

激光与光电子学进展

基于里德堡原子的无线电波测量

郝赫*, 寇军, 洪玄淼, 杜石桥, 黄媛媛, 秦国卿, 马骏超, 史展, 吴同, 张梦, 高红卫, 李贵兰**

北京无线电测量研究所, 北京 100039

摘要 里德堡原子无线电波传感器的出现正在推动现代传感和测量方式的转变, 利用量子效应实现经典无线电波测量无法比拟的全新探测能力。本文回顾了基于里德堡原子的无线电波测量进展, 梳理了领域发展脉络, 详细介绍了无线电波测量灵敏度极限并展望了未来的发展趋势。该研究将助力领域的发展以及工程应用的推进。

关键词 原子; 里德堡; 无线电波; 灵敏度

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230703

Radio Frequency Electric Field Measurement with Rydberg Atoms

Hao He*, Kou Jun, Hong Xuanmiao, Du Shiqiao, Huang Yuanyuan, Qin Guoqing,
Ma Junchao, Shi Zhan, Wu Tong, Zhang Meng, Gao Hongwei, Li Guilin**

Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing, 100039, China

Abstract The emergence of Rydberg atom technologies is driving a paradigm shift in modern sensing and measurement by exploiting quantum phenomena to realize fundamentally new detection capabilities unmatched by their classical counterparts. This article reviews the development of radio frequency of electric field measurement with Rydberg atoms, details the sensitivity of electrical field, and looks forward to the future development trend. It will help the vigorous development of the field and the promotion of engineering.

Key words atom; Rydberg; radio frequency electric field; sensitivity

1 引言

无线电波测量是雷达、通信、定位导航、气象预测、遥感测绘、电子对抗的基础。近些年来,受电子热噪声和天线尺寸效应的限制,经典无线电波测量体系逐渐难以满足国防和前沿科技等领域对灵敏度、带宽、动态范围、集约化等方面的应用需求。人们开始寻求量子科技的帮助,发展基于量子体系的无线电波测量技术。里德堡原子是处于高主量子数的激发态原子,具有丰富的能级资源、巨大的跃迁偶极矩和百微秒量级的相干时间。这些特点使得里德堡原子对无线电波响应极为敏感。同时,随着原子蒸气池加工工艺的发展、量子态光学读取里德堡态原子信号的实现,基于里德堡原子的无线电波测量平台已经在灵敏度、窄带响应特征及宽带可调谐性、电极小接收、空间电场特征刻画等方面显示出极大的潜力。本文针对里德堡原子无线电波测量近年来的发展研究进行综述,讨论了里德堡无线

电波测量的灵敏度,并对潜在应用空间及发展趋势作出了展望,为里德堡原子无线电波测量未来的发展提供了参考。

2 里德堡原子无线电波测量进展

2012年美国奥克拉荷马大学的Sedlacek等^[1]研究小组率先提出了利用里德堡原子无线电波测量的方案。他们利用电磁诱导透明(EIT)光谱测量技术,将无线电波精密测量溯源到普朗克常数上,实现了对经典无线电波测量体系的突破,开启了里德堡原子无线电波测量的先河。虽然实现了可溯源的无线电波强度测量,然而其仅能实现约 $\text{mV} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 量级的探测灵敏度。此后,该研究团队发展了色散光谱^[2]、频率调制光谱^[3]以及平衡零拍探测^[4]等技术进一步提高测量灵敏度,并于2017年实现了 $3 \mu\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 的测量灵敏度。同时,人们尝试了基于频率失谐^[5]、塞曼分裂频率调制光谱^[6]、幅度调制光谱^[7]、多载波调制^[8]、冷原

收稿日期: 2023-02-27; 修回日期: 2023-05-08; 录用日期: 2023-05-11; 网络首发日期: 2023-05-22

通信作者: *Hehao@casic.com.cn; **liguilan1981@aliyun.com

子^[9]以及优化原子体系参数^[10-11]等方案进一步提高灵敏度,并分别表现出了一些较小的进步。此后,里德堡无线电波测量迎来了应用领域的拓展。美国密歇根大学的 Raithel 研究小组则致力于开发里德堡原子传感器新的潜在应用,包括微波电场极化测量、微波电场的亚波长成像^[12]、强微波电场的精密测量^[13]、原子无线电波传感器在通信领域的应用以及基于原子传感器的太赫兹测量^[14]。在亚波长成像和太赫兹测量方面,Adams 研究小组^[15]于 2017 年基于里德堡原子实现了实时的亚波长太赫兹成像,2018 年提出了基于里德堡双稳态进行太赫兹测量的方案^[16],并于 2020 年实现了 kHz 帧率的太赫兹成像^[17],证明了里德堡原子微波电场传感器可以应用在太赫兹成像领域。在通信方面,美国陆军研究实验室的 Kunz 小组^[18]于 2018 年证明了在传感器尺寸远小于电磁波波长的情况下,里德堡原子无线电传感器可以有效克服天线尺寸效应,具有相对于传统微波测量系统的明显优势。该研究成果证明了里德堡原子无线电传感器具有替代传统微波电场测量系统,应用于小尺寸集成通信系统的潜力。

2020 年,里德堡原子无线电波测量迎来了另一个里程碑事件。山西大学团队提出了原子超外差接收机结构,实现了 $55 \text{ nV} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 的测量灵敏度,将测量灵敏度突破性地提高了约 3 个数量级,使得该结构更容易达到投影噪声极限^[19]。美国国家标准与技术研究院的 Gordon 等^[20-21]也同时使用了该技术,并提出了布居再泵浦的方法,将自己设备的灵敏度进一步提高了约 2 倍^[22]。为了充分发挥里德堡原子传感器的量子非破坏测量特点,人们分别提出了基于光腔和谐振器与里德堡原子结合的测量方案^[23-26],该方案极有可能实现超越经典超外差接收机的测量灵敏度,从而实现了对经典无线电波测量体系的颠覆性突破。同时,Holloway、Raithel、中北大学 Liu 研究小组等^[27-31]也进行了一些基于微波谐振结构的初步实验。在低频领域,2021 年美国桑迪亚哥实验室实现了低于 1 kHz 的低频电场测量^[32],主要是通过使用蓝宝石玻璃等低电磁屏蔽率的材料来有效降低电磁屏蔽对实验测量的影响。2022 年 Holloway 等^[33]基于里德堡原子实现了可溯源的电压测量,同年山西大学团队实现了连续可调谐的里德堡电场计^[34]以及基于不同里德堡终态的多带通信^[35]。Kunz 研究团队拓展了原子传感器在电极小方面的应用^[36]。在相位测量方面,Raithel 研究团队^[37]于 2022 年提出了全光学参量的基于原子干涉仪的相位测量方案。2022 年中国科学院大学 Ding 研究团队^[38]实现了 MHz 频段微波电场的外差测量,并基于多体里德堡原子系统的临界点实现了增强的计量^[39]。为了提高里德堡原子的响应带宽,Shaffer 研究团队^[40]提出了基于自差拍频率梳读出和制备的里德堡原子电场计,实现了无需激光扫描的基于 AT 分裂光谱的原子电场计,提高了电场计的瞬时响应,Zhang

等^[41]基于微波频梳实现了响应带宽的拓展,Jia 等^[42]提出了一些拓展原子测量带宽的方案。理论上,Shaffer 研究团队^[43]证明达到投影噪声极限灵敏度的里德堡原子传感器将具有远优于经典体系的测量灵敏度。科罗拉多大学的 Santamaria-Botello 等^[44]从噪声温度的角度对电子学微波接收机和里德堡原子接收机进行了比较。国防科技大学的 Fu 研究团队^[45]实现了光纤集成的里德堡原子传感器,并展示了其在成像中的应用。近些年来也有一些相关研究方向的综述性论文发表^[46-49]。

3 里德堡原子无线电波测量灵敏度

里德堡原子无线电波测量的灵敏度一直是各个研究团队关注的重点。在现有基于里德堡原子电磁诱导透明(EIT)的测量机制上,探测光和耦合光将碱金属原子制备到里德堡态,此时无线电波的作用相当于在里德堡原子能级上增加了一个微扰,使里德堡原子能级发生移动,通过 EIT 光谱读出能级移动量,从而实现无线电波的测量。当无线电波的频率近共振于里德堡原子邻近能级跃迁频率时,能级发生移动的大小 ΔE 依赖于外加无线电波。

$$E_{\text{mw}} = \frac{\hbar \Delta E}{u} = 2\pi \frac{\hbar D}{u} \Delta f, \quad (1)$$

式中: \hbar 为约化普朗克常量; u 为里德堡原子的跃迁偶极矩; Δf 是无线电波引起的 AT 谱分裂宽度; D 为多普勒因子; E_{mw} 为待测无线电波的电场强度。因此,通过 EIT 光谱精确测量里德堡原子能级的变化,就可以精确计算被测无线电波的电场强度。然而,如何确定里德堡原子无线电波测量的灵敏度以及将近共振测量拓展到宽频范围,依然是一个难点。Kunz 研究团队^[50]率先给出了一种理想化的解决方案。在无线电波测量过程中,定义信噪比为

$$R_{\text{SNR}} = \frac{\varphi}{\Delta\varphi}, \quad (2)$$

式中:相位噪声 $\Delta\varphi = 1/\sqrt{N}$ 为标准量子极限; N 表示有效原子数; φ 是在有效测量时间内引起的相位变化,其由无线电波导致的能级移动 ΔE 与有效测量时间 τ 有关,即 $\varphi = \Delta E \tau$ 。有效测量时间 τ 与实际测量时间 t 和原子相干时间 T_c 有关,其可以表示为

$$\tau = \begin{cases} t, & t < T_c \\ \sqrt{\frac{T_c}{t}} t, & t > T_c \end{cases}. \quad (3)$$

无线电波作用下的能级移动 ΔE 可以利用弗洛凯理论得到。于是,基于里德堡原子的无线电测量的最小电场强度便是在给定有效原子数和 1 s 的测量时间内,使信噪比 $R_{\text{SNR}} = 1$ 的电场强度。为了将里德堡原子无线电测量灵敏度拓展到非共振情况,在具体计算

中,将信噪比表示为

$$R_{\text{SNR}} = \frac{\Delta E \tau}{1/\sqrt{N}} = \sqrt{N} \Delta E \tau = \alpha E_{\text{mw}}^{\beta} \quad (4)$$

通过计算一系列无线电波强度下的信噪比值,可以拟合出系数 α 与 β : 当 $\beta = 1$ 时,对应无线电波频率与里德堡邻近能级近共振; 当 $\beta \neq 1$, 对应非共振情况。这样,基于里德堡原子的无线电测量的最小可测电场便可以表示为

$$E_{\text{mw}} = \alpha^{-\beta^{-1}} \quad (5)$$

当无线电波的频率处于低频段,远低于邻近里德堡原子能级差时,里德堡原子感知到的无线电波

相当于一个直流信号,最小可测无线电波电场强度表示为

$$E_{\text{mw}} = \sqrt{\frac{2Rh\sqrt{e}}{(a_0e)^2 n^7 \sqrt{NT_c t}}}, \quad (6)$$

式中: a_0 为玻尔半径; R 为里德堡原子半径; n 为主量子数; e 为电子电荷。取铷原子相干时间 $T_c = 52 \text{ ns}$, 测量时间 $t = 1 \text{ s}$, 有效原子数 $N = 10000$, 可以得到基于里德堡原子的无线电波测量在全频段段的电场灵敏度,如图 1 所示,实线曲线代表长度为 1 cm 的偶极子天线的测量灵敏度,点线代表了不同频段下里德堡原子无线电波的最小可测量值。

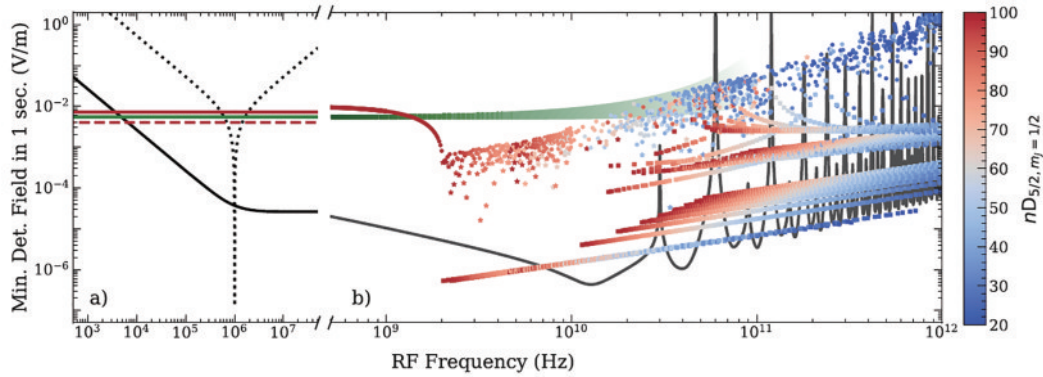


图 1 铷原子在全频段的无线电波响应灵敏度^[50]

Fig. 1 Radio wave response sensitivity of rubidium atoms in the full frequency band^[50]

取室温下原子数的极限,可以得到基于里德堡原子无线电波的测量灵敏度 $1 \text{ nV} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ^[47]。这样的灵敏度结论是标准量子极限下的结论,没有考虑原子碰撞、渡越时间、系统损耗,描绘了基于里德堡原子无线电测量的上限。该团队进一步比较了基于 EIT 光学读取方式与标准量子极限下无线电波测量灵敏度的差距^[41]。如图 2 所示,绘制了电磁诱导透明相对于标准量子极限的灵敏度差异,

图 2(a) 是三能级梯形结构示意图,图 2(b) 分别绘制了标准量子噪声极限下的能级移动灵敏度随光学厚度的变化关系以及基于 EIT 的能级移动灵敏度随光学厚度变化关系。可以看到,基于 EIT 的测量方式,所能测到的无线电波最小电场值要高于标准量子极限下的最小电场。图 2(c) 表示了不同光学厚度下的灵敏度差异,在最优的光学厚度下,基于 EIT 的测量方式比标准量子极限恶化 3.5 dB。在当前实验条件下,光学厚度一般小于 1,此时,基于 EIT 的无线电波灵敏度要比基于标准量子极限的灵敏度差 36 dB。

目前,取得最佳无线电波测量灵敏度的方法是在 EIT 探测方式上结合传统的超外差方法。将里德堡原子看成自由空间的混频器,信号无线电波与本征无线电波在里德堡原子处发生混频,本征无线电波耦合临

近的里德堡能级,产生劈裂。小失谐的信号无线电波也作用于里德堡原子,两束无线电波发生外差干涉,将拍频信号转移到透射的探测光场上。待测无线电波的场强可以表示为

$$E_{\text{mw}} = \frac{\sqrt{2} \hbar |P|}{2u|\kappa|}, \quad (7)$$

式中: P 为探测光的光功率; κ 为原子超外差测量的总内禀增益系数。目前,利用该方法的无线电波测量灵敏度为 $1.25 \mu\text{V} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ^[51]。

在现有测量体制下,里德堡原子无线电波测量灵敏度主要与有效原子数、原子退相干时间以及里德堡原子天线总体噪声水平相关。有效原子数受到原子气压、温度、里德堡激发过程中原子相互作用引起的激发阻塞效应等影响。退相干时间受原子碰撞、多普勒展宽、渡越展宽效应影响。里德堡原子天线总体噪声水平也是影响探测灵敏度的重要因素,包括可能引起原子数目变化的噪声,激光的频率、振幅以及相位噪声,信号读出电子器件的噪声等,这里主要的噪声来自光与原子的相互作用。减小噪声,提高参与测量的有效原子数以及原子退相干时间,是提升探测灵敏度的关键。

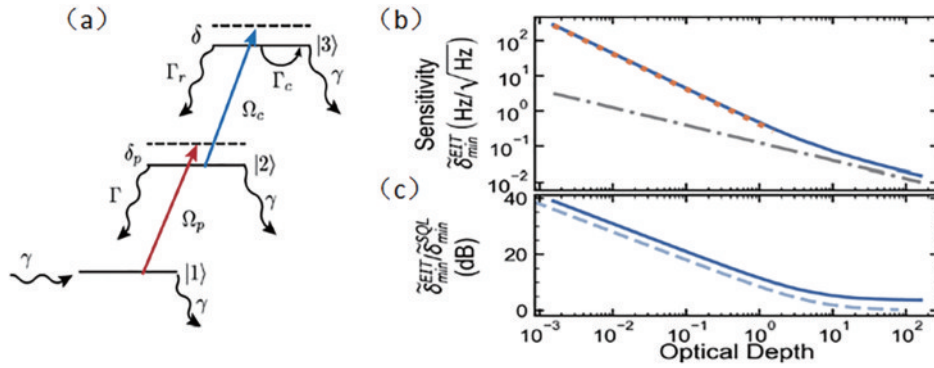


图 2 基于电磁诱导透明的测量灵敏度与基于标准量子极限的测量灵敏度对比。(a)里德堡电磁诱导透明传感器梯形三能级结构示意图;(b)铷原子探测灵敏度随光学厚度的变化(点横曲线为量子标准极限下探测灵敏度的值,实线代表电磁诱导透明探测方式下灵敏度的值);(c)基于电磁诱导透明的测量灵敏度与基于标准量子极限的测量灵敏度在不同光学厚度下的对比值(实线表示梯形三能级结构中的计算结果,虚线表示 Λ 型三能级结构中的计算结果)^[11]

Fig. 2 Comparison of measurement sensitivity based on electromagnetically induced transparency with that based on standard quantum limit. (a) Schematic diagram of the ladder type three-level structure of the Rydberg electromagnetic induced transparent sensor; (b) variation of rubidium atomic detection sensitivity with optical depth (dot horizontal curve represents the detection sensitivity value under the quantum standard limit, while the solid line represents the sensitivity value under the electromagnetic induced transparency detection method); (c) contrast value between the measurement sensitivity based on electromagnetically induced transparency and the measurement sensitivity based on the standard quantum limit under different optical depth (solid line represents the calculation result in the ladder three-level structure, and the dotted line represents the calculation result in the three-level Λ structure)^[11]

4 里德堡原子无线电波测量灵敏度的提升

基于 EIT-AT 方法的无线电微波测量灵敏度受限于 EIT 透射窗口的宽度,即被测无线电波所引起的 AT 分裂宽度需要和 EIT 线宽在一个数量级,此时待测的无线电波才能被里德堡原子分辨。为了提升里德堡原子无线电波测量灵敏度,研究人员提出了 4 类提

升探测灵敏度的方法。

1) 光学零差探测方法。系统装置如图 3(a)所示,带有两个分束器(BS)、一个衰减器和一个参考激光,利用可移动反射镜优化空腔长度。在马赫-曾德尔干涉仪中使用零差探测来降低探测光的噪声,同时利用强的本征光来提高 EIT 的信号强度。利用光学零差探测可以将探测灵敏度提升到 $5 \mu\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ^[4]。

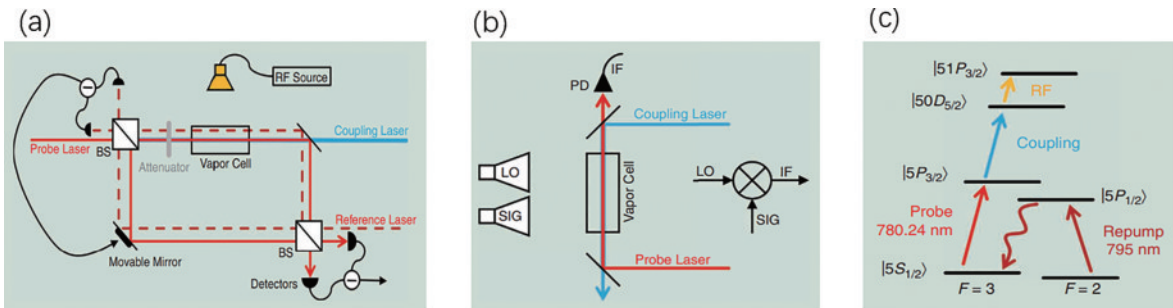


图 3 灵敏度增强技术示意图。(a)光学零差装置;(b)超外差探测装置;(c)光学重新泵浦能级示意图^[46]

Fig. 3 Schematic diagram of sensitivity enhancement technology. (a) Optical homodyne device; (b) superheterodyne detection device; (c) schematic diagram of optical repumping energy levels^[46]

2) 微波外差,即超外差探测。系统装置如图 3(b)所示,里德堡原子可以看作一个自由空间的混频器,信号无线电波场和本征无线电波场在里德堡原子处发生混频,混频效率取决于本征无线电波的大小,混频后的中频输出通过探测光的共振透射谱读出。这里本征无线电波的第一个作用是作为频率和相位参考,通过本征无线电波和信号无线电波发生干涉来获取信号无线

电波场的相位和频率信息。本征无线电波场的第二个作用是通过改变本征无线电波的拉比频率的大小来调节里德堡暗态的能级,从而裁剪里德堡原子的光谱特性,使其对无线电波更加敏感。目前,这种方法具有代表性的工作实现了 $5.5 \mu\text{V} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 的测量灵敏度^[19]。

3) 光学重新泵浦。如图 3(c)所示,原子用 795 nm

激光泵浦,并衰变为目标基态,其中探测光(780.24 nm)和耦合光(480 nm)可以将它们激发为里德堡态,增加无线电波的测量灵敏度。处于里德堡态的电子由于衰变会回到基态,但并不是所有的原子都会回到目标基态,这些电子衰变到其他态的原子不再对信号有贡献。光学重新泵浦则是通过额外的激励光,使电子重新吸收再衰变回目标基态的路径中,进而增加对信号有贡献的原子数。利用这种方法的探测灵敏度可以达到 $3 \mu\text{V} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ [22]。

4) 采用谐振腔提升探测灵敏度。谐振腔可以让满足特定频率的无线电波或光波在腔内往返,形成相干叠加,从而带来新的量子效应,在腔量子电动力学中已经得到了充分的验证。为了寻求更高的探测灵敏度以及更宽的工作带宽,里德堡原子与谐振腔的耦合涌现出了新的亮点。主要有两类谐振腔,一类是里德堡原子与微波谐振腔的结合,利用谐振腔对空间微波进行会聚,达到提升探测灵敏度以及利于工程化的目的,如

图 4(a) 所示。2021 年,美国陆军实验室相关研究团队利用微带波导耦合里德堡原子传感器对 0~20 GHz 的极限灵敏度进行了评估,得到了最优 -145 dBm/Hz 的极限灵敏度,并利用该系统对中波、甚高频已知 2.4 GHz 蓝牙、Wi-Fi 等真实无线电信号进行了频点监测实验,验证了里德堡原子用于宽频电磁频谱监测系统的可行性 [29]。Holloway 等 [28] 开发了平板波导、裂环波导的结构 [30], 如图 4(b)、(c) 所示,利用谐振腔将微波汇聚,再进行测量,成功将探测灵敏度提升 2 个数量级。Ma 等 [52] 将环形谐振腔与原子池一体化设计,实现了直流到交流微波的测量,更加便于工程应用,如图 4(e) 所示。在里德堡原子和光腔结合方面, Yang 等 [26] 给出了理论预测模型, Li 等 [23] 在实验实现了探测光的谐振,压窄了电磁诱导透明线宽,从而实现了无线电波测量灵敏度的提升。图 4(d) [23] 为光腔增强的实验装置。未来,将在谐振腔与原子蒸气池一体化、小型化以及工程应用化方面展现出更多的探索。

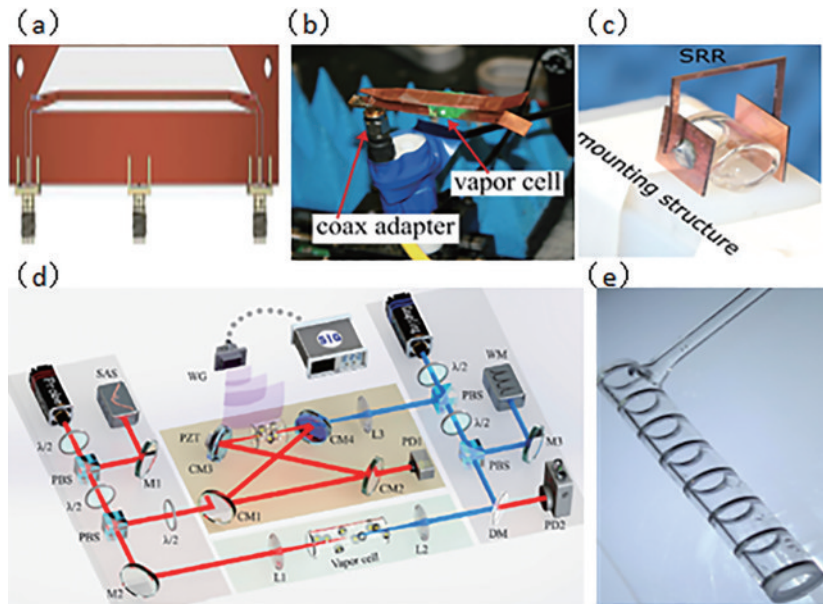


图 4 利用谐振腔增强探测灵敏度。(a)里德堡原子与微带线结构耦合 [29];(b)里德堡原子与平板结构耦合 [28];(c)里德堡原子与裂环结构耦合 [30];(d)里德堡原子与光学腔耦合 [23];(e)环形谐振腔-原子池一体化结构 [52]

Fig. 4 Enhancing detection sensitivity using a resonant cavity. (a) Coupling of Rydberg atoms with microstrip line structures [29]; (b) coupling of Rydberg atoms with flat plate structures [28]; (c) coupling of Rydberg atoms with split ring structures [30]; (d) coupling of Rydberg atoms with optical cavities [23]; (e) an integrated structure of a ring resonant cavity atomic pool [52]

5 结束语

基于里德堡原子的无线电波测量技术作为一种新兴的技术,带来了传统手段不具备的频带-孔径无关、低于热噪声极限的灵敏度、全光学探测、大动态范围探测系统抗毁伤、小型集约化等显著优势,吸引了各国研究者的广泛关注,在航天、医疗、军事通信、地球物理和其他交叉领域具有广阔的应用前景。然而,其在拥有突破传统经典手段种种限制的先天优势的同时,我们也应该注意到其短板与能力边界。这些短板和能力边

界的研究是基于量子力学框架下的量子光学、量子电动力学、原子-电磁场相互作用等理论模型。这些研究将为基于里德堡原子的无线电波测量提供理论依据。本文综述了基于里德堡原子的无线电波测量,重点对测量灵敏度极限做了探讨,对于量子标准极限下、电磁诱导透明机制下的探测灵敏度做了分析,同时对原子蒸气池与谐振腔一体化工作进行了介绍。结合领域的研究工作,本文对基于里德堡原子的无线电波测量的发展趋势作出了如下展望:一方面,技术途径多元化,助力核心指标突破。该领域将围绕接收灵敏度、瞬时

带宽等核心指标提升,涌现出里德堡集体激发态、瞬态测量、微波/光波频率梳等新的原理与技术,助力里德堡原子无线电波测量性能超越传统方案。另一方面,工程化提速,助力技术走出实验室。随着里德堡原子无线电波测量应用需求的日益迫切,前沿技术与工程化移植已经同步进行,并发研究。同时也需要关注原子蒸气池方面面临的“卡脖子”问题,朝着关键核心技术与器件自主可控发展。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Fan H Q, Kumar S, Kübler H, et al. Dispersive radio frequency electrometry using Rydberg atoms in a prism-shaped atomic vapor cell[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2016, 49(10): 104004.
- [3] Kumar S, Fan H Q, Kübler H, et al. Rydberg-atom based radio-frequency electrometry using frequency modulation spectroscopy in room temperature vapor cells [J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 8625-8637.
- [4] Kumar S, Fan H Q, Kübler H, et al. Atom-based sensing of weak radio frequency electric fields using homodyne readout[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 42981.
- [5] Simons M T, Gordon J A, Holloway C L, et al. Using frequency detuning to improve the sensitivity of electric field measurements via electromagnetically induced transparency and Autler-Townes splitting in Rydberg atoms[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(17): 174101.
- [6] Jia F D, Yu Y H, Liu X B, et al. Dispersive microwave electrometry using Zeeman frequency modulation spectroscopy of electromagnetically induced transparency in Rydberg atoms[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(27): 8253-8258.
- [7] Liu X B, Jia F D, Zhang H Y, et al. Using amplitude modulation of the microwave field to improve the sensitivity of Rydberg-atom based microwave electrometry [J]. *AIP Advances*, 2021, 11(8): 085127.
- [8] Li S H, Yuan J P, Wang L R. Improvement of microwave electric field measurement sensitivity via multi-carrier modulation in Rydberg atoms[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(22): 8110.
- [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] Chopinaud A, Pritchard J D. Optimal state choice for Rydberg-atom microwave sensors[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 16(2): 024008.
- [11] Meyer D H, O'Brien C, Fahey D P, et al. Optimal atomic quantum sensing using electromagnetically-induced-transparency readout[J]. *Physical Review A*, 2021, 104(4): 043103.
- [12] Holloway C L, Gordon J A, Schwarzkopf A, et al. Sub-wavelength imaging and field mapping via electromagnetically induced transparency and Autler-Townes splitting in Rydberg atoms[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(24): 244102.
- [13] Anderson D A, Raithe G. Continuous-frequency measurements of high-intensity microwave electric fields with atomic vapor cells[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(5): 053504.
- [14] Jiao Y C, Han X X, Fan J B, et al. Atom-based receiver for amplitude-modulated baseband signals in high-frequency radio communication[J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(12): 126002.
- [15] Wade C G, Šibalić N, de Melo N R, et al. Real-time near-field terahertz imaging with atomic optical fluorescence[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(1): 40-43.
- [16] Wade C G, Marcuzzi M, Levi E, et al. A terahertz-driven non-equilibrium phase transition in a room temperature atomic vapour[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 3567.
- [17] Downes L A, MacKellar A R, Whiting D J, et al. Full-field terahertz imaging at kilohertz frame rates using atomic vapor[J]. *Physical Review X*, 2020, 10(1): 011027.
- [18] 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.
- [19] Jing M Y, Hu Y, Ma J E, et al. Atomic superheterodyne receiver based on microwave-dressed Rydberg spectroscopy [J]. *Nature Physics*, 2020, 16(9): 911-915.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Li S H, Yuan J P, Wang L R, et al. Enhanced microwave electric field measurement with cavity-assisted Rydberg electromagnetically induced transparency[J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 846687.
- [24] Peng Y D, Wang J L, Yang A H, et al. Cavity-enhanced microwave electric field measurement using Rydberg atoms[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, 35(9): 2272-2277.
- [25] Peng Y D, Wang J L, Li C, et al. Enhanced microwave electrometry with intracavity anomalous dispersion in Rydberg atoms[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(2): 1-10.
- [26] Yang A H, Zhou W P, Zhao S C, et al. Enhanced

- measurement of microwave electric fields with collective Rabi splitting[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2020, 37(6): 1664-1669.
- [27] 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.
- [28] Holloway C L, Simons M T, Kautz M D, et al. A quantum-based power standard: using Rydberg atoms for a SI-traceable radio-frequency power measurement technique in rectangular waveguides[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(9): 094101.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Li Z H, Hao D S, Yang W H, et al. Improvement of microwave detection sensitivity with atoms based on cavity enhancement effect[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2022, 61(9): 096002.
- [32] Jau Y Y, Carter T. Vapor-cell-based atomic electrometry for detection frequencies below 1 kHz[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(5): 054034.
- [33] Holloway C L, Prajapati N, Sherman J A, et al. Electromagnetically induced transparency based Rydberg-atom sensor for traceable voltage measurements[J]. *AVS Quantum Science*, 2022, 4(3): 034401.
- [34] Hu J L, Li H Q, Song R, et al. Continuously tunable radio frequency electrometry with Rydberg atoms[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 121(1): 014002.
- [35] Du Y J, Cong N, Wei X G, et al. Realization of multiband communications using different Rydberg final states[J]. *AIP Advances*, 2022, 12(6): 065118.
- [36] 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.
- [37] Anderson D A, Sapiro R E, Gonçalves L F, et al. Optical radio-frequency phase measurement with an internal-state Rydberg atom interferometer[J]. *Physical Review Applied*, 2022, 17(4): 044020.
- [38] 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.
- [39] Ding D S, Liu Z K, Shi B S, et al. Enhanced metrology at the critical point of a many-body Rydberg atomic system[J]. *Nature Physics*, 2022, 18(12): 1447-1452.
- [40] Dixon K, Nickerson K, Booth D W, et al. Rydberg-atom-based electrometry using a self-heterodyne frequency-comb readout and preparation scheme[J]. *Physical Review Applied*, 2023, 19(3): 034078.
- [41] Zhang L H, Liu Z K, Liu B, et al. Rydberg microwave-frequency-comb spectrometer[J]. *Physical Review Applied*, 2022, 18(1): 014033.
- [42] 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.
- [43] Fan H Q, 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.
- [44] Santamaria-Botello G, Verploegh S, Bottomley E, et al. Comparison of noise temperature of Rydberg-atom and electronic microwave receivers[EB/OL]. [2023-01-02]. <https://www.semanticscholar.org/reader/771646c68a61a79cee072197a7272dad09cff93f>.
- [45] Mao R Q, Lin Y, Yang K, et al. A high-efficiency fiber-coupled Rydberg-atom integrated probe and its imaging applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(2): 352-356.
- [46] Artusio-Glimpse A, Simons M T, Prajapati N, et al. Modern RF measurements with hot atoms: a technology review of Rydberg atom-based radio frequency field sensors[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2022, 23(5): 44-56.
- [47] Holloway C L, Gordon J A, Jefferts S, et al. Broadband Rydberg atom-based electric-field probe for SI-traceable, self-calibrated measurements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(12): 6169-6182.
- [48] Holloway C L, Simons M T, Gordon J A, et al. Atom-based RF electric field metrology: from self-calibrated measurements to subwavelength and near-field imaging [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2017, 59(2): 717-728.
- [49] 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.
- [50] Meyer D H, Castillo Z A, Cox K C, et al. Assessment of Rydberg atoms for wideband electric field sensing[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2020, 53(3): 034001.
- [51] Cai M H, Xu Z S, You S H, et al. Sensitivity improvement and determination of Rydberg atom-based microwave sensor[J]. *Photonics*, 2022, 9(4): 250.
- [52] Ma L, Viray M A, Anderson D A, et al. Measurement of DC and AC electric fields inside an atomic vapor cell with wall-integrated electrodes[EB/OL]. (2021-06-03) [2023-02-04]. <https://arxiv.org/abs/2106.01968>.