该传感器具有结构灵活，灵敏度高，抗干扰能力强的特点，采用非接触式测量，避免了腐蚀与污染问题，适用于高温、高压与腐蚀性环境，也为 SSPPs 微波传感技术的进一步应用提供参考。后续研究将致力于本技术的深化与拓展，一方面需深化其传感机理研究，并探索与不同工业场景的融合路径；另一方面，也将积极寻求在更广阔领域，如航空航天燃油管理等复杂系统中的创新应用，以充分释放其技术潜力。

参考文献：

- [1] 张晓飞. 基于激光测距的雷达液位计简易校准装置的设计与应用[J]. 化工生产与技术, 2025,31(02):28-31.
- [2] 游建军, 万丽芬, 胡鹤鸣等. 雷达液位计检测方法研究[J]. 中国计量, 2025,(09):92-94.
- [3] 孙德罡, 齐学鹏. 超声波液位计在化工生产应用中的常见故障分析[J]. 电子世界, 2014,(06):278.
- [4] 周佳佳, 赵嗣辉. 磁浮子液位计的应用[J]. 山东化工, 2024,53(13):205-207.
- [5] 王阳阳. 基于改进型 FBG 解调技术的光纤液位计[D]. 吉林大学, 2018.

- [6] 芮泽钜. 基于光纤光栅的高精度液位测量方法研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2023.

- [7] 王晓锋, 耿要强, 初阳. 电容式液位计在换流阀水冷系统中的应用研究[J]. 电器工业, 2023,(08):47-50.

- [8] 姬良效, 高维伦. 压力式液位计的原理和异常分析[J]. 科技视界, 2022,(23):7-9.

- [9] Tang W X, Zhang H C, Ma H F, et al. Concept, Theory, Design, and Applications of Spoof Surface Plasmon Polaritons at Microwave Frequencies [J]. Advanced Optical Materials, 2018, 7(1): 1800421.

- [10] Yang X, Chen J, Su P, et al. Detection of defects in film-coated metals and non-metallic materials based on spoof surface plasmon polaritons [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(24):11891-11899.

- [11] Chen J, Lei J, Su P, et al. Detection of defects in non-metallic composite material based on electronically controlled spoof surface plasmon polaritons[J]. IEEE Sensors Journal, 2021,21(3):2883-2890.

- [12] Pendry J B, Martín-Moreno L, Garcia-Vidal F J. Mimicking Surface Plasmons with Structured Surfaces [J]. Science, 2004, 305(5685): 847-848.

- [13] 李云吉. 介质材料的微波毫米波无损检测技术研究[D]. 电子科技大学, 2023.

基金项目：成都工业学院省级大学生创新创业训练计划，“基于人工表面等离激元的非金属容器液体泄漏检测技术的研究”（202501316083）。

作者简介：侯梓越（2004.12-），男，汉族，本科在读，研究方向：主要从事微波无损检测和电力系统方向的研究。

* 通讯作者：李俊杰（1976.09-），男，汉族，学士，讲师，研究方向：主要从事电机与控制方向的研究工作。