

# 里德堡原子超外差微波测量技术研究进展

杜强<sup>1</sup>, 郝建海<sup>1</sup>, 白金海<sup>1\*</sup>, 胡栋<sup>1</sup>, 王宇<sup>1</sup>, 徐浩天<sup>2</sup>, 张烨元<sup>2</sup>

(1. 中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095;

2. 中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110000)

**摘要:**介绍了里德堡原子超外差微波测量技术的物理原理与典型方法, 阐述了其在灵敏度提升、相位测量及动态范围扩展等方面的研究进展, 分析了该技术在航空装备应用中的潜在价值与当前局限, 探讨了该技术体系从实验室迈向航空装备应用的发展脉络与关键技术挑战。指出该技术当前成熟度尚处于原理突破向装备集成的过渡阶段, 提出该技术迈向航空装备应用应遵循核心单元芯片化集成、系统级环境适应性强化、面向任务的网络化协同感知三个阶段。为构建新一代高灵敏、分布式、智能化的航空微波测量体系提供了前瞻性技术路线图。

**关键词:**量子精密测量; 量子传感; 里德堡原子; 原子超外差技术; 测量灵敏度; 微波电场; 微波相位测量; 动态测量

中图分类号: TB973; V219

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2025) 06-0050-15

## Research progress on Rydberg atomic superheterodyne microwave measurement technology

DU Qiang<sup>1</sup>, HAO Jianhai<sup>1</sup>, BAI Jinhai<sup>1\*</sup>, HU Dong<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>, XU Haotian<sup>2</sup>, ZHANG Yeyuan<sup>2</sup>

(1. AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China;

2. AVIC Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110000, China)

**Abstract:** This paper introduces the physical principles and typical methods of Rydberg atomic superheterodyne microwave measurement technology, elaborates on its research advancements in sensitivity enhancement, phase measurement, and dynamic range expansion, analyzes its potential value and current limitations in aviation equipment applications, and explores the developmental trajectory and key technical challenges involved in transitioning this technology from laboratory research to practical aviation applications. It points out that the current maturity level of this technology is in the transitional stage from theoretical breakthroughs to equipment integration. Furthermore, it proposes a three-phase roadmap for advancing this technology toward aviation applications: chip-scale integration of core units, enhanced environmental robustness at the system level, and mission-oriented networked collaborative sensing. It provides a prospective technology roadmap for constructing a new generation of highly sensitive, distributed, and intelligent aviation microwave measurement systems.

**Key words:** quantum precision measurement; quantum Sensing; Rydberg atoms; atomic superheterodyne technique; measurement sensitivity; microwave electric field; microwave phase measurement; dynamic measurement

收稿日期: 2025-09-15; 修回日期: 2025-12-03

基金项目: 国家“十四五”基础科研计划项目(JCKY2024205C017)

引用格式: 杜强, 郝建海, 白金海, 等. 里德堡原子超外差微波测量技术研究进展[J]. 计测技术, 2025, 45(6):50-64.

Citation: DU Q, HAO J H, BAI J H, et al. Research progress on Rydberg atomic superheterodyne microwave measurement technology[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(6):50-64.



## 0 引言

自 Heinrich Hertz 发明偶极天线以来, 偶极天线长期占据微波场强测量主导地位<sup>[1-2]</sup>, 但其存在明显局限: 探测探头需精确校准, 其金属结构会对被测场产生不可忽视的干扰, 且天线尺寸受限, 导致其在灵敏度与测量精度方面的发展遇到瓶颈。目前, 典型偶极天线场强分辨力约  $30 \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$ , 灵敏度一般处于  $\text{mV}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$  量级<sup>[3]</sup>。

近年来, 随着量子力学研究的不断深入, 基于量子体系的微波精密测量技术逐渐兴起, 展现出突破经典微波测量极限的潜力。根据 DEGEN C L 对量子传感的严格定义<sup>[4]</sup>, 表 1 列出了目前的量子传感体系<sup>[5]</sup>。由表 1 可知, 里德堡原子具有最大的响应频率范围(静电场到太赫兹频段)且同时满足 3 类传感特性: 具有量子特性体系(I)的传感器、利用量子相干(II)对物理量进行测量的传感器以及利用量子纠缠来超越经典的测量灵敏度极限(III)的传感器<sup>[4]</sup>。利用电磁诱导透明(Electromagnetically Induced Transparency, EIT)效应将外部电场对里德堡原子能级的扰动转换为光谱变化, 从而实现宽带电磁频段的全光学无损探测<sup>[6-7]</sup>。

自 2012 年 SEDLACEK J A 等人<sup>[8]</sup>利用微波耦合相邻里德堡能级诱导的 Autler-Townes(AT)分裂实现微波电场测量以来, 基于里德堡原子的微波电场探测研究受到广泛关注。为提高里德堡原子微波测量的灵敏度, 多个研究团队相继提出了多种新方法: 受原子热运动制约, 室温条件下的谱线线宽通常难以低于 3 MHz, 利用激光冷却和磁光阱

等技术将原子温度降至  $\mu\text{K}$  甚至  $\text{nK}$  量级, 可显著抑制原子热运动, 减小谱线展宽<sup>[9-14]</sup>; 利用三光子激发方案可消除多普勒展宽, 获得接近自然线宽的谱线, 直接提升频率测量精度<sup>[15-17]</sup>; 通过引入强辅助微波场与原子能级耦合, 构成级饰态, 改变原有能级结构与响应特性<sup>[18-19]</sup>, 在弱信号下将信号场引起的微小能移转化为易于观测的级饰态能量变化, 从而突破 EIT 线宽限制, 获得接近自然线宽的谱线, 直接提升频率测量精度; 使用谐振增强结构将光/电磁场局限在微小模式体积内并多次循环, 以提升作用区域场强等<sup>[20-22]</sup>。上述方案大多依赖 AT 分裂或交流斯塔克(AC Stark)效应来实现电场探测, 其核心是通过压缩 EIT 谱线宽度来提高光谱分辨力, 进而提升灵敏度。然而, 尽管已通过噪声抑制和分辨力提升等多种优化手段, 典型四能级系统的灵敏度仍仅处于  $\mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$  量级<sup>[23]</sup>。为此, 山西大学贾锁堂团队<sup>[24]</sup>于 2020 年提出一种超外差测量方法, 通过在 2 个里德堡能级间引入共振或失谐的强局域本振(Local Oscillator, LO)微波场, 将频率分裂信息转换为中频幅度信号进行提取, 为提升微波电场传感灵敏度提供了新途径。

本文对室温气室中的里德堡原子超外差微波测量技术进行综述, 围绕里德堡原子微波测量的物理原理和测量方法展开介绍, 着重阐述里德堡原子超外差微波测量在测量灵敏度提升、相位测量以及动态范围拓展等方面的研究进展, 并分析了其在航空领域的未来应用方向。

表 1 微波电场量子传感体系<sup>[5]</sup>

Tab.1 Microwave electric field quantum sensing system<sup>[5]</sup>

物理体系	量子比特	响应频率	初始化	信号读出	传感类型
俘获离子	振动模式	MHz	光学	光学	II
氮-空位色心	电子自旋	DC ~ GHz	光学	光学	II
半导体量子点	电子自旋	DC ~ GHz	电学、光学	电学、光学	I, II
超导电路	电荷本征态	DC ~ GHz	热学	电学	II
单电子晶体管	电荷本征态	DC ~ MHz	热学	电学	II
里德堡原子	里德堡态	DC ~ THz	光学	光学	I, II, III

注: 直流(Direct Current, DC)。

## 1 基本原理

### 1.1 里德堡原子

里德堡原子是指原子中一个电子被激发至高量子态( $n > 20$ )的原子<sup>[6-7]</sup>。其特征在于只有1个外层电子处于高激发态，且该电子距离原子实较远，所以原子实对其静电库伦作用类似于带正电的点电荷。表2给出了主量子数( $n$ )对里德堡原子重要性质的影响。

表2 里德堡原子重要的性质<sup>[25]</sup>

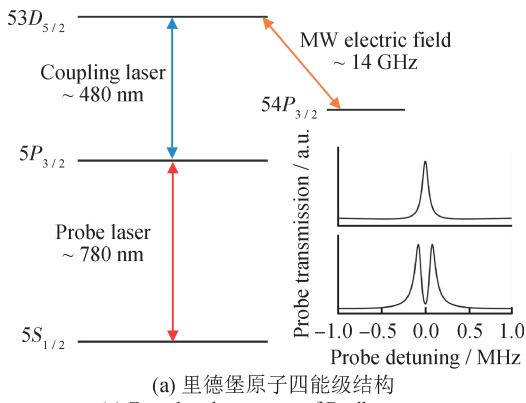
Tab.2 Important properties of Rydberg atoms<sup>[25]</sup>

性质	$n$ 相关性
结合能	$n^{-2}$
能级间隔	$n^{-3}$
轨道半径	$n^2$
偶极矩	$n^2$
辐射寿命	$n^3$
极化率	$n^7$
范德华相互作用	$n^{11}$
偶极-偶极相互作用	$n^4$

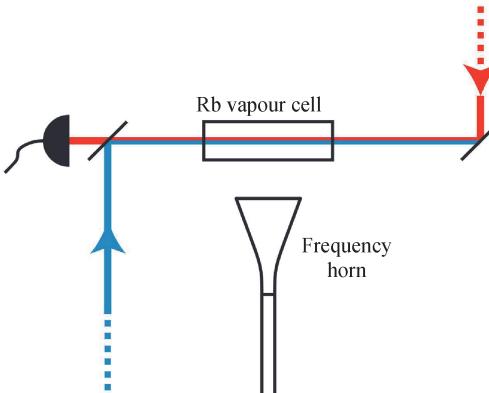
### 1.2 EIT效应

EIT效应是一种基于量子干涉效应的物理现象<sup>[26]</sup>。里德堡原子微波探测技术基于EIT光谱实现，其利用外加相干光场在原子系统中诱导相位消光干涉，以抵消介质对探测光的吸收，从而产生超窄透明峰。

图1为基于<sup>87</sup>Rb原子的能级结构及用于对微波电场进行测量的实验装置示意图<sup>[8]</sup>。在热原子气室中，探测光与耦合光相向传播，由于量子干涉效应，原子形成基态 $5S_{1/2}$ 与里德堡态 $53D_{5/2}$ 的相干叠加态(即“暗态”)<sup>[26]</sup>。此时，在吸收谱中心位置可观察到1个窄线宽的EIT峰，如图1(a)上方插图所示。由于里德堡原子对微波电场的高度敏感性，当外加微波频率与 $53D_{5/2} \rightarrow 54P_{3/2}$ 能级跃迁共振且场强足够时，会引起里德堡能级分裂，导致原本的EIT峰分裂为2个峰，如图1(a)下方插图所示，该现象为EIT-AT效应<sup>[28]</sup>。



(a) 里德堡原子四能级结构  
(a) Four-level structure of Rydberg atom



(b) 实验装置示意图  
(b) Experimental setup schematic

图1 使用典型电磁感应透明效应测量微波电场的能级结构和实验装置示意图<sup>[8]</sup>

Fig.1 Demonstration of energy levels and experimental setup schematic for measuring microwave electric fields using the typical Rydberg EIT and AT splitting effects<sup>[8]</sup>

在微波电场强度检测中，EIT-AT效应是主要的观测依据。其测量机制为：当微波电场作用于里德堡原子时，可通过密度矩阵理论求解探测光场的密度矩阵元，进而得到均匀增宽系统中探测光的吸收率。然而，热原子气室需考虑多普勒展宽效应，其原子速度服从麦克斯韦-玻尔兹曼分布，属于非均匀增宽系统<sup>[29]</sup>。在该体系中，随着微波电场强度逐渐增大，AT分裂效应表现出明显的强度响应。理论与实验均证实：AT分裂双峰的间距 $\Delta f$ 与微波电场的拉比频率 $\Omega_{\text{MW}}$ 呈严格线性正比关系<sup>[30]</sup>，因此可通过测量分裂间距直接反演微波电场强度，具体关系如式(1)所示。

$$E = \frac{\hbar \Omega_{\text{MW}}}{\mu_{\text{MW}}} = 2\pi \frac{\hbar D}{\mu_{\text{MW}}} \Delta f \quad (1)$$

式中： $\hbar$ 为普朗克常数； $\mu_{\text{MW}}$ 为跃迁偶极矩； $D$ 为多普勒失配因子<sup>[31]</sup>，室温下扫描探测光时， $D =$

$\lambda_p/\lambda_c$  ( $\lambda_p$  和  $\lambda_c$  分别为探测光和耦合光波长), 表示扫描探测光对 EIT-AT 分裂的影响。扫描耦合光频率  $D = 1$  时, 没有多普勒失配。该比例系数  $D$  与激光波长、普朗克常数及偶极矩阵元密切相关。其中, 激光波长不确定度(约  $10^{-8}$  量级)<sup>[32]</sup>和偶极矩阵元不确定度(约  $10^{-8}$  量级)对微波电场测量精度影响可忽略。受微波拉比输出强度稳定性、探测光与耦合光频率稳定性等因素限制, 基于 AT 分裂峰方法测得的微波电场强度总体不确定度约为 0.5%<sup>[8]</sup>。

### 1.3 原子超外差接收技术

超外差法<sup>[33]</sup>是在外差法基础上发展而来的改进技术, 其基本原理是将接收到的高频信号与本地振荡器产生的信号进行混频, 生成位于超音频范围的中频信号。相较于普通外差法<sup>[34]</sup>, 超外差接收机采用多级中频放大结构, 通过优化中频放大器的带宽和增益设计, 实现对中频信号的精细处理, 有效抑制干扰, 从而提高接收机的选择性和抗干扰性能。该技术已广泛应用于广播收音机、电视、手机等现代无线电通信设备<sup>[35]</sup>。

基于 EIT-AT 的微波测量方法存在其固有局限<sup>[36-41]</sup>。理论上, EIT-AT 要求微波电场的拉比频率足够大, 因此仅适用于中高场强范围, 难以实现弱场检测。在弱电场条件下, 由于无法引起光谱分裂, 仅能观测到 EIT 峰值幅度下降, 无法通过分裂间距进行定量测量。原子超外差技术则可有效克服上述限制: 在灵敏度方面, 原子超外差技术通过将弱信号与强局域微波场混频, 使信号增强至可检测水平, 再经中频放大和滤波实现二次提升, 能够检测极弱电磁信号; 在选择性方面, 借助中频滤波器可有效抑制带外干扰, 结合多级变频和窄带滤波技术, 进一步提高信号筛选精度和系统抗干扰能力; 在动态范围方面, 引入自动增益控制技术可在不同信号强度下保持系统稳定, 并通过优化混频与放大单元的设计进一步扩展适用范围, 以适应复杂电磁环境。微波测量方法对比如表 3 所示。目前, 多个研究团队正围绕原子超外差技术在微波电场传感中的灵敏度、相位检测及动态范围优化等关键问题展开系统研究。

表 3 微波测量方法对比

Tab.3 Comparison of microwave measurement methods

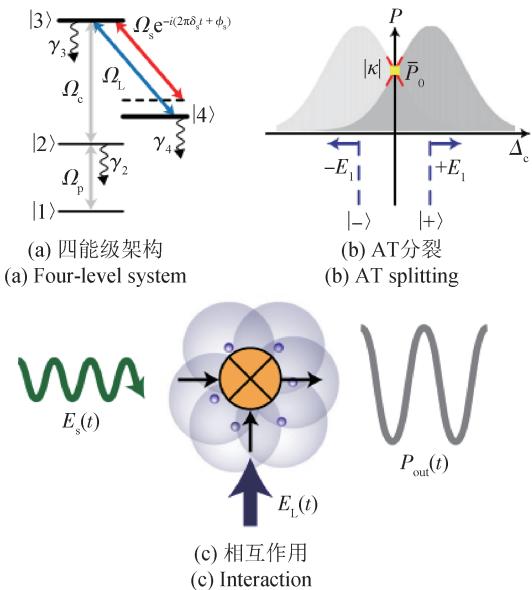
参数	灵敏度 / (nV·cm <sup>-1</sup> ·Hz <sup>-1/2</sup> )	场强分辨率 / (nV·cm <sup>-1</sup> )	校准特性
原子超外差 <sup>[24]</sup>	55	460	自校准
EIT-AT <sup>[38]</sup>	$3 \times 10^3$	$1 \times 10^3$	自校准
传统天线 <sup>[3]</sup>	$1 \times 10^6$	$3 \times 10^4$	需要校准

2020 年, 山西大学研究团队通过原子超外差接收机实验, 成功将基于里德堡原子的超外差微波电场传感技术从理论构想转化为现实应用。该研究成果显著提升了系统的探测性能, 使灵敏度逼近量子投影噪声极限灵敏度(约  $700 \text{ pV} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ )<sup>[24]</sup>。该实验方案中, 强共振本振场作为驱动源诱导原子能级发生分裂, 与此同时, 频率与本振场相差数百 kHz 的弱信号场在里德堡原子气室中与本振场混频, 产生可表征电场信息的中频信号。该中频信号通过里德堡原子 EIT 光谱学方法实现高灵敏度读出。与偶极天线不同, 其装饰场不需要外部场校准, 通过优化的本振微波电场进行自校准, 可进一步提升信号微波电场感应的灵敏度。该技术还

展现出优异的性能鲁棒性, 即便在相对简化的实验配置下, 仍能实现高精度的微波电场测量: 其测量灵敏度达  $55 \text{ nV} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ , 最小可检测电场强度为  $780 \text{ pV} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 比现有基于 EIT-AT 分裂间距的测量方法降低 3 个数量级。

基于里德堡原子的微波超外差技术原理<sup>[24]</sup>: 选择四能级架构, 如图 2(a)所示; 强近共振微波的局域微波场信号  $E_L$  在其频谱中产生 AT 分裂, 如图 2(b)所示; 这个信号和待测量信号  $E_s$  通过里德堡原子相互作用混合频率, 所得到的中频信号  $P_0$  被加载到 EIT 频谱上, 如图 2(c)所示。

强局域微波场使原子产生 2 个能量间隔为  $| \pm E_l \rangle$  的  $\hbar\Omega_L$  缀饰态, 其中  $\Omega_L$  为强局域微波场的

图2 超外差里德堡原子接收器的原理示意图<sup>[24]</sup>Fig.2 Basic principle of the Rydberg-atom superheterodyne receiver<sup>[24]</sup>

拉比频率。当非常弱的信号场被加载到原子上时,2个缀饰态的能量间隔 $| \pm E_1 \rangle$ 为

$$\pm E_1 = \pm \frac{\hbar \Omega_s \cos(2\pi\delta_{\text{IF}} + \varphi_{\text{IF}})}{2} \quad (2)$$

式中:  $\Omega_s$ 为信号场的拉比频率,  $\delta_{\text{IF}}$ 为信号场相对于强局域微波场的频率失谐量,  $\varphi_{\text{IF}}$ 为信号场与强局域微波场之间的相位差。这2种缀饰态的能量位移导致了EIT光谱中心(共振处)的透射率的线性变化。探测光透光率变化 $P_{\text{out}}(t)$ 与信号电场的关系为<sup>[42]</sup>

$$P_{\text{out}}(t) = |P(\delta_{\text{IF}})| \cos(2\pi\delta_{\text{IF}}t + \varphi_{\text{IF}}) \quad (3)$$

式中:  $P_{\text{out}}(t) = P(t) - P_0$ , 其在无信号电场下相对于 $P_0$ 的透光率变化;  $|P(\delta_{\text{IF}})|$ 为与 $\delta_{\text{IF}}$ 频率对应的单侧傅里叶谱。透光率的变化与信号场的拉比频率成正比<sup>[42]</sup>, 如式(4)所示。

$$|P(\delta_{\text{IF}})| \propto \xi(\Omega_{\text{L}}) \Omega_s = |\kappa_0| \Omega_s \quad (4)$$

式中:  $\xi(\Omega_{\text{L}})$ 为增益系数, 是 $\Omega_{\text{L}}$ 的非线性函数;  $\kappa_0$ 为通过拟合双峰EIT-AT光谱获得的单峰边缘斜率。

基于里德堡的微波超外差技术具备良好的数字化适配性, 其产生的中频信号频率较低, 便于数字化处理。结合先进数字信号处理技术, 可实现接收信号的高效解析与深度挖掘, 赋能系统性能提升与功能拓展, 为后续信号分析、特征提取及决策判断奠定坚实基础。

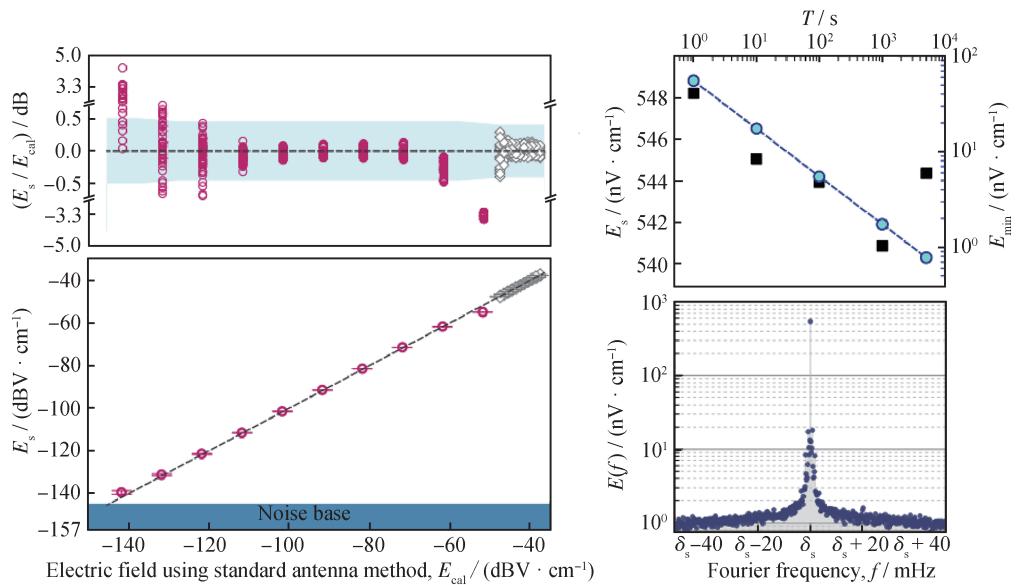
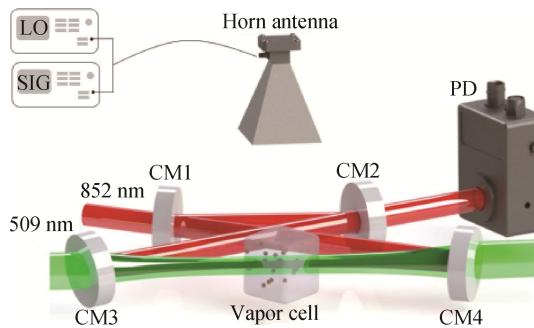
## 2 研究现状分析

### 2.1 灵敏度和最小电场强度测量

基于原子超外差接收机的微波电场测量技术, 其灵敏度和最小可探测电场强度较2012年首次实现的直接测量方案取得了跨越式提升。该技术的发展经历了从原理验证到性能持续突破的演进过程。早期研究通过在原子气室中引入2个微波场<sup>[43-46]</sup>, 验证了利用里德堡原子作为量子混频器实现外差检测的可行性, 探测能力达 $\text{nV} \cdot \text{cm}^{-1}$ 量级<sup>[45]</sup>; 后续研究通过引入非共振外差<sup>[47]</sup>、优化能级结构<sup>[48]</sup>及场参数等创新机制<sup>[49]</sup>, 将灵敏度稳步提升至约 $712 \text{ nV} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ <sup>[50]</sup>; 近期, 基于里德堡电磁感应吸收的优化方案在500 ms积分时间内实现 $55.79 \text{ nV} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 高灵敏度与 $78.9 \text{ nV} \cdot \text{cm}^{-1}$ <sup>[51]</sup>的极弱场检测下限, 标志着该技术向实用化迈进的关键突破。

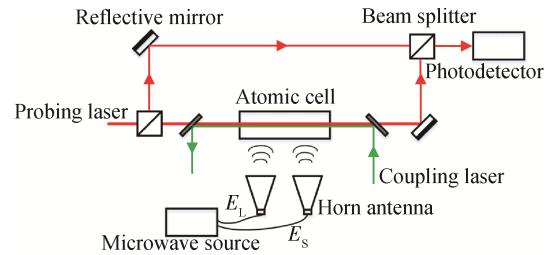
如图3所示, 2020年, 山西大学研究团队完成了原子超外差接收机的实验验证<sup>[24]</sup>。2025年, 该团队还研究了蝶形腔增强对里德堡原子超外差接收机测量性能的改善<sup>[52]</sup>, 该技术利用蝶形光学腔内的多次光子反射, 显著增强了探测光与原子系统之间的相互作用, 从而大幅提高了灵敏度和信噪比。实验结果表明: 与自由空间场景相比, 腔增强情况下的灵敏度和动态范围提高了约19 dB; 同年, 该团队基于多体原子系统中里德堡临界性可通过增加Fisher信息提升测量灵敏度的理论, 提出并实验验证了光学腔耦合里德堡原子的Fisher信息在临界点附近的幅度增强可以超过2个数量级。通过腔增强临界行为实现微波电场的高精度测量, 与自由空间相比, 微波电场的等效测量灵敏度可以提高1个数量级, 达到 $2.6 \text{ nV} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ <sup>[53]</sup>, 其采用的腔增益测量装置如图4所示。

此外, 美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)<sup>[54]</sup>研究团队提出基态再泵浦增强微波电场测量的方法, 该激光束可增加EIT相互作用中的里德堡原子数量, 同时避免其他方法引入的额外多普勒、功率或碰撞展宽, 使灵敏度提高了近2倍, 可检测的最小电场强度为 $30 \text{ nV} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。华南师范大学<sup>[55]</sup>提出多

图3 电场测量的灵敏度和不确定性<sup>[24]</sup>Fig.3 Sensitivity and uncertainties of the electric field measurement<sup>[24]</sup>图4 腔增益测量装置图<sup>[53]</sup>Fig.4 Experimental setup of the cavity-enhanced system<sup>[53]</sup>

级外差测量方案，采用2个非共振微波场作为可调谐本振场，用于提供信号微波电场的幅度、相位和频率信息，实验实现了高达 $1.5 \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 的灵敏度，线性动态范围上限达80 dB。中国科学技术大学<sup>[56]</sup>将原子超外差接收机和马赫-曾德尔干涉仪相结合，评估了相位读出方法的检测灵敏度，推导了频率失谐状态下里德堡原子系统的密度矩阵稳态解，并数值分析了探测激光频率失谐对优化目标的影响。结果表明：合理设置频率失谐可提高电场检测灵敏度(达 $0.185 \text{nV}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ )。相较于EIT强度方法，基于相位读出方法的系统将其光子散粒噪声极限灵敏度提升36.6 dB，基于相位读出的原子超外差微波测量装置图如图5所示。

基于原子超外差接收机的微波电场测量技术

图5 基于相位读出的原子超外差微波测量装置图<sup>[56]</sup>Fig.5 Diagram of atomic superheterodyne receiver based on homodyne readout<sup>[56]</sup>

灵敏度突破主要源于2大核心技术的协同作用：

1) 超外差相干放大<sup>[24]</sup>

该方案利用强本振场与弱信号场在里德堡原子能级系统中的相干混频效应，将高频弱信号转换为可观测的中频响应，从根本上提升了系统对微弱电场信号的探测能力。

2) 超稳腔稳频<sup>[57]</sup>与探测增强

超稳腔将激光线宽压制至几十kHz量级(传统饱和吸收法的频率稳定度仅为100 kHz ~ 1 MHz)，显著降低了激光频率噪声对测量的影响；同时，结合微波谐振腔增强与基态再泵浦等技术，有效增强了微波场与里德堡原子之间的相互作用强度，进一步提升了系统的信噪比与探测灵敏度。

然而，该技术在实际应用中仍面临2大关键挑战：

1) 超稳腔稳频方案的外场适应性受限<sup>[58]</sup>

超稳腔需要严格的隔振与温控环境，在动平台或外场测量条件下难以维持最优锁频稳定性，导致系统性能下降。

## 2) 极低测量分辨力能力尚待验证

现有研究多在较强信号条件下验证系统性能(例如山西大学报道的电场强度测量分辨力在  $460 \text{ nV} \cdot \text{cm}^{-1}$  水平<sup>[24]</sup>)，尚未有研究团队在  $\text{nV} \cdot \text{cm}^{-1}$  至  $\text{pV} \cdot \text{cm}^{-1}$  量级的极弱场条件下实现有效测量。这表明系统在极低信噪比条件下的测量能力仍需进一步提升，才能真正实现未来高精度探测对  $\text{nV} \cdot \text{cm}^{-1}$  甚至  $\text{pV} \cdot \text{cm}^{-1}$  量级电场分辨力的应用需求。

## 2.2 微波电场相位测量

原子超外差双微波场的实验配置为微波电场的相位测量提供了额外的研究平台<sup>[59]</sup>。在基于里德堡原子的微波电场传感体系中，高灵敏的相位识别技术依赖于探测激光传输特性与信号微波场之间的动态关联机制。具体而言，信号微波场与强局域微波场场间的相位变化会直接映射至中频信号，并通过光学场直观呈现。

里德堡原子作为核心混频元件的相位测量方案在工程应用中实现了  $2^\circ$  的相位分辨<sup>[53]</sup>，这展现了其高效解调微波场信号的能力。山西大学研究团队利用原子超外差技术将相位分辨力提高到  $0.8^\circ$ <sup>[24]</sup>。科罗拉多大学 SIMONS M T 团队<sup>[60]</sup>演示了一种基于里德堡原子混频器的射频场相位测量方案，装置如图 6 所示。该方案将 20 GHz 的高频微波场转换为探测光强度的周期性振荡。在此过程中，2 个微波场的相位差被转化为易于检测的 kHz 量级中频信号，实现高精度相位信息提取。中频相位直接对应射频场相位，基于原子的射频相位测量能够测量射频波的传播常数，误差在理论值的 0.1% 以内。

中国科学院大学贾凤东团队<sup>[61]</sup>通过添加交流塞曼调制使里德堡原子混频器转变为相位检测器，研究了在固定塞曼调制的相位下，微波相位的变化与拍频信号振幅大小的关系。塞曼调制可将微波相位的测量直接转换为拍频信号幅度的测量。在添加塞曼调制后，微波相位先与原子传感器中的参考波形相位(即塞曼调制的相位)进行比较，

然后直接测量拍频的振幅，间接获取相位信息。相较传统方法需将拍频信号波形与参考波形比较获取相位，该方法可以直接在原子传感器中比较微波相位与参考波，且拍频信号幅度直接反映微波相位，更加方便高效。基于里德堡原子的相位检测器实验装置如图 7 所示。

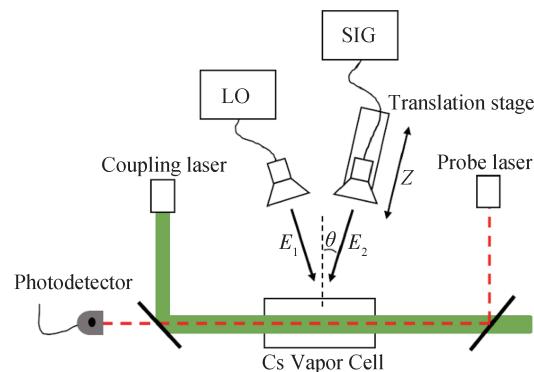


图 6 基于里德堡超外差的相位测量装置图<sup>[60]</sup>

Fig.6 Measurement of phase using Rydberg atomic superheterodyne<sup>[60]</sup>

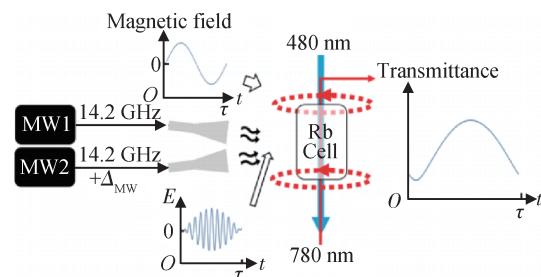


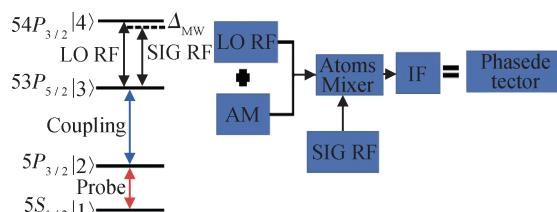
图 7 实验装置原理图<sup>[61]</sup>

Fig.7 Sketch for the principle of experimental setup<sup>[61]</sup>

贾凤东团队<sup>[62]</sup>同样采用相位测量转换为拍频振幅测量的方案，将里德堡原子混频器中的强局域微波场进行周期性幅度调制(调制周期与拍频周期相同)。当调制信号和拍频信号通过里德堡原子叠加后，探测光强的幅值就与信号射频场的相位相关，再通过 Photodetector(PD)探测和锁相放大器解调，即可得到相位与信号幅值的对应关系，最终实现混频器转换为鉴相器的功能转换，涉及的原子能级与基本原理如图 8 所示。据此原理，团队实现了误差优于  $\pm 0.6^\circ$  的高精度相位测量。

基于里德堡原子超外差的微波相位测量技术主要使用直接相位读出法和相位-幅度转换法，已实现  $0.8^\circ$  的超高相位分辨力，并通过混频将高频

微波相位信息转换为1 kHz量级的中频信号，极大地降低了探测和读取的难度。然而，现有方案都依赖于精密且稳定的激光系统和原子能级制备，且转换法间接引入了额外的调制场，增加了系统的复杂性。因此，通过集成化、性能优化与方案创新构建高精度、高鲁棒性的量子微波相位测量系统，是当前的核心发展方向。



注：AM为Amplitude Modulation缩写，即幅度调制；IF为Intermediate Frequency缩写，即中频信号。

图8 拍频幅度鉴相器的里德堡能级图和基本原理<sup>[62]</sup>

Fig.8 Rydberg atomic energy levels and basic principle of phase detector using the amplitude change of beat frequency<sup>[62]</sup>

### 2.3 工作带宽和瞬时带宽

在里德堡原子微波测量系统中，比较重要的带宽概念包括工作带宽和瞬时带宽<sup>[63]</sup>。工作带宽指整个测量系统能够正常工作的总频率覆盖范围，通过调谐探测光和耦合光的波长，将原子激发到不同的里德堡态，从而使系统能够探测DC~THz的极宽频率范围的微波信号；瞬时带宽指在一个工作频率点下系统能够同时响应并测量的信号频率范围。然而，基于EIT-AT效应的里德堡原子微波电场测量技术受限于里德堡跃迁的固有特性，其工作带宽通常局限于较窄频段。

为突破带宽瓶颈，研究人员提出多种创新方案。科罗拉多大学SIMONS M T团队<sup>[64]</sup>提出双光子共振AT分裂技术，通过引入与相邻里德堡跃迁共振的辅助场，利用双光子跃迁过程实现对远失谐场的检测。该方法通过调控相邻里德堡共振调谐场的频率或能级结构，成功将系统工作带宽从± 50 MHz拓展至数百 MHz；更具突破性的进展来自美国陆军研究实验室<sup>[65]</sup>提出的非共振射频外差技术，该技术将热里德堡原子与平面微波波导相结合，实现了从直流到20 GHz的超宽频带连续载波频率响应，同时达成超过80 dB的线性动态范围；山西大学<sup>[53]</sup>应用多级外差测量架构，在提升检测灵敏度的同时，

使系统工作频率范围突破1 GHz；中国科学技术大学<sup>[66]</sup>将微波频率梳场引入四能级传感系统，为拓展工作带宽提供了全新思路。该方案利用频率梳的精密频率标尺特性，实现了125 MHz带宽内的实时、绝对频率测量；中国电子科技集团<sup>[67]</sup>基于里德堡原子进行了D波段太赫兹电场连续频率测量实验。通过原子超外差测量方法，利用6组里德堡能级跃迁，在110~170 GHz频段内实现了电场的连续测量，测量结果如图9所示，整个区域内的最小可测电场强度小于287 μV·cm<sup>-1</sup>，在142 GHz的频率下，最小可测电场强度达22.08 μV·cm<sup>-1</sup>。

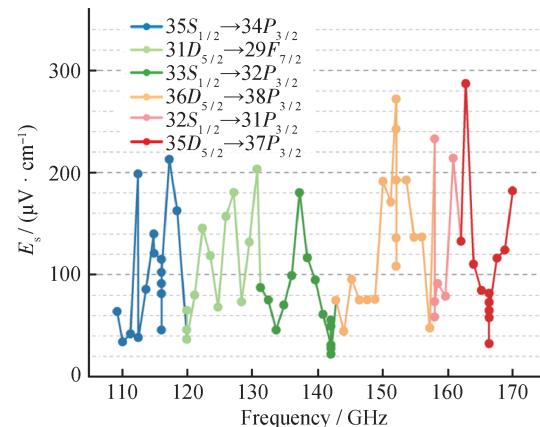


图9 里德堡超外差D波段连续测量实验结果图<sup>[67]</sup>

Fig.9 Results of continuous measurement in D-wave using atomic superheterodyne<sup>[67]</sup>

在基于里德堡原子的微波电场传感技术体系中，工作带宽与瞬时带宽均是制约其工程化应用的核心参数。瞬时带宽的定义为拍频或调制信号响应的3 dB带宽，其取值本质上由原子能级的寿命特性决定<sup>[68]</sup>。山西大学<sup>[69]</sup>的研究表明：在瞬时带宽范围内，量子投影噪声成为主导噪声源，严重影响传感系统的检测精度与动态性能。

基于理论建模与实验创新，瞬时带宽的优化研究取得了一系列突破性进展。2020年，山西大学研究团队<sup>[35]</sup>首次将超外差机制引入瞬时带宽研究，实现了± 150 kHz的瞬时带宽指标。随着技术创新，中国科学院量子信息重点实验室<sup>[46]</sup>借助AC Stark位移效应与外差检测技术的融合，在30 MHz微波电场检测场景下，将瞬时带宽拓展至0.8 MHz。山西大学激光光谱研究所<sup>[53]</sup>提出非共振外差与双光子AT分裂的协同方案，进一步将带宽

提升至1.9 MHz。基于非共振射频外差技术,中国科学院大学刘修彬等人<sup>[62]</sup>成功实现4 MHz的瞬时带宽突破。近年来,瞬时带宽的研究重点逐渐转向多频段并行处理与高速采样技术。美国陆军研

究实验室<sup>[70]</sup>开发基于多里德堡态协同的多频段多共振响应特性同时解调方法,能级方案与装置如图10所示,实现了对宽频段射频信号的检测,瞬时带宽达6.1 MHz。

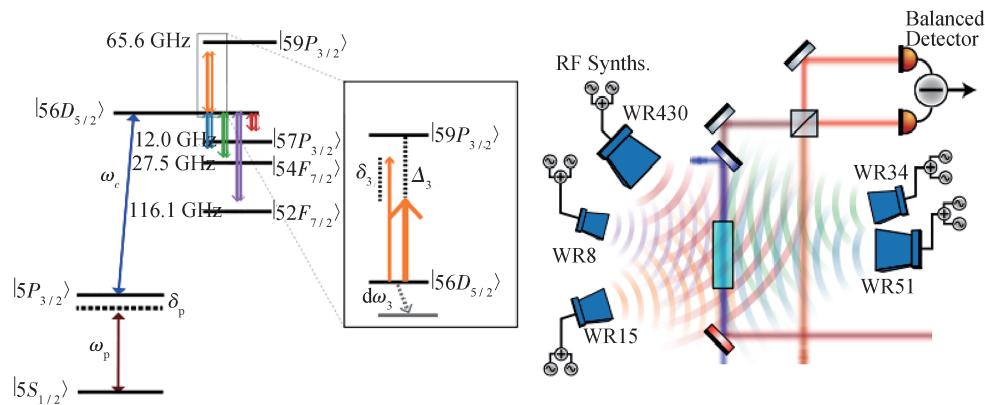
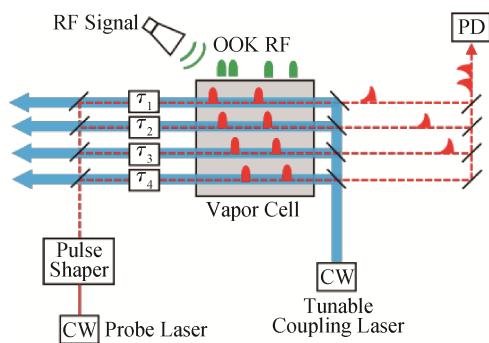


图10 能级方案和装置示意图<sup>[70]</sup>  
Fig.10 Energy levels and experimental setup<sup>[70]</sup>

美国L3Harris Technologies公司<sup>[71]</sup>创新性地采用空间分割与交错脉冲探测的激光技术构建连续采样机制。如图11所示,通过搭建同步多传输模块(Synchronous Time-based Multitasking, STM)接收机,使连续波探测激光通过脉冲整形器产生一串探测脉冲。该探测脉冲被分成不同的空间路径穿过气室,每个探测光束单独与耦合光束反向传播;经过气室后,探测光束交汇并由光电探测器收集。该STM接收机成功将测量瞬时带宽提升至100 MHz,为基于里德堡原子的微波电场传感技术迈向宽带化、实时化应用奠定了坚实基础。



注: CW为Continuous Wave缩写,即连续波;  $\tau$ 为延迟时间。

图11 高采样率4路STM接收机示意图<sup>[71]</sup>  
Fig.11 Schematic diagram of high sampling rate 4-channel STM receiver<sup>[71]</sup>

工作带宽表征测量系统的频率覆盖范围,而瞬时带宽则决定其在固定工作点下对信号的瞬时响应能力。对于实验室的原理验证和定点测量,宽泛的工作带宽是其主要优势。然而,一旦应用于雷达、通信、电子战等场景,信号环境瞬息万变,高瞬时带宽的重要性就完全超过了工作带宽,其响应速度受到原子自身动力学的限制,主要由里德堡态的寿命和原子间的相互作用决定(即受限于EIT谱线的线宽)<sup>[72]</sup>。传统测量方案的瞬时带宽被限制在几百kHz量级,目前的工作实现了10~100 MHz的瞬时带宽优化。但是对标军用雷达的侦察、探测,目前还有较大的差距。提升瞬时带宽成为未来重点发展方向。

### 3 结论与展望

随着量子技术的发展,里德堡原子在微波测量领域展现出显著潜力。尽管基于EIT-AT的微波测量方法一直是研究重点,但其在弱场测量方面存在明显局限。近年来,超外差技术与里德堡原子相结合的新型测量方案为该领域带来了重要突破。

超外差技术通过将高频微波信号与本地振荡信号混频,将高频转换至中频,从而有效检测微弱信号。在里德堡原子体系中引入该技术,能够

克服传统EIT-AT方法的部分局限。当前研究主要集中在提升检测灵敏度、扩展动态范围以及实现高精度相位测量等方面。通过优化原子激发条件和超外差系统参数,可增强对弱信号的响应能力;动态范围的拓宽则使系统能够适应从微弱至较强等多种信号强度;相位检测方面,则充分利用原子的量子干涉特性与超外差处理优势,实现了高精度测量。

传统航空雷达通过无线电波发射和接收信号,基于电磁波的反射和传播特性来获取目标的距离、方位、到达角等参数。其探测灵敏度受热噪声极限限制,探测频宽受Chu极限限制,对微弱信号探测能力弱,功能单一且系统庞大。里德堡原子超外差微波测量技术归属于“经典发射,量子接收”类型的量子雷达<sup>[73]</sup>,理论上仅受量子噪声极限<sup>[69]</sup>制约,探测灵敏度可提升3个数量级,频率覆盖DC~THz且无Chu极限限制;该技术集成度高,可适应多种应用环境并进行多信息参数的快速获取,利用间距仅几毫米的2束光束即可实现传统方案中需多个远距离天线才能完成的到达角测量。针对未来机载航空雷达高瞬时带宽、高灵敏度、快速响应的性能需求以及小型化、高鲁棒性的载荷需求,里德堡原子雷达提供了绝佳的解决方案。

目前,里德堡原子超外差微波测量技术研究已实现卫星通信信号接收<sup>[74]</sup>、雷达回波信号感知<sup>[75]</sup>等实验室验证。虽然量子投影噪声是里德堡原子雷达主导噪声源,但其测量精度仍受传统噪声影响(如热原子带来的输运噪声、光电转换噪声、无源链路传输噪声、模数转换采样前由硬件引入的其他可能的噪声);探测环境因素(如温度和原子气室纯度)也可能影响能级结构及相互作用的稳定性,进而制约测量的可靠性与重复性。

因此,推动技术从实验室迈向航空装备应用可清晰地划分为3个具有逻辑连续性的发展阶段:①核心单元的芯片化集成;②系统级的环境适应性强化;③最终面向任务的网络化协同感知。每一个阶段都旨在攻克从前一阶段衍生出的核心挑战,并奠定下一阶段发展的基础。

第一阶段的核心任务是实现核心单元的芯片化与集成化,旨在集成微型激光器<sup>[76]</sup>、光路电路

与原子气室<sup>[77]</sup>,解决体积、重量与可制造性等根本性约束。该阶段聚焦于将庞大的光学平台压缩至芯片尺度,其关键技术路径包括:①采用微机电系统工艺,在晶圆级制造内部维持超高真空并充有碱金属原子的微型气室;②基于光子集成电路技术,将所需的多波长窄线宽激光器、微型化原子频率参考以及光信号调制与路由功能集成于单一芯片;③最终通过先进的系统级封装技术,将微型原子气室、光子芯片、微波电路与光电探测器集成为标准一体化的功能模块。此阶段的成功实施,是将该技术从实验室分立器件系统转化为可批量制备、具备初步部署形态的关键前提。

第二阶段致力于完成系统级的环境适应性强化,目标是使精密的量子传感模块能够在真实的航空器恶劣环境中稳定、可靠工作。这一阶段的挑战主要来源于宽温域、强机械振动与冲击,以及复杂的舱内电磁干扰。工程解决方案通常借鉴机载重力仪<sup>[78]</sup>的稳频控制、星载冷原子干涉仪<sup>[79]</sup>的隔振设计及可搬运光钟<sup>[80]</sup>的鲁棒性架构等,构建一个复合的多物理场防护体系:在机械层面,采用主被动混合隔振技术隔离基础振动;在热学层面,设计精密的多级主动温控系统以维持内部热稳定性;在电磁层面,则需集成多层磁屏蔽结构以抑制背景磁场噪声。更为关键的是,需在硬件防护的基础上,引入基于现场可编程门阵列的智能测控系统,植入自适应滤波、自抗扰控制等算法,使系统能够实时感知自身状态与环境扰动,并实现参数的动态闭环优化与锁定,最终达成高鲁棒性的“即开即用”操作模式,完成从精密仪器向坚固装备的转化。

第三阶段是面向最终应用场景的网络化协同感知能力构建,标志着该技术从单一测量节点向智能感知体系的维度跃升。其核心思想是通过分布式部署多个前述阶段产出的高鲁棒性微型传感节点,构建一个空间分布的量子传感阵列。借助高精度时空同步网络,将各节点的数据汇聚至融合处理中心。通过信号处理算法对多通道数据进行相干合成或关联分析,不仅能在系统层面实现信噪比的理论提升,更能利用波达方向估计、压缩感知等计算成像方法,反演出外部微波场的空

间强度分布与来波方向, 实现从点测量到场成像的跨越。进一步, 结合人工智能算法对多模态感知数据进行挖掘, 该网络化平台能够智能识别复杂电磁环境中的特定辐射源特征, 抑制干扰, 并有望集成无源探测、频谱监测乃至安全通信等多种功能, 从而演进为未来航空装备体系中, 提供高精度、高灵敏、抗干扰的量子增强型电磁态势感知能力的关键节点。

综上所述, 里德堡原子超外差技术的实用化路径, 是一条深度融合了量子光学、微纳加工、精密电子、控制理论及信息科学的跨学科系统工程路线。它遵循着从基础器件集成、到系统装备淬炼、最终迈向体系化智能感知的内在发展逻辑, 是推动该前沿技术从实验演示走向实际应用的必然选择。

### 参考文献

- [1] KRAUS J D. Heinrich Hertz - theorist and experimenter [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1988, 36(5): 824-829.
- [2] BONDYOPADHYAY P K. Guglielmo Marconi-the father of long distance radio communication-an engineer's tribute [C]// 1995 25th European Microwave Conference. IEEE, 1995, 2: 879-885.
- [3] KANDA M. Standard antennas for electromagnetic interference measurements and methods to calibrate them [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1994, 36(4): 261-273.
- [4] DEGEN C L, REINHARD F, CAPPELLARO P. Quantum sensing [J]. Reviews of Modern Physics, 2017, 89(3): 035002.
- [5] TU H T, LIAO K Y, WANG H L, et al. Approaching the standard quantum limit of a Rydberg-atom microwave electrometer[J]. Science Advances, 2024, 10(51): eads0683.
- [6] GALLAGHER T F. Rydberg atoms[J]. Reports on Progress in Physics, 1988, 51(2): 143.
- [7] LIU B, ZHANG L, LIU Z, et al. Electric field measurement and application based on Rydberg atoms[J]. Electromagnetic Science, 2023, 1(2): 1-16.
- [8] SEDLACEK J A, SCHWETTMANN A, KÜBLER H, et al. Microwave electrometry with Rydberg atoms in a vapour cell using bright atomic resonances [J]. Nature Physics, 2012, 8(11): 819-824.
- [9] LIAO K Y, TU H T, YANG S Z, et al. Microwave electrometry via electromagnetically induced absorption in cold Rydberg atoms [J]. Physical Review A, 2020, 101(5): 053432.
- [10] WU Y Y, HE Y H, JIAO Y C, et al. Microwave field sensor based on cold cesium Rydberg three-photon electromagnetically induced spectroscopy [J]. Chinese Physics B, 2024, 33(11): 113201.
- [11] DUVERGER R, BONNIN A, GRANIER R, et al. Metrology of microwave fields based on trap-loss spectroscopy with cold Rydberg atoms [J]. Physical Review Applied, 2024, 22(4): 044039.
- [12] JAMIESON M J, ADAMS C S, WEATHERILL K J, et al. Continuous-time ultrahigh-frequency sensing using cold Rydberg atoms [J]. Physical Review Applied, 2025, 24(3): 034022.
- [13] ZHOU F, JIA F, LIU X, et al. Improving the spectral resolution and measurement range of quantum microwave electrometry by cold Rydberg atoms [J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2023, 56(2): 025501.
- [14] 周飞, 贾凤东, 刘修彬, 等. 基于冷里德堡原子电磁感应透明的微波电场测量[J]. 物理学报, 2023, 72(04): 191-198.
- ZHOU F, JIA F D, LIU X B, et al. Measurement of microwave electric field based on electromagnetically induced transparency by using cold Rydberg atoms [J]. Acta Physica Sinica, 2023, 72(4): 045204. (in Chinese)
- [15] ZHANG L H, LIU Z K, LIU B, et al. Rydberg microwave-frequency-comb spectrometer [J]. Physical Review Applied, 2022, 18(1): 014033.
- [16] LIU B, ZHANG L H, LIU Z K, et al. Highly sensitive measurement of a megahertz rf electric field with a Rydberg-atom sensor [J]. Physical Review Applied, 2022, 18(1): 014045.
- [17] KWAK M H, JEONG T, LEE Y, et al. Microwave-induced three-photon coherence of Rydberg atomic states [J]. Optics Communications, 2016, 380: 168-173.
- [18] RIPKA F, LUI C, SCHMIDT M, et al. Rydberg atom-based radio frequency electrometry: hyperfine effects [C]// Optical and Quantum Sensing and Precision Metrology II. SPIE, 2022, 12016: 102-107.
- [19] VOGT T, GROSS C, GALLAGHER T F, et al. Micro-

- wave-assisted Rydberg electromagnetically induced transparency[J]. Optics Letters, 2018, 43(8): 1822–1825.
- [20] ANDERSON D A, PARADIS E G, RAITHEL G. A vapor-cell atomic sensor for radio-frequency field detection using a polarization-selective field enhancement resonator[J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(7): 073501.
- [21] HOLLOWAY C L, PRAJAPATI N, ARTUSIO-GLIMPSE A B, et al. Rydberg atom-based field sensing enhancement using a split-ring resonator[J]. Applied Physics Letters, 2022, 120(20): 204001.
- [22] SIMONS M T, HADDAB A H, GORDON J A, et al. Embedding a Rydberg atom-based sensor into an antenna for phase and amplitude detection of radio-frequency fields and modulated signals [J]. IEEE Access, 2019, 7: 164975–164985.
- [23] YUAN J, YANG W, et al. Quantum sensing of microwave electric fields based on Rydberg atoms[J]. Reports on Progress in Physics, 2023, 86(10): 106001.
- [24] JING M Y, HU Y, MA J, et al. Atomic superheterodyne receiver based on microwave-dressed Rydberg spectroscopy[J]. Nature Physics, 2020, 16(9): 911–915.
- [25] ADAMS C S, PRITCHARD J D, SHAFFER J P. Rydberg atom quantum technologies [J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2019, 53(1): 012002.
- [26] MARANGOS J P. Electromagnetically induced transparency[J]. Journal of Modern Optics, 1998, 45(3): 471–503.
- [27] 赵慧敏. 相干驱动原子气体中光子对自发产生与非互易光传输的新机制研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2024.
- ZHAO H M. New mechanisms for spontaneous generation of photon pairs and nonreciprocal optical transmission in coherently driven atomic gases[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2024. (in Chinese)
- [28] GEA-BANACLOCHE J, LI Y, JIN S, et al. Electromagnetically induced transparency in ladder-type inhomogeneously broadened media: theory and experiment [J]. Physical Review A, 1995, 51(1): 576.
- [29] SANDHYA S N, SHARMA K K. Atomic coherence effects in four-level systems: doppler-free absorption within an electromagnetically-induced-transparency window[J]. Physical Review A, 1997, 55(3): 2155.
- [30] FAN H, KUMAR S, SEDLACEK J, et al. Atom based RF electric field sensing [J]. Journal of Physics: B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2015, 48(20): 202001.
- [31] MOHAPATRA A K, JACKSON T R, ADAMS C S. Coherent optical detection of highly excited Rydberg states using electromagnetically induced transparency[J]. Physical Review Letters, 2007, 98: 113003.
- [32] ARORA B, SAFRONOVA M S, CLARK C W. Determination of electric-dipole matrix elements in K and Rb from Stark shift measurements[J]. Physical Review A, 2007, 76(5): 052516.
- [33] 闫萌, 朱中浩. 一种小步进低杂散超外差接收机本振源设计[C]// 2021年全国微波毫米波会议论文集(下册), 2021.
- YAN M, ZHU Z H. Design of a local oscillator source with small step size and low spurious for a superheterodyne receiver[C]// Proceedings of the 2021 National Conference on Microwave and Millimeter Wave (Volume II), 2021. (in Chinese)
- [34] 潘莉莉, 周煜, 孙建峰, 等. 激光雷达部分相干外差探测接收特性研究[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1228002.
- PU L L, ZHOU Y, SUN J F, et al. Research on heterodyne detection receiving characteristics of partially coherent Lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1228002. (in Chinese)
- [35] 王馨仪. 超外差接收机的基本原理与发展历程[J]. 产业与科技论坛, 2016, 15(12): 67.
- WANG X Y. The basic principle and development history of superheterodyne receiver[J]. Industry and Science Tribune, 2016, 15(12): 67. (in Chinese)
- [36] 白金海, 胡栋, 贡昊, 等. 里德堡原子微波电场测量[J]. 计测技术, 2021, 41(1): 1–9.
- BAI J H, HU D, GONG H, et al. Rydberg-atoms-based microwave electric field sensing[J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 12(1): 1–9. (in Chinese)
- [37] FAN H, KUMAR S, SEDLACEK J, et al. Atom based RF electric field sensing [J]. Journal of Physics: B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2015, 48(20): 202001–202016.
- [38] ZHANG H, MA Y, LIAO K, et al. Rydberg atom electric field sensing for metrology, communication and hybrid quantum systems[J]. Science bulletin, 2024, 69(10): 1515–1535.

- [39] YUAN J, YANG W, JING M, et al. Quantum sensing of microwave electric fields based on Rydberg atoms [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2023, 86(10): 106001.
- [40] DEFENU N, DONNER T, MACRÌ T, et al. Long-range interacting quantum systems [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2023, 95(3): 1.
- [41] SCHLOSSBERGER N, PRAJAPATI N, BERWEGER S, et al. Rydberg states of alkali atoms in atomic vapour as SI -traceable field probes and communications receivers [J]. *Nature Reviews Physics*, 2024, 6(10): 606–620.
- [42] 景明勇. 基于里德堡原子的微波超外差精密测量研究 [D]. 太原: 山西大学, 2020.
- JING M Y. Microwave superheterodyne precision measurement based on Rydberg atoms [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020. (in Chinese)
- [43] 杨凯, 毛瑞棋, 孙占山, 等. 基于里德堡原子外差传感器的宽带高灵敏探测 [J]. 光学学报, 2023, 43(17): 278–284.
- YANG K, MAO R Q, SUN Z S, et al. Broadband and highly sensitive detection based on Rydberg atomic heterodyne sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43 (17) : 1728001. (in Chinese)
- [44] 杨凯, 孙占山, 李健兵, 等. 基于 Rydberg 原子外差技术的高灵敏电场测量 [C]// 中国电子学会. 2023 年全国微波毫米波会议论文汇编(五). 长沙: 国防科技大学, 2023: 52–54.
- YANG K, SUN Z S, LI J B, et al. High-sensitivity electric field measurement based on Rydberg atomic heterodyne technique [C]// Chinese Institute of Electronics. Proceedings of the 2023 National Conference on Microwave and Millimeter Wave (Volume V). Changsha: National University of Defense Technology, 2023: 52–54. (in Chinese)
- [45] GORDON J A, SIMONS M T, HADDAB A H, et al. Weak electric-field detection with sub-1 Hz resolution at radio frequencies using a Rydberg atom-based mixer [J]. *Aip Advances*, 2019, 9(4): 045030.
- [46] LIU B, ZHANG L H, LIU Z K, et al. Highly sensitive measurement of a megahertz rf electric field with a Rydberg - atom sensor [J]. *Physical Review Applied*, 2022, 18 (1): 014045.
- [47] YAO J, AN Q, ZHOU Y, et al. Sensitivity enhancement of far-detuned RF field sensing based on Rydberg atoms dressed by a near-resonant RF field [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(20): 5256–5259.
- [48] JIA F D, LIU X B, MEI J, et al. Span shift and extension of quantum microwave electrometry with Rydberg atoms dressed by an auxiliary microwave field [J]. *Physical Review A*, 2021, 103(6): 063113.
- [49] YUAN J, JIN T, WANG L, et al. Improvement of microwave electric field measurement sensitivity via dual-microwave-dressed electromagnetically induced transparency in Rydberg atoms [J]. *Laser Physics Letters*, 2022, 19 (12): 125207.
- [50] HU J, LI H, SONG R, et al. Continuously tunable radio frequency electrometry with Rydberg atoms [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 121(1): 014002.
- [51] YOU S H, CAI M H, ZHANG S S, et al. Microwave-field sensing via electromagnetically induced absorption of Rb irradiated by three - color infrared lasers [J]. *Optics Express*, 2022, 30(10): 16619–16629.
- [52] LIANG Y, WANG Q, WANG Z, et al. Cavity-enhanced Rydberg atomic superheterodyne receiver [J]. *Optics Express*, 2025, 33(6): 13034–13039.
- [53] WANG Q, LIANG Y, WANG Z, et al. High-precision measurement of microwave electric field by cavity - enhanced critical behavior in a many-body Rydberg atomic system [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2025, 68(6): 1–6.
- [54] PRAJAPATI N, ROBINSON A K, BERWEGER S, et al. Enhancement of electromagnetically induced transparency based Rydberg - atom electrometry through population repumping [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119 (21): 214001.
- [55] LIU X H, LIAO K Y, ZHANG Z X, et al. Continuous-frequency microwave heterodyne detection in an atomic vapor cell [J]. *Physical Review Applied*, 2022, 18 (5) : 054003.
- [56] WU S, NI R, GONG C, et al. Atomic superheterodyne receiver sensitivity estimation based on homodyne readout [C]// 2024 IEEE INC - USNC - URSI Radio Science Meeting (Joint with AP - S Symposium). IEEE, 2024: 193–194.
- [57] 彭瑜, 施清平, 霍虎, 等. 精密光学教学中基于超稳腔实现窄线宽性能的方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(08): 081402.
- PENG Y, SHI Q P, HUO H, et al. Realization of narrow linewidth property based on ultra-stable cavity in precision

- optics teaching [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(8): 081402. (in Chinese)
- [58] 高蓓, 蒋源, 彭文鑫, 等. 可移动光学超稳腔的研制及其稳定性测试 [J]. *激光与红外*, 2024, 54(6): 852–857.
- GAO B, JIANG Y, PENG W X, et al. Development and stability test of a transportable optical ultra-stable cavity [J]. *Laser & Infrared*, 2024, 54(6): 852–857. (in Chinese)
- [59] 贾凤东, 郝建海, 崔越, 等. 基于里德堡原子的微波全信息测量 [J]. *计测技术*, 2024, 44(1): 1–22.
- JIA F D, HAO J H, CUI Y, et al. Microwave full-information measurement based on Rydberg atoms [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2024, 15(1): 1–22. (in Chinese)
- [60] SIMONS M T, HADDAB A H, GORDON J A, et al. A Rydberg atom-based mixer: measuring the phase of a radio frequency wave [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(11): 114101.
- [61] JIA F D, ZHANG H Y, LIU X B, et al. Transfer phase of microwave to beat amplitude in a Rydberg atom-based mixer by Zeeman modulation [J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2021, 54(16): 165501.
- [62] LIU X B, JIA F D, ZHANG H Y, et al. An all-optical phase detector by amplitude modulation of the local field in a Rydberg atom-based mixer [J]. *Chinese Physics B*, 2022, 31(9): 090703.
- [63] 张力华. 基于里德堡原子的宽频电场测量研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2024.
- ZHANG L H. Research on broadband electric field measurement based on Rydberg atoms [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2024. (in Chinese)
- [64] SIMONS M T, ARTUSIO-GLIMPSE A B, HOLLOWAY C L, et al. Continuous radio-frequency electric-field detection through adjacent Rydberg resonance tuning [J]. *Physical Review A*, 2021, 104(3): 032824.
- [65] MEYER D H, KUNZ P D, COX K C. Waveguide-coupled Rydberg spectrum analyzer from 0 to 20 GHz [J]. *Physical Review Applied*, 2021, 15(1): 014053.
- [66] ZHANG L H, LIU Z K, LIU B, et al. Floquet engineering Rydberg sub-THz frequency comb spectroscopy [J]. *Applied Physics*, 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2404.07433.
- [67] CHAI J, LIU Y, ZHANG Y, et al. Continuous-frequency electric field measurements of D-Band terahertz wave based on Rydberg atoms [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2025, 46(3): 20.
- [68] COX K C, MEYER D H, FATEMI F K, et al. Quantum-limited atomic receiver in the electrically small regime [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(11): 110502.
- [69] WANG Z, JING M, ZHANG P, et al. Noise analysis of the atomic superheterodyne receiver based on flat-top laser beams [J]. *Optics Express*, 2023, 31(12): 19909–19917.
- [70] MEYER D H, HILL J C, KUNZ P D, et al. Simultaneous multiband demodulation using a Rydberg atomic sensor [J]. *Physical Review Applied*, 2023, 19(1): 014025.
- [71] KNARR S H, BUCKLEW V G, LANGSTON J, et al. Spatiotemporal multiplexed Rydberg receiver [J]. *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, 2023, 4: 1–8.
- [72] MEYER D H, COX K C, FATEMI F K, et al. Digital communication with Rydberg atoms and amplitude-modulated microwave fields [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(21): 211104.
- [73] 张晴雪, 张欣亮. 量子雷达技术的研究现状及应用发展趋势探究 [J]. *新技术新工艺*, 2024, (8): 17–21.
- ZHANG Q X, ZHANG X L. Exploration on the research status and application development trend of quantum radar technology [J]. *New Technology & New Process*, 2024 (8): 17–21. (in Chinese)
- [74] LEI M, ZHANG J, LUO Q, et al. Satellite signal detection via Rydberg-atom receiver [J]. *Quantum Physics*, 2025, arXiv: 2506.15439.
- [75] 夏凌昊, 肖俊祥, 董屾, 等. 里德堡原子雷达接收灵敏度极限 [J]. *微波学报*, 2024, 40(2): 1–7.
- XIA L H, XIAO J X, DONG S, et al. Fundamental sensitivity limit of Rydberg atom radar receivers [J]. *Journal of Microwaves*, 2024, 40(2): 1–7. (in Chinese)
- [76] 刘雄, 贾志伟, 赵爱忠, 等. 集成宽带混沌半导体激光器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(15): 1514003.
- LIU X, JIA Z W, ZHAO A Z, et al. Integrated broadband chaotic semiconductor laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(15): 1514003. (in Chinese)
- [77] 林沂, 吴逢川, 毛瑞棋, 等. 三端口光纤耦合原子气室探头的开发及其微波数字通信应用 [J]. *物理学报*, 2022, 71(17): 170702.
- LIN Y, WU F C, MAO R Q, et al. Development of three-

- port fiber-coupled atomic vapor cell probe and its application in microwave digital communication [J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(17): 170702. (in Chinese)
- [78] 张旭, 颜树华, 李期学, 等. 基于车载原子干涉仪的野外流动重力测量[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(9): 96–103.
- ZHANG X, YAN S H, LI Q X, et al. Field mobile gravity measurement based on vehicle-mounted atom interferometer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(9): 96–103. (in Chinese)
- [79] 祝竺, 段小春, 廖鹤, 等. 卫星平台扰动对星载原子干涉重力梯度仪测量影响分析[J]. 中国惯性技术学报, 2022, 30(3): 372–377.
- ZHU Z, D X C, LIAO H, et al. Analysis of influence of satellite platform disturbance on measurement of space-borne atom-interferometric gravity gradiometer [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2022, 30(3): 372–377. (in Chinese)
- [80] 黄垚, 管桦, 高克林. 高精度可搬运钙离子光钟[J]. 物理, 2021, 50(3): 149–154.
- HUANG Y, GUAN H, GAO K L. Transportable high-precision calcium ion optical clock [J]. *Physics*, 2021, 50(3): 149–154. (in Chinese)
- (本文编辑: 李成成)
- 
- 第一作者: 杜强(2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为量子精密测量、里德堡原子微波测量。
- 
- 通信作者: 白金海(1988—), 男, 工程师, 主要研究方向为量子精密测量。参与并主持多项量子测量相关科研项目, 作为主要参与者研制了冷原子干涉绝对重力仪。
- 