

强激光与粒子束

High Power Laser and Particle Beams

基于里德堡原子的无线电技术研究进展

贺青 李栋 谷立 罗思源 贺寓东 李彪 王强

Research progress in radio technology based on Rydberg atoms

He Qing, Li Dong, Gu Li, Luo Siyuan, He Yudong, Li Biao, Wang Qiang

引用本文:

贺青, 李栋, 谷立, 罗思源, 贺寓东, 李彪, 王强. 基于里德堡原子的无线电技术研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2024, 36: 079001. doi: 10.11884/HPLPB202436.240061

He Qing, Li Dong, Gu Li, Luo Siyuan, He Yudong, Li Biao, Wang Qiang. Research progress in radio technology based on Rydberg atoms[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2024, 36: 079001. doi: 10.11884/HPLPB202436.240061

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.240061>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于KFCM增量更新的无线电引信目标识别方法

Target recognition method for radio fuze based on KFCM algorithm with incremental update

强激光与粒子束. 2019, 31: 063204-1-063204-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201931.190126>

西安理工大学无线光通信系统自适应光学技术研究进展

Research progress of adaptive optics in wireless optical communication system for Xi'an University of Technology

强激光与粒子束. 2021, 33: 081003-1-081003-23 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202133.210167>

基于马赫-曾德干涉的全光纤双参量传感器

All-fiber dual-parameter sensor based on Mach-Zehnder interference

强激光与粒子束. 2021, 33: 111010-1-111010-5 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202133.210498>

高置信度强电磁脉冲环境测试技术研究进展与展望

Progress and prospect of high-confidence measurement technology for high-intensity electromagnetic pulse

强激光与粒子束. 2021, 33: 123001-1-123001-12 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202133.210482>

特种电源技术研究进展概述

Status of special power supplies technology research

强激光与粒子束. 2019, 31: 040001-1-040001-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201931.190070>

基于深度学习的自适应光学波前传感技术研究综述

Review of wavefront sensing technology in adaptive optics based on deep learning

强激光与粒子束. 2021, 33: 081001-1-081001-13 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202133.210158>



·前沿技术与交叉科学·

基于里德堡原子的无线电技术研究进展*

贺 青¹, 李 栋^{1,2}, 谷 立¹, 罗思源^{1,2}, 贺寓东¹, 李 彪¹, 王 强¹

(1. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 微系统与太赫兹研究中心, 成都 610200)

摘 要: 近年来, 量子信息技术飞速发展, 其中基于里德堡原子的电磁传感器吸引了人们的极大兴趣。里德堡原子是一种处于高能态的原子, 因其拥有对外场响应灵敏、具备自校准并直接追溯到国际单位制的测量能力、不受传统天线尺寸效应的影响等特点, 十分适合于无线电传感与探测。自 2012 年 Shaffer 等突破性地利用里德堡原子的电磁诱导透明效应测量微波电场强度的灵敏度及不确定度均远高于传统微波测量结果之后, 近十年来, 以里德堡原子超外差测量等新理论和新技术为代表的研究已经实现了对电磁波的频率、极化、相位、强度等多参数的测量, 相关工程化的技术也蓬勃发展, 有望对传统的无线电技术产生颠覆性的影响。对基于里德堡原子的无线电技术近十年来的研究进展进行综述, 从探测原理出发, 梳理本领域的发展脉络, 并对其未来发展趋势进行展望。

关键词: 里德堡原子; 电磁诱导透明; 无线电技术; 原子传感器

中图分类号: O43; TN99

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.240061

Research progress in radio technology based on Rydberg atoms

He Qing¹, Li Dong^{1,2}, Gu Li¹, Luo Siyuan^{1,2}, He Yudong¹, Li Biao¹, Wang Qiang¹

(1. Institute of Electronic Engineering, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Microsystems and Terahertz Research Center, CAEP, Chengdu 610200, China)

Abstract: In recent years, the field of quantum information technology has experienced rapid growth, with a particular focus on electromagnetic sensors that utilize Rydberg atoms. Rydberg atoms, characterized by their high energy states, have garnered significant attention due to their highly sensitive response to external fields. These atoms offer several advantages, including self-calibration capabilities and direct traceability to the International System of Units (SI), which make them exceptionally suitable for applications in radio sensing and detection. Since Shaffer and others made a breakthrough in measuring microwave electric field intensity using the electromagnetic induced transparency effect of Rydberg atoms in 2012, the sensitivity and uncertainty of measuring microwave electric field intensity have significantly surpassed those of traditional microwave measurement results. Over the past decade, research centered around new theories and technologies, such as Rydberg atom superheterodyne technology, has enabled the measurement of electromagnetic wave frequency, polarization, phase, amplitude, and other parameters. Related engineering technologies are also experiencing significant growth, expected to have a disruptive impact on traditional radio technology. This comprehensive review aims to summarize the research progress in the field of Rydberg atom-based radio technology over the past ten years. It will start by examining the underlying principles of detection and then proceed to outline the developmental trajectory of this domain. Finally, the review will provide insights into the future trends and potential directions for the evolution of this technology.

Key words: Rydberg atom, electromagnetic induced transparency, radio technology, atomic sensor

自麦克斯韦在 19 世纪建立电磁场理论并预测了电磁波的存在、1888 年德国科学家海因里希·赫兹发明天线后^[1], 意大利的古格里莫·马可尼将天线应用于远距离无线电通信。如今, 无线电技术广泛应用在数据通信、雷达探测、卫星定位、天文探测、气象、医疗等领域中, 已经成为世界各国的重点战略需求, 在国防和民生领域具有举足轻重的地

* 收稿日期: 2024-02-23; 修订日期: 2024-04-28

基金项目: 中国工程物理研究院院长基金自立项目 (YZJZL2023054)、电子工程研究所科技创新基金项目 (J23-02)、国家自然科学基金青年科学基金项目 (12104423)、四川省自然科学基金青年基金项目 (2024NSFSC1431)

联系方式: 贺 青, 18583852658@163.com。

通信作者: 王 强, 383703313@qq.com。

位,并在此过程中改变了全球社会,成为人类社会不可分割的一部分。无线电系统中,虽然各种各样的天线令人眼花缭乱,但它们都遵从相同的电磁场基本定理^[2]:电磁场与自由电子相互作用(电流产生电磁波、电磁波感应电流)。其主要过程为信号源激励发射天线产生电流,辐射电磁波,携带信息或经目标反射的电磁波传播到接收端,驱动接收天线中的自由电子运动产生电流,形成电信号,再由后续电路处理。经过一百多年的发展,无线电技术的应用已经极大地造福人类社会。然而,现代社会对其应用需求的急速提升,令经典的无线电技术面临着一系列挑战:

(1)灵敏度受限。传统无线电电场计量探测基于金属天线进行,其探测灵敏度一般只能达到 mV/cm 量级,难以满足当今精密电场计量的需要。同时,这类金属天线(金属探测器)工作时需要放在一个标准场中进行校准,然而标准场和标准天线的校准并不是绝对的。引入的校准误差导致不确定度大大提高,溯源链也更为复杂^[3]。此外,经典无线电技术通过金属天线吸收空间中的无线电波,将能量从电磁场的形式转变成了自由电子动能(电流)的形式,是对无线电波的破坏性测量。温度大于绝对零度(例如室温下)的电路中,自由电子还会发生随机热运动,从而导致电流中存在噪声。而待测无线电波的信息和热运动导致的噪声全部编码在电流中,无法在物理上进行区分,使得传统无线电系统的探测灵敏度始终无法超越热噪声(即 Johnson 噪声)的噪声等效功率(noise equivalent power, NEP)。

(2)抗干扰能力仍需加强。基于传统天线的无线电信息感知系统,在强电磁辐射环境下,接收机容易出现饱和无法正常工作甚至损毁的风险。此外,由于天线所处位置的电磁场发生剧烈变化,还易导致目标暴露。

(3)工作带宽窄。金属天线的尺寸限制了宏观电流运动的边界条件,确定了天线可以工作的带宽,同时也将影响天线对电磁信号的辐射效率,决定了信号传输的速率。这种尺寸效应导致传统天线无法实现大工作频带的传感与探测,难以满足当今高速率通信、高信息安全传输、高精度测距、低功耗和良好拓展性的无线电技术应用要求。

(4)兼容性仍需提高。传统的无线电接收系统通常需要多个天线、放大器和其他组件接收信号,单个天线无法实现宽频谱信号接收。随着集成电路的蓬勃发展,无线电探测系统集成化、小型化发展的趋势愈加明显,但天线因尺寸效应始终受 Chu 极限的限制而不遵从“摩尔定律”^[4-6],特别是频率越低,所需天线尺寸就越大,这大大限制了天线和整个无线电系统的兼容性。

近年来,以“量子态叠加原理”为核心、直接调控量子系统波函数本身(信息编码于量子系统波函数上的信息处理技术)为主要标志的“量子力学的第二次革命”的量子信息技术飞速发展。其中通过调控并观测微观粒子系统实现突破量子标准极限探测、精准操控和综合应用的量子精密测量技术因超越传统测量技术(在精度、灵敏度等指标上)吸引了包含科研界、产业界和国防领域的重点关注。2019年,长度、质量、热力学温度、时间、物质的量、电流、发光强度这7个国际基本计量物理量的单位由经典实物基准被量子物理为基础的自然基准所取代,国际单位制从此踏入量子基准时代,这进一步促进了量子精密测量技术的发展^[7]。实际上,量子精密测量技术在利用原子、分子、光子等测量工具对磁场、电场、重力、加速度、时间、温度等物理量进行的测试中,已经取得了一系列具有重大影响的成果^[8-13]。对于本文所关注的无线电领域,全球研究人员正加大对基于里德堡原子无线电传感器(也称为原子接收机)的研究,这种传感器有望在各种无线电传感中取代传统天线或可加深与传统天线的相互兼容。如前所述,根据天线的几何形状,传统天线只能探测有限带宽的频率,但这些原子接收机利用在玻璃气室中的碱金属原子对电磁波进行探测,可以在很宽的频率范围内进行调谐(从 DC^[14-17]到 THz^[18]),而不受传统天线尺寸效应的影响,故无需改变任何硬件。自2012年 James Shaffer 等^[19]开创性地利用双光子激发里德堡原子实现电磁诱导透明(electromagnetically induced transparency, EIT)光谱^[20-21]测量微波电场强度、灵敏度及不确定度均远高于传统微波测量结果之后,近十年来,基于里德堡原子的无线电技术开始在通信、雷达等经典无线电领域一展身手。对电磁波的频率、极化、相位、强度等多参数的测量中,已经有相关研究团队提出了一系列的新理论、新技术,这些工作极大促进了里德堡原子接收机的发展,可以说,基于里德堡原子的无线电技术有望对传统的无线电技术产生颠覆性的影响。本文基于里德堡原子的无线电技术近十年来的研究进展进行综述,介绍里德堡原子的探测原理,梳理本领域的发展脉络,重点总结里德堡原子在灵敏度、探测频段、极化等参数中取得的进展,并概述了里德堡原子在实用化过程中的主要成果,最后对其未来发展趋势进行展望。

1 里德堡原子探测原理

一般的碱金属原子,比如铷和铯原子,在最外层轨道上只有单个电子,通过光学激发,可以将这个电子驱动到一个具有高量子数的能态(例如主量子数 $n > 20$),即所谓的里德堡态^[22],这时候称这些原子为里德堡原子。里德堡原子拥有众多特性:1)很大的轨道半径。一个较高的主量子数意味着电子离原子核较远,新轨道的半径与 n^2 成

正比; 2) 寿命长(正比于 n^3)。一般而言, 低激发态原子的寿命一般只有几十纳秒, 而高激发态里德堡原子的寿命甚至可达微秒甚至毫秒量级^[23]; 3) 里德堡原子极化率很大(正比于 n^7), 可以和添加的外场进行十分敏感的相互作用; 4) 能级间隔小(正比于 n^{-3}), 不同里德堡态之间的跃迁频率能覆盖 DC 到 THz 波段, 同时里德堡原子相邻能级的跃迁几率很高。里德堡原子的主要特点如表 1 所示。

由于以上特点, 改变里德堡原子的主量子数, 就可以响应从 DC 到 THz 的极大带宽信号; 同时因其半径和电偶极矩较大, 可十分灵敏地与外场进行耦合响应, 这些特点使其在无线电信号的测量平台候选者中脱颖而出。

里德堡原子是通过 EIT 光谱来探测无线电波的, EIT 是一种量子干涉现象, 它利用外加相干光场在原子系统中诱导相位消光干涉, 以抵消介质对某些光的吸收, 从而产生超窄的透明峰。2012 年, 美国和德国的研究小组通过铷里德堡原子的 EIT 光谱技术实现了微波电场的精密探测^[19], 本文以他们的探测成果对里德堡原子的探测原理进行介绍。整个探测装置如图 1 所示, 主要由探测光(红色)和耦合光(蓝色)系统、铷原子玻璃气室、微波辐射天线、光电探测器等几个部分构成。

表 1 里德堡原子主要特点

Table 1 The main characteristics of Rydberg atoms

| property | n dependence |
|---------------------------|----------------|
| binding energy | n^{-2} |
| energy spacing | n^{-3} |
| orbital radius | n^2 |
| dipole moment | n^2 |
| radiative lifetime | n^3 |
| polarizability | n^7 |
| van der Waals interaction | n^{11} |
| dipole-dipole interaction | n^4 |

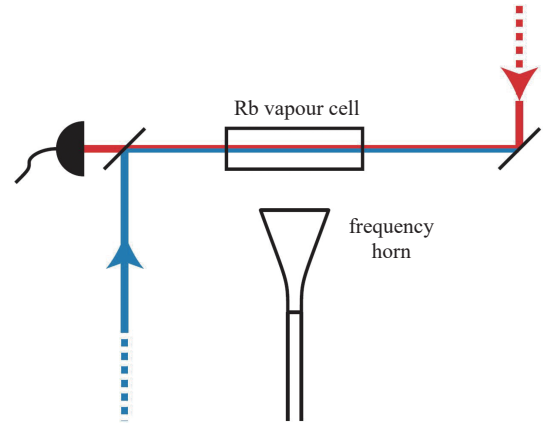


Fig. 1 Experimental set-up used for detecting microwave electric field^[19]

图 1 里德堡原子探测微波电场装置示意图^[19]

如图 2 所示, 在 780 nm 波长的探测光作用下, 铷原子由基态 $5S_{1/2}$ 激发到中间态 $5P_{3/2}$ 。添加一束 480 nm 的耦合光后, 进一步将铷原子激发到里德堡态 $5D_{5/2}$ 。如图 2(b) 上图所示, 此时光电探测器对探测光的探测结果表现为一个单峰, 表明里德堡原子对探测光无吸收, 吸收峰出现一个透明窗口, 即 EIT 效应。添加 14 GHz 的微波场后, 诱导相邻里德堡态 $5D_{5/2}$ - $54P_{3/2}$ 的共振跃迁, EIT 光谱发生分裂, 由一个峰变为两个对称的峰, 发生 AT 分裂效应, EIT 光谱的这种分裂很容易测量并且与所施加的微波电场幅度成正比^[24], 即

$$|E| = 2\pi \frac{\hbar}{\mu_r} \frac{\lambda_p}{\lambda_c} \Delta f_m \quad (1)$$

式中: $|E|$ 表示微波场场强, μ_r 为里德堡原子的跃迁偶极矩, \hbar 为约化普朗克常量, λ_p 和 λ_c 分别表示探测光、耦合光波长, λ_p/λ_c 表示探针光和耦合光的多普勒失配^[25], Δf_m 表示 EIT-AT 分裂的光学频率差。如图 2(b) 所示, 随着微波电

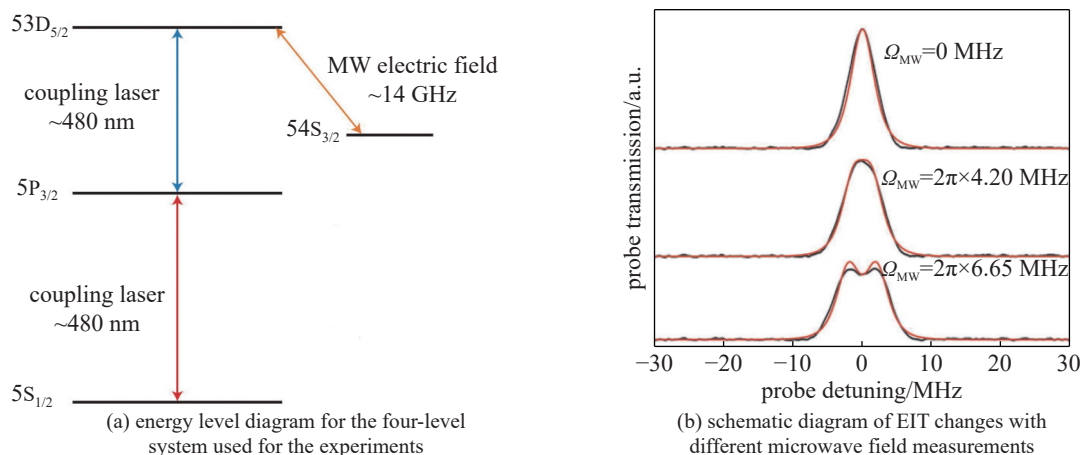


Fig. 2 Microwave detection based on EIT-AT^[19]

图 2 基于 EIT-AT 的微波探测^[19]

场场强的增加(微波的拉比频率 Ω_{MW} 变大), EIT-AT 间隔逐渐变大, 这种微波场和原子间的相互作用的方式就是共振耦合方式。可见, 基于里德堡原子的无线电探测技术本质是对外场能量的探测, 并通过 EIT 光谱转变为频率的测量, 同时溯源到普朗克常数, 因此拥有极高的测量精度。利用不同的激光将里德堡原子激发大不同的里德堡态, 就可以实现从 DC~THz 频率范围内的高灵敏度响应。根据里德堡原子的探测原理, 其相对于传统的无线电技术, 拥有以下显著的优势:

(1)高灵敏度。基于里德堡原子的无线电探测系统, 无线电波和原子(不存在自由电子)相互作用, 理论上不受热噪声的影响。探测灵敏度从根本上受到散粒噪声极限的限制, 散粒噪声的量级比热噪声的量级小, 其量子投影极限远远超过了传统测量方法的极限。

(2)大工作带宽。里德堡原子丰富的能级覆盖了广泛的频率范围, 单种碱金属原子具有离散但准连续的能级, 由于这些能级很容易调谐, 因此里德堡原子可感知从直流到太赫兹的带宽。这意味着只需使用一个原子接收器就可以实现超宽带测量, 对于在卫星或者宇宙飞船等特殊空间内, 可在有限的空间内实现高速、高精度的信号传感与接收。

(3)可溯源性强。传统天线进行计量时, 根据频率的不同, 一般测量不确定度为 4%~20%^[26]。基于原子的无线电传感器测量结果直接追溯到很多基本的物理常数, 与国际单位制紧密联系, 使用时无需校准, 可溯源性强, 目前已经证实里德堡原子的测量不确定度仅有 5% 左右^[27]。众所周知, 频率越高(100 GHz 以上), 其绝对的频率校准方式越困难, 里德堡原子对这些频率的校准将展现出巨大的潜力^[28-29]。

(4)对待测场干扰小。里德堡原子接收机探测无线电的过程主要是通过玻璃气室中的里德堡原子感应电磁场, 其作用相当于一个射频天线。相对于金属天线来说, 将有更低的材料损耗。此外, 玻璃接收机散射的入射电磁波很少, 可有效提高接收机位置的隐匿性, 保证信号接收的安全。

(5)易集成。存放里德堡原子的玻璃气室, 目前其体积仅有几个立方厘米的大小, 方便与信号读取系统集成。此外, 里德堡原子的光谱读取方式, 仅需改变激光光谱激发里德堡原子到不同量子态即可实现大带宽的工作, 无需采用复杂的多天线协同工作, 系统集成度大大降低。

(6)抗干扰性较强。基于金属天线的传统接收机, 因其带宽有限, 在极端条件下遇到电磁信号干扰时, 接收机会产生过载, 无法正常工作。而里德堡原子的工作带宽大, 可以跳出干扰电磁场频率范围, 且其全光学的读取方式原理上并不存在对电磁信号的饱和。

2 里德堡原子无线电技术进展

自 EIT 理论提出到实验中观察到 EIT 现象的十几年后, EIT 效应都未在无线电探测方面有直接的应用。直到 2008 年, 来自英国的达勒姆大学的 Adams 等首次提出可利用里德堡原子的 EIT 效应实现电场的测量^[30], 从此时开始, 国内外小组便开始在微波电场的精密测量方面开展基于里德堡原子的电场计研究。2012 年, 美国奥克拉荷马大学的 Shaffer 等首次基于铷里德堡原子实现了高于传统微波电场计灵敏度两个数量级的工作, 且测量结果可直接溯源至普朗克常数^[19]! 由此开始, 拉开了里德堡原子探测无线电的盛大序幕, 近十年来, 有关里德堡原子无线电测量的成果不断涌现, 在雷达、通信等传统无线电领域开始崭露头角, 引起了国内外众多高校、科研院所的关注。根据国内外研究团队在里德堡原子传感和探测过程中取得的主要成果, 本文分别在灵敏度、探测频段和极化三个重要层面梳理近年来的进展。

2.1 灵敏度

引起全世界对里德堡原子无线电探测关注的重要原因之一是里德堡原子有望超越室温传统接收机的热噪声灵敏度极限, 对于灵敏度的探测一直都是各里德堡原子无线电探测团队的核心研究指标之一。影响灵敏度的因素首先包括里德堡原子气室的几何尺寸、材料性质等对无线电波的扰动^[31-32]; 其次, 激光的频率、振幅以及相位噪声等测试仪器条件也会对探测灵敏度造成影响。里德堡原子探测灵敏度主要受系统的技术噪声所限制, 这些噪声包括光电探测器和示波器的本底噪声以及光学读出噪声。其中光学读出噪声占主导地位, 并主要由激光器产生。理想的激光器, 输出的光场可等效为振幅固定、频率与相位恒定的正弦波信号, 然而在里德堡原子探测过程中, 因受环境温度变化、环境振动、自发辐射和激光器泵浦源等因素的影响, 输出的激光场不可避免地产生频率抖动、相位变化和激光功率波动并产生相应的频率噪声、相位噪声和振幅(强度)噪声。其中频率噪声和相位噪声又可以相互转化, 二者本质相同。山西大学团队的研究成果表明, 光学噪声, 特别是振幅噪声在 1 kHz 频率范围内, 具有 $1/f$ 的噪声特性且难以消除。在 100 kHz 以上时, 又会因为激光器的探测光和耦合光的稳频系统引入额外的频率噪

声从而影响系统探测灵敏度的提升^[27];另外,受限于原子相互作用、原子多普勒偏移等原因,整个测量系统也有灵敏度的理论下限。比如,受 AT 分裂光谱线宽(分辨率)和系统的技术噪声等限制,里德堡原子接收机因 EIT-AT 效应的探测极限场强灵敏度可表示为^[33]

$$E_{\min} = \frac{h}{\mu_r T_{\text{meas}} \sqrt{N}} \quad (2)$$

式中: h 是普朗克常数, T_{meas} 是测量时间, N 是参与测量的里德堡原子数。2012 年 Shaffer 等人开创性工作中,测得的无线电电场最小值为 $8 \mu\text{V}/\text{cm}$, 然而其实现的测量灵敏度仅达到 $30 \mu\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ^[19]。为了提升探测灵敏度,世界各研究小组目前已经发展了色散光谱^[34]、频率调制光谱^[35]、原子超外差^[27]、幅度调制光谱^[36]、光学零差探测^[37]、多载波调制^[38]、结合传统谐振腔^[39-40]、优化原子体系参数^[41-42]、光学重新泵浦^[43],以及采用超冷原子体系^[44]等技术,主要可以分为 6 类:

(1) 光学零差探测法。激光器的光子散粒噪声是影响里德堡原子无线电系统对信号读出的一个重要限制因素,提高系统的灵敏度就要提高信噪比,就需要新的方法来提高对光子散粒噪声的读出。在量子精密测量领域,马赫-曾德尔干涉仪由于可以减少激光器噪声,并有可能达到散粒噪声极限已成为众多团队提高系统灵敏度的技术方案。2017 年, Shaffer 小组使用马赫-曾德尔干涉仪对光相位进行零拍测量,其实验测试系统如图 3 所示^[37],探测光经分束器后一路作为信号光场经过里德堡原子气室,另一路作为本振光场,而后两路光场到达另外一个分束器并采用零差探测技术进行处理。同时,一束参考激光从干涉仪的检测端进入,其光路和探测光重合,最终参考激光的输出经差分光电二极管检测并进入反馈回路以保持干涉仪的稳定。利用干涉仪的零差测量方式有效降低了探测激光的读出噪声,增强了 EIT 信号,最终实现了灵敏度为 $5 \mu\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 电场探测。此后,该小组再次改进实验测试系统,使用频率调制光谱技术来提高系统信号读出的信噪比,同时开展信号的匹配滤波,进一步提高灵敏度至 $3 \mu\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 最小可测电场强度达到 $1.8 \mu\text{V}/\text{cm}$ ^[35]。

(2) 原子超外差法。基于 EIT-AT 效应工作的里德堡原子电场计的缺点在于其受噪声的影响较大,难以达到投影噪声的极限灵敏度,相对于经典无线电接收系统也有约 30 dB 的差距。2019 年,山西大学贾锁堂、张临杰等创造性地提出了基于里德堡原子的无线电超外差(即原子超外差)精密探测电磁信号的方法。他们将里德堡原子比作一个空间的混频器系统,类比传统的无线电接收机加入一个频率和相位可控本地振荡信号和探测信号进行混频。主要实验原理如图 4 所示,加入的本地场既可以作为探测场的频率和相位参考,也可以通过对本振场强度的调节改变超外差系统中参与测量的粒子数及系统有效相干时间^[45]。同时,本振场的拉比频率可以调节微波缀饰里德堡暗态的能级偏置,操控系统工作在对外场信号具有最佳响应度的工作点,进而极大地提高了原子超外差系统对无线电场响应的内禀增益,实现探测灵敏度的有效提升。通过建立的原子超外差测量模型,其灵敏度理论极限可达到投影噪声极限。在优化激光系统性能之后,他们实现了灵敏度约为 $5.5 \mu\text{V} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 最小可测电场强度为 $E_{\min}=78 \text{ nV}/\text{m}$ 的微波探测^[27]。

(3) 光学重新泵浦法^[43]。2021 年,美国国家标准技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)的 Holloway 研究小组结合超外差的方式,开展了光学重新泵浦法来提升灵敏度,图 5 为光学重新泵浦的能级示意图。当 780 nm 的探测光和 480 nm 的耦合光共同作用于里德堡原子气室时,会产生 EIT 效应。此时加入一个 795 nm 的重新泵浦光,可将铷原子从 $5S_{1/2}, F=2$ 的量子态激发到 $5P_{1/2}$ 态,此后部分将会衰变到 $5S_{1/2}, F=3$ 态,使得 EIT 相互

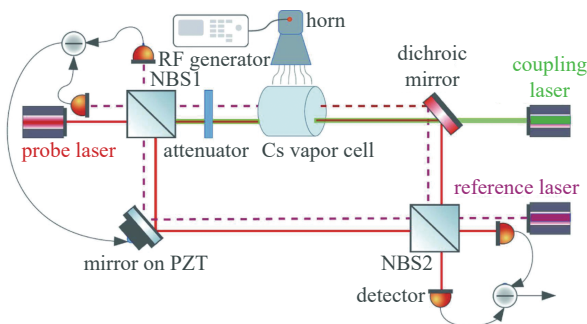


Fig. 3 Experimental system for measuring electric field by Mach-Zehnder interferometer^[37]

图 3 利用马赫-曾德尔干涉仪测量电场实验系统^[37]

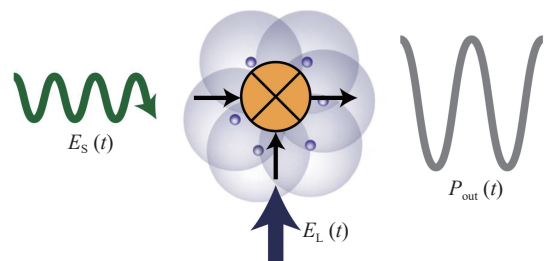


Fig. 4 In the atomic superheterodyne method, the local signal $E_L(t)$ with known frequency and phase and the signal field $E_s(t)$ to be measured are mixed by atoms^[27]

图 4 原子超外差法中,已知频率和相位的本地信号 $E_L(t)$ 和待测信号场 $E_s(t)$ 通过原子进行混频^[27]

作用中的原子数加倍,增加了EIT峰的强度,实现更高灵敏度的探测。这种方法最终实现了灵敏度为 $30 \text{ nV} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 、最小电场强度为 $E_{\text{min}}=3 \text{ } \mu\text{V}/\text{m}$ 无线电波探测。

(4)腔增强探测。近年来,在测量仪器中引入光/无线电波谐振腔,通过多次振荡来提高光场或无线电波的腔内反射,扩展相互作用距离或形成相干叠加提升探测信号强度以达到更高的灵敏度成为了许多研究团队的探索方向。Li等人将里德堡原子和光学腔结合实现了更窄的EIT效应线宽,提升了系统探测灵敏度^[46]。在相同的输入功率下,微波谐振腔的积分效应可提高腔内的目标电场强度,令系统具有更高的测量灵敏度^[39];2018年,美国Raithel等将一个无源谐振腔元件与一个原子蒸气室集成,用于开展具有本征场增强和偏振选择性的无线电波检测,最终在C波段实现了24 dB的探测灵敏度提升^[39];如图6所示,2022年,NIST的Holloway团队通过分裂的开口谐振腔将微波场汇聚的方式,利用EIT效应与原子超外差的方法,在1.3 GHz频率处成功实现了两个数量级的探测灵敏度提升,达到了 $5.5 \text{ } \mu\text{V} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,最小可测场强为 $5 \text{ mV}/\text{m}$ ^[40];同年,国防科技大学的付云起团队等基于平板型传输线谐振器增强局域无线电波,在2.1 GHz实现了25 dB的电场强度增强^[47]。

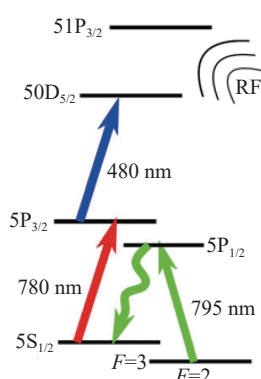


Fig. 5 Schematic diagram of optical repumping energy level^[43]

图5 光学重新泵浦能级示意图^[43]

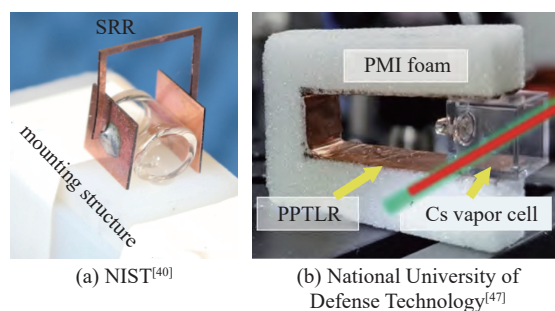


Fig. 6 Highly sensitive detection using traditional resonant cavity

图6 利用传统谐振腔实现高灵敏度探测

(5)利用强关联系统的临界状态增强系统探测灵敏度。强关联系统在临界点附近对外场的扰动十分敏感,在量子传感领域这已是普遍共识。然而受限于多体系统相变过程制备难度高、缺乏外场对临界点的调控技术,利用强关联系统的临界状态去做量子传感一直未能实现。2022年,中国科学技术大学丁冬生等成功发展了基于里德堡原子临界点与无线电场的耦合技术,利用多体系统相变点对于微波扰动更加敏感的特点,显著提高了里德堡原子探测系统的精度和灵敏度。如图7所示,多体系统中的原子透射谱在相变点附近变得更加陡峭,相当于一把频域上刻度更细的尺子,因此对于微波测量具有更高的精度。最终实现的系统灵敏度和最小可测场强分别达到了 $49 \text{ nV} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, $3.8 \text{ nV}/\text{cm}$ ^[48]。

(6)超冷原子体系。相对室温下的热原子而言,超冷原子体系拥有更低的运动速度、更低的原子系统碰撞概率、更长的原子退相干时间等优势,可有效提高量子精密测量系统的精度和灵敏度^[49],一些逼近或突破标准量子

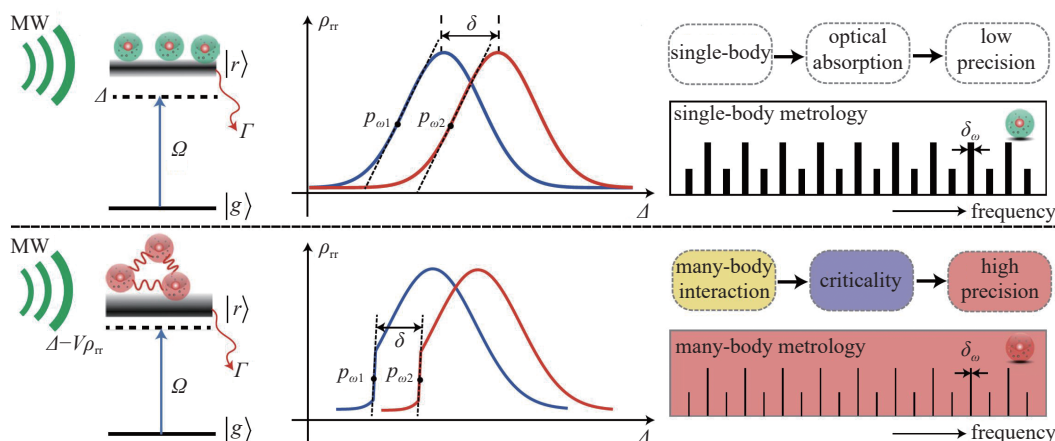


Fig. 7 Comparison of precision measurement using single (top) and many-body system (bottom)^[48]

图7 利用单体(上)和多体系统(下)实现精密测量的对比^[48]

极限(standard quantum limit, SQL)测量的实验已经实现^[50-53]。早在2011年,在微波场的作用下,Tanasittikosol等就利用780 nm的探测光和480 nm的耦合光在超冷铷原子体系中观察到了EIT-AT效应^[54]。2016年,来自法国的研究小组利用 $J \approx 25$ 的单个圆态里德堡原子经薛定谔猫态演化实现接近海森堡极限探测极限的高精密微波电场测量,100 ns积分内单次探测灵敏度可达 1.2 mV/cm ^[55]。2020年,华南师范大学朱诗亮、颜辉团队证实(图8),相对于基于EIT光谱的探测,基于超冷原子的电磁诱导吸收(electromagnetically induced absorption, EIA)效应在线性区的微波拉比频率比和AT分裂之间的关系更有效,实验的鲁棒性也更强,最终实现了 $100 \mu\text{V/cm}$ 的微波电场探测^[44];2023年,该小组再次利用冷原子达到了标准量子极限^[56]。

提升灵敏度一直是里德堡原子无线电传感领域的重要目标,2022年,中国科学院精密测量科学与技术创新研究院刘红平研究小组将里德堡原子探测系统的激光、微波的条件进行了详细优化,将灵敏度提升到 $12.5 \text{ pV} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ^[57]。2023年,该团队进一步将灵敏度提升到了 $5.102 \text{ nV} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,实现了彼时里德堡原子无线电系统探测灵敏度的国际最好指标^[58]。最近,欧洲的研究团队通过自由空间六波混频过程,使用里德堡原子系统将GHz场转换为近红外光学信号,最大限度地减少噪声干扰,其灵敏度达到 $3.98 \text{ nV} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ^[59],为进一步提升里德堡原子的探测灵敏度提供了新的思路。相信随着里德堡原子无线电测量技术的不断进步、新的理论不断提出、新技术的不断完善,灵敏度将会进一步提高。

2.2 探测频段

基于EIT-AT分裂的原理,想要实现里德堡原子接收机对不同频率的无线电波的响应,需要调谐耦合光的波长,激发里德堡原子到不同的量子态。经典的无线电技术,如雷达、通信等大多工作在微波波段,这也是里德堡原子探测研究最多的频段。2012年,Shaffer研究小组实现了里德堡原子对无线电波测试的实验中,信号频率在14 GHz^[19]。2014年,NIST的Gordon等将热里德堡原子探测频率推广到了毫米波波段,在93.71 GHz和104.77 GHz两个频段实现了对无线电波的测试^[60]。同年,NIST的Holloway研究小组系统阐述了基于里德堡原子的微波测量可达到 $1 \sim 500 \text{ GHz}$ 的探测带宽且拥有自校准的独特优势,同时,他们通过铷里德堡原子实现了15.59、17.04、17.04、18.65、68.64以及104.77 GHz五个频率段的微波测试演示^[61]。2017年,北京计量科学研究院宋振飞小组和山西大学张临杰团队利用里德堡原子量子天线对K波段标准增益喇叭天线进行了天线增益测量,图9为实验测试装置示意图,图左侧是由探测光、耦合光、光电探测器等器件和碱金属原子气室组成的原子传感系统;图右侧是微波发射系统,主要包括天线、匹配的馈电网络和实现了校准的热敏电阻功率计量系统。测量结果与常规天线测量一致,这对于发展基于原子的无线电天线具有重要意义^[62]。如前所述,提高里德堡原子探测灵敏度的光学零差探测法、原子超外差法、光学重新泵浦法、腔增强探测、利用强关联系统的临界状态增强等方法也大多是在微波波段开展的相关实验。随着量子物理的广泛应用与原子光谱技术的成熟,国际上已经有研究组利用里德堡原子开始了THz波段的无线电波探测,并成功演示了太赫兹近场超高速成像的实验^[18,63],国内的华南师范大学研究团队和上海理工大学团队也开展了里德堡原子探测THz的相关研究^[64-65]。

除了可实现GHz、THz波段的无线电波探测,里德堡原子对小于1GHz的无线电波依然可以实现高精度、大动态范围的测试,只不过采用EIT-AT效应所需要的里德堡能级很高,已经处于原子的电离阈值,此时已经不能再采用上述方法。当MHz频段的弱射频场和里德堡原子相互作用时,原子能级会发生AC Stark频移和Floquet能级^[66],频移和射频场场强的平方成正比,一般采用微扰理论对实验数据进行分析 and 拟合^[67-68]。这方面典型的工作是2010年达勒姆大学Adams研究小组对射频场修饰下的里德堡暗态的研究^[67]。当没有外加射频场时,铷里德堡原子能级结构为一个标准的三能级,在探测光和耦合光的共同作用下,将铷原子激发到里德堡态,光电探测器检测探测光呈现EIT效应。在频率为 $2\pi \times 26 \text{ MHz}$ 的射频场作用下,EIT光谱开始产生AC Stark频移,且在EIT主峰两侧出现两个对称的2级边带光谱。此时采用弱场下的微扰理论就可以完成对射频场场强的拟合。在此基础上,再添加一个偏置的直流电压,可以观察到1级边带。整个系统的装置示意图、能级结构和实验结果如图10所示。

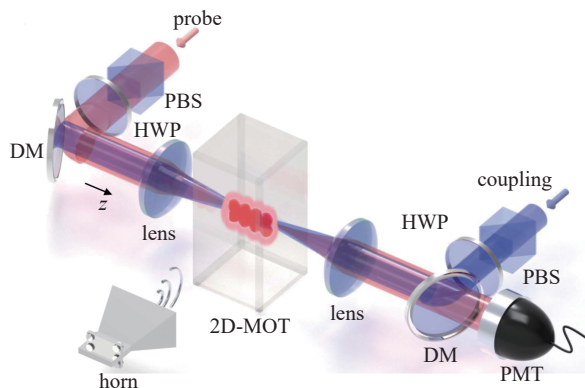


Fig. 8 Schematic diagram of microwave electric field detection using EIA effect in South China Normal University^[44]

图8 华南师范大学利用EIA效应实现微波电场探测的原理示意图^[44]

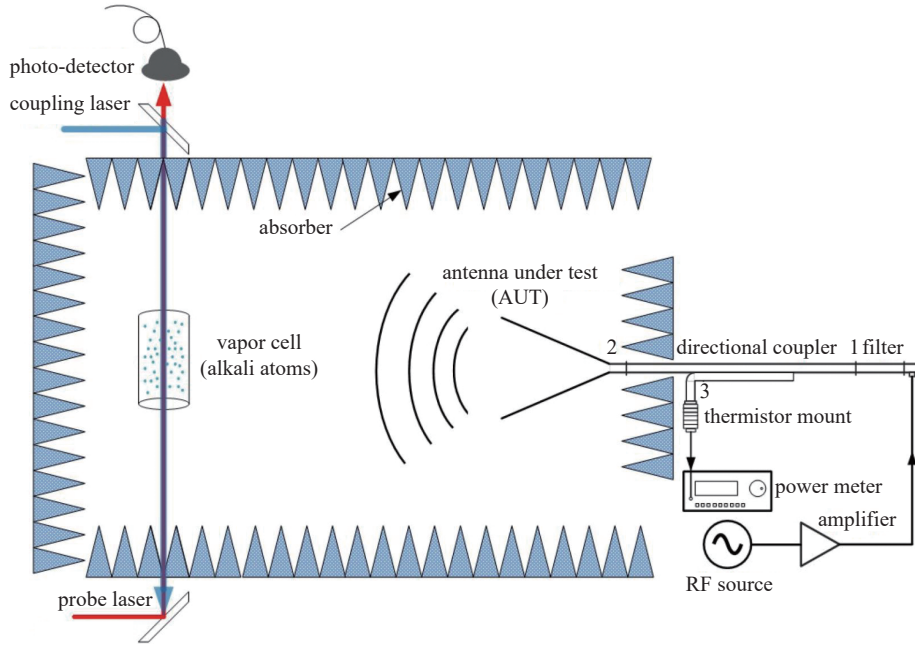


Fig. 9 Schematic diagram of experimental device of measuring K-band microwave by Shanxi University team using Rydberg atom^[62]

图 9 山西大学团队利用里德堡原子测量 K 波段微波的实验装置示意图^[62]

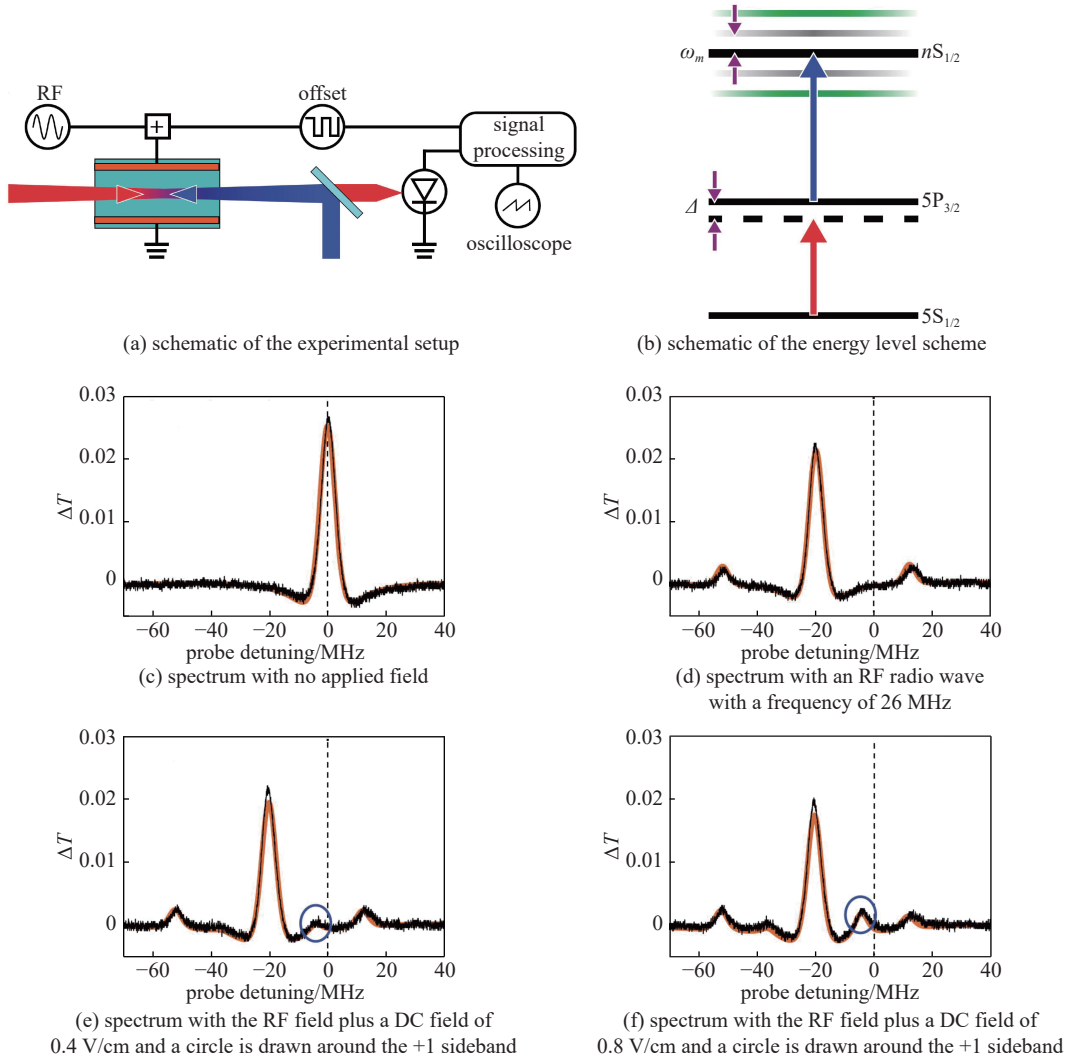


Fig. 10 Detection of MHz RF radio waves by Rydberg atomic system^[67]

图 10 里德堡原子系统探测 MHz 射频无线电波^[67]

在 MHz 频率强射频场作用下, 里德堡原子的 EIT 谱线会呈现更多丰富的特性, 已不再产生简单的 AC Stark 位移现象, 一般的微扰理论并不能对实验结果进行很好的模拟, 此时需要采用 Floquet 方法求解原子对射频场的响应^[69-72]。2016 年, 密歇根大学 Raithel 团队就对 50 MHz 和 100 MHz 频率的射频场进行了由弱到强的深入研究^[15]。2017 年, 山西大学贾锁堂、赵建明团队就利用了 S 态和 D 态里德堡原子分别对 70 MHz 和 100 MHz 的强射频场进行了研究^[14,16]。2019 年, 东密歇根大学的 Anderson 研究小组采用集成电极的原子气室, 如图 11 所示, 在亚毫米间隙内产生 50~500 MHz 的高强度射频电场, 利用里德堡原子能级中的 AC Stark、偶次谐波射频边带和射频诱导的避免交叉等光谱特征与非微扰 Floquet 理论计算的光谱进行匹配确定射频电场的大小。最终实现了射频场频率和电场振幅的精度分别为 1.0% 和 1.5%, 最大电场强度达到大约 5 kV/m 的测量^[73]。

在 MHz 以下频段, 山西大学的张临杰小组、赵延霆小组都已经分别在近两年开展了基于里德堡原子的工频电场(50 Hz 或 60 Hz 频段)实验研究, 对工频电场的溯源精确测量提供了重要的参考, 且有望在新一代高压设备应用中发挥重要价值^[74-76]。针对直流电场, 主要利用 DC Stark 效应实现电场的测试。由于里德堡原子在外加直流电场中产生强烈的能级移动, 导致光谱出现大小为 $-\alpha|E|^2/2$ 的频移(α 和 $|E|$ 分别表示原子的极化率和直流电场强度), 因此通过对 EIT 光谱测量频移就可以得到外加静电场强度, 目前探测到的最小静电场强度为 $\pm 20 \mu\text{V}/\text{cm}$ ^[23,77]。

需要注意的是, 如图 12 所示, 尽管里德堡原子能够响应的电磁波信号频率可覆盖 kHz 到 THz 波段, 但上述报道的实验结果大多都是选择合适的里德堡原子能级实现相应单个频点的测量研究。想要实现频率拓展, 通常可以改变耦合光波长以激发里德堡原子到新的能级实现不同的电磁波频率响应^[61,78-80], 虽然理论上可以实现很大的频率拓展, 然而这种方式的工作频点依然是离散的。为了实现一段连续电磁频带的探测, 近年来已经发展了好几种技术, 主要类型如下: 第一种是 2021 年美国陆军实验室 Meyer 等采用的非共振外差技术^[81], 如图 13 所示。这种技术基于里德堡原子在共振处(当信号不处于里德堡原子的共振跃迁频率点时, 即非共振信号)发生的斯塔克位移与入射场强的平方成正比这一规律, 结合本地振荡信号通过原子混频的外差技术实现了无需调谐激光器的波长即可实现宽频信号的探测。当然, 这种拓展频率探测的方式在非共振区的探测灵敏度比共振区的灵敏度更低; 第二种是利用外场信号(包括静电

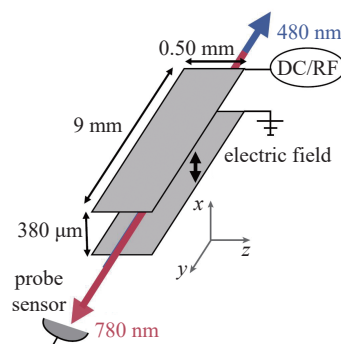


Fig. 11 Schematic diagram of atomic gas chamber detection with integrated electrode of Anderson research group^[73]

图 11 Anderson 研究小组集成电极的原子气室探测原理图^[73]

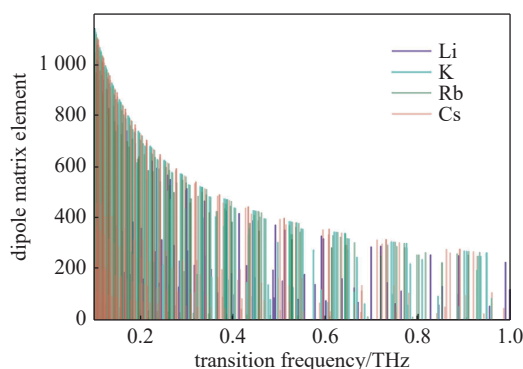


Fig. 12 Quasi-continuous transition frequencies and corresponding dipole moments from different alkali atoms^[33]

图 12 不同碱金属原子的跃迁频率和相应的偶极矩^[33]

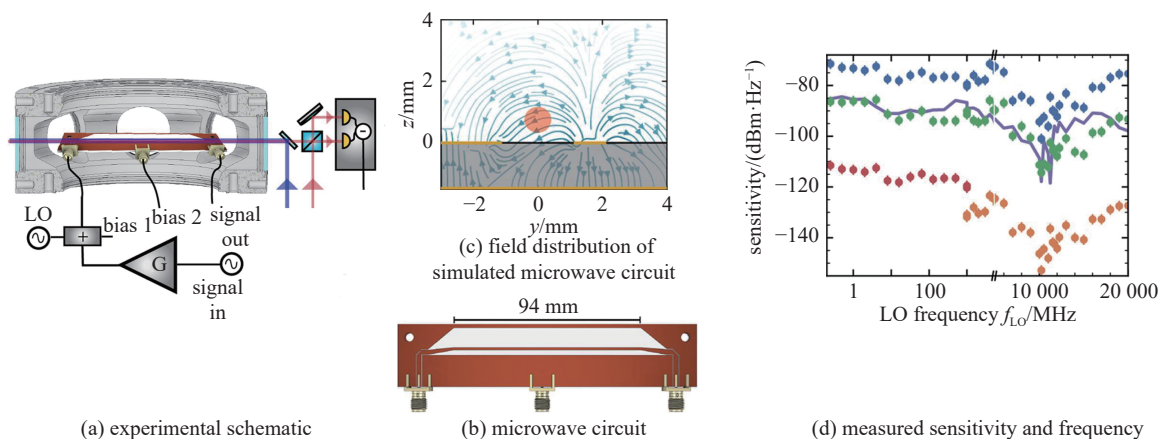


Fig. 13 Atomic radio receiver and spectrum analyzer prepared by Meyer et al using non-resonant heterodyne technique^[81]

图 13 Meyer 等利用非共振外差技术制备的原子无线电接收机和频谱仪^[81]

场、静磁场以及辅助微波场)改变里德堡原子的固有能级,使其跃迁频率和外场频率相互靠近,从而拓展探测信号的带宽,比如2021年美国NIST的Simons小组就采用添加辅助微波场修饰里德堡能级拓展了里德堡原子探测的工作频段^[82];第三种是2022年中国科学技术大学史保森、丁冬生团队采用的微波频率梳^[83]方案。利用里德堡原子对微波的混频响应特性,将多个微波频率梳信号设置为本振信号并和入射的信号场经里德堡原子混频后进行滤波输出拍频信号,经频谱仪分析从而完成对入射场的检测。因为多个微波频率梳信号的存在拓展了带宽,最终实现了125 MHz范围内的实时绝对频率测量。

2.3 极化

利用里德堡原子的超精细态和激光及被测微波电场极化方向的依赖关系,可以从EIT光谱特征中确定微波电场的极化方向。具体来说,在实际测量中,探测光、耦合光、微波场三者的偏振只有在特定的方向下才能让里德堡原子和微波电场产生相互作用。保持微波电场强度不变,改变探测光、耦合光的线偏振和微波的极化方向,可以得到不同的EIT光谱组合。探测光和耦合光的偏振通常是固定的,所以通过读取EIT光谱信息可得到微波电场的极化信息^[84-85]。

2013年,美国Shaffer小组率先开展了基于铷里德堡原子的微波电场矢量方向测试研究,实验示意装置如图14(a)所示,780 nm的探测激光和480nm的耦合激光束重叠并相向传播通过一个长宽高分别为10、10、30 mm的原子气室。旋转喇叭天线角度使其辐射出频率为14.233 GHz的不同线偏振微波电场,得到探测光EIT光谱随探测光与微波电场场偏振夹角的相互变化情况,如图14(b)所示,最终实现微波电场最佳极化方向分辨率为0.5°的测试结果。2018年,Anderson等集合传统谐振器实现电场增强的工作中也进行了入射场的偏振测量,且测量性能指标与仿真结果吻合较好^[39]。

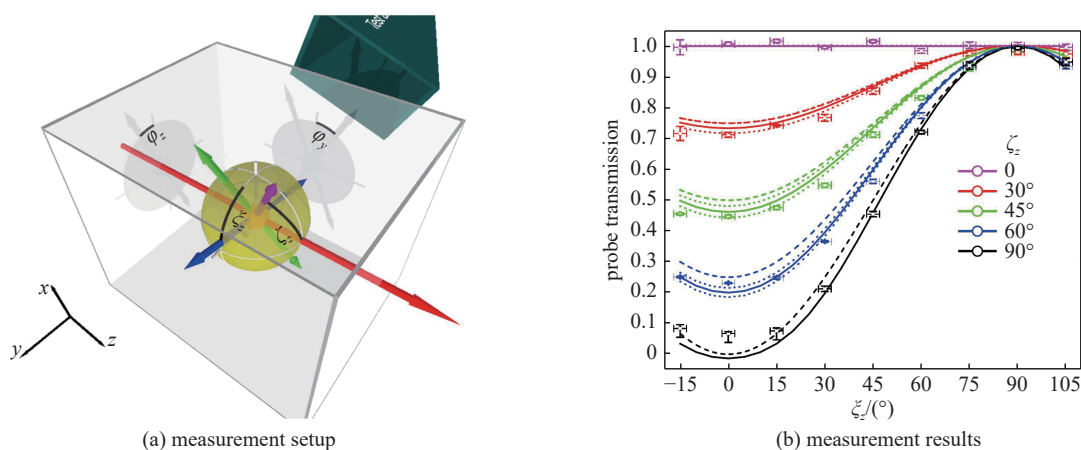


Fig. 14 Microwave electric field polarization measurement^[84]

图14 微波电场偏振测量^[84]

在国内,2017年山西大学赵建明团队基于射频场修饰下的D态铷里德堡原子实现了对外场极化方向测量和校准的工作^[14]。他们选取同一电场下不同的两条EIT谱线作为研究对象,将两条谱线的相对强度随电场极化方向进行校准,通过测两条谱线的相对强度获知射频电场的极化方向。图15所示为实验测量的两条光谱的相对强度与探测光和耦合光的极化方向与射频电场的极化方向之间的夹角的依赖关系,实线为理论计算的结果。插图中则显示当探测光和耦合光的极化方向与射频电场的极化方向之间的夹角为60°和30°时的射频EIT光谱,最后利用这种方法测量的射频电场极化方向的精确度为2°到7°。2017年,山西大学张临杰小组基于铷里德堡原子提出了一种新的方法首次对射频识别标签散射场开展了近场测量,实现了电场强度空间高分辨测量^[86]。2022年,该团队进一步利用

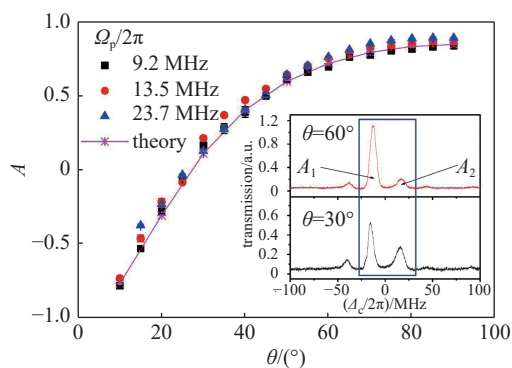


Fig. 15 Relationship between the measured parameters A and θ in the experiment, where A_1 and A_2 represent the areas of two spectral lines in the graph, with the solid line representing the theoretical results^[14]

图15 实验中测量的参数 A 和 θ 的关系曲线,其中 A_1 和 A_2 表示插图中两条谱线的面积,实线为理论结果^[14]

图 16 所示的装置, 在近场高分辨成像的实验中将空间分辨率提升到待测微波波长的 1/31, 同时克服了以往微波电场极化测量过程中互补角无法识别的难题, 实现了高达 1.64° 的角度分辨率^[86]。

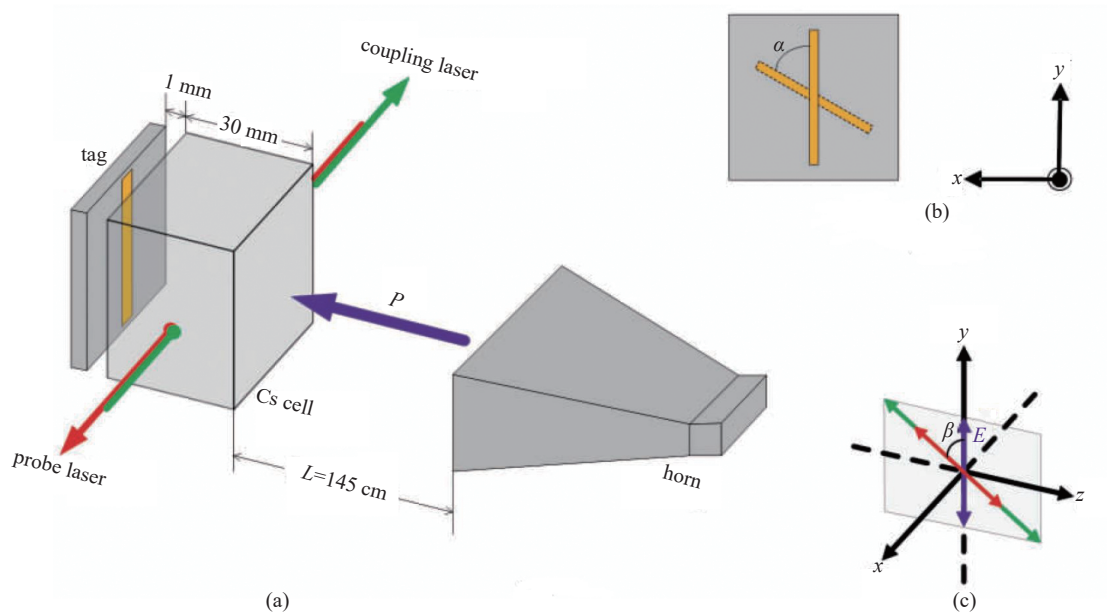
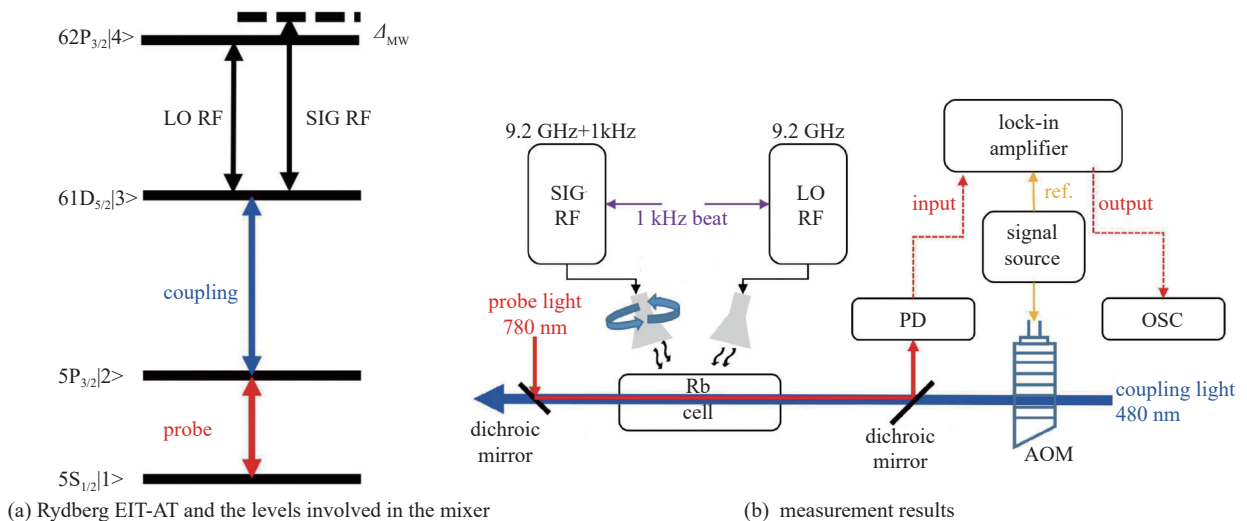


Fig. 16 Shanxi University's experimental setup for measuring the scattering field of radio frequency identification (RFID) tag^[86]

图 16 山西大学对射频识别标签散射场测量的实验装置^[86]

需要注意的是, 上述的几个工作方法需要复杂的建模分析才能获得微波极化率, 因此开发一种直接快速测量微波极化率的方法显得尤为重要。前面提高里德堡原子测量可以通过原子超外差的方式(本质为一个原子混频器)提高探测灵敏度, 同样, 原子混频器也可以用来解决测量极化的难题。2019年, Simons 等首次提出基于里德堡原子的混频器可以探测微波场的极化^[87]。2023年, 中国科学院大学贾凤东研究小组在 Simons 等工作基础上的进一步研究, 首次研究了混频器测量偏振的方法, 并系统地验证了混频器各参数对实验结果的影响^[88]。其原理和实验装置示意图如图 17(a)、(b)所示, 当本地微波场和信号场同时作用于里德堡原子气室时, 会产生一个拍频。拍频信号的信息就包含了本地场和信号场的信息, 且其强度随两个入射场极化角度的改变而改变。在实验中, 确定本地微波电场的振幅, 通过旋转本地微波电场的极化来测量信号微波电场的极化。结果表明, 在 180° 的振荡范围内, 改变不同的探测光和耦合光的偏振, 原子混频器的信号输出幅度和探测信号场极化的实验结果和理论预测吻合较好, 如图 17(c)、(d)所示。图 17(c)中探测光为圆偏振, 耦合光为线偏振; 图 17(d)中探测光和耦合光都为圆偏振。与基于 EIT 效应的微波电场传感器利用微波电场偏振在线偏振探测光上的投影来实现微波偏振测量不同, 此方案不产生 EIT 效应的光场偏振的影响, 这项工作大大简化了基于里德堡原子测量无线电极化的理论模型和实验系统, 具有广阔的测量前景。



(a) Rydberg EIT-AT and the levels involved in the mixer

(b) measurement results

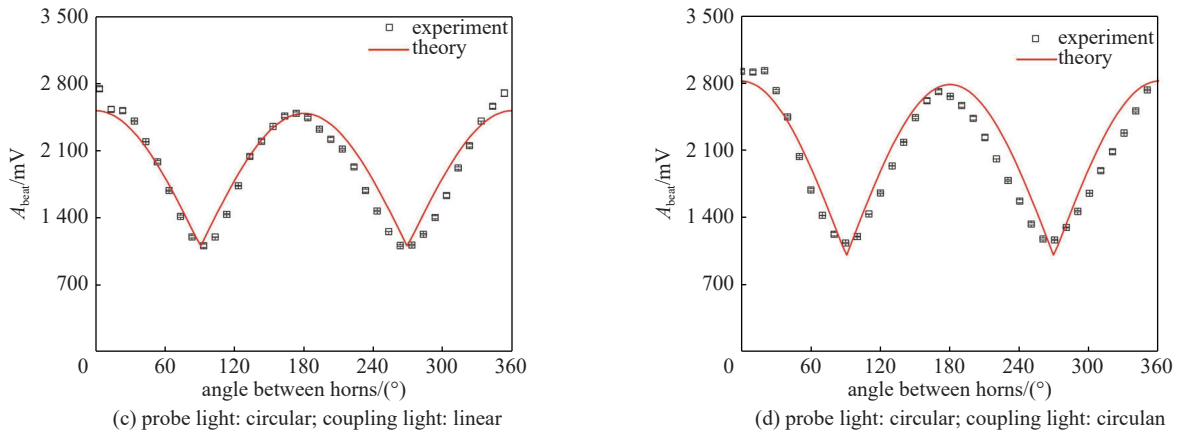


Fig. 17 Measurement of polarization based on Rydberg atomic mixer^[88]

图 17 基于里德堡原子混频器测量偏振^[88]

3 实用化的探索

基于里德堡原子的无线电波传感和测量研究已经取得了众多成果,但总体而言,目前主要以原理验证为主,其技术应用尚在探索之中,更多处于实验室研究阶段。可喜的是,相关研究团队始终在推进里德堡原子的实用化进展:

(1)在无线电波高分辨成像方面,使用基于偶极子天线的探头测量无线电场的空间分布时,其分辨率一般仅能达到待测信号波长的 $1/2 \sim 1/4$,且由于测量的是探头空间范围内的平均电场,因此传统的探头往往伴随着空间分辨率差、探测精度低的缺陷。此外,传统天线测量过程中需要校准,还会对待测场产生扰动,这些在工程实践中是不受欢迎的。里德堡原子在双光子激发下探测射频场,所以其空间分辨率不由容纳原子的蒸气室大小决定,而是由两束激光的宽度决定,并受到激光波长的光学衍射极限的限制,这比传统探头的测量分辨率有了极大的提高,有望在电磁兼容、集成电路等电路成像领域发挥重要作用。2012年,瑞士研究团队基于热里德堡原子实现了分辨率达到 $350 \mu\text{m}$ 的二维微波场成像,并提出可通过将原子气室组阵以进一步提高分辨率^[89];2014年,Holloway 等利用 EIT-AT 效应测量了在 17.04 GHz 和 104.77 GHz 的射频场作用下玻璃圆柱体内部的电场分布,获得了大约 $100 \mu\text{m}$ 的空间分辨率^[29];同一年,Shaffer 等利用里德堡原子系统对 6.9 GHz 微波电场进行电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)成像实现了 $66 \mu\text{m}$ 的空间分辨率,如图 18 所示。若减小原子气室尺寸,并优化成像器件的灵敏度,有

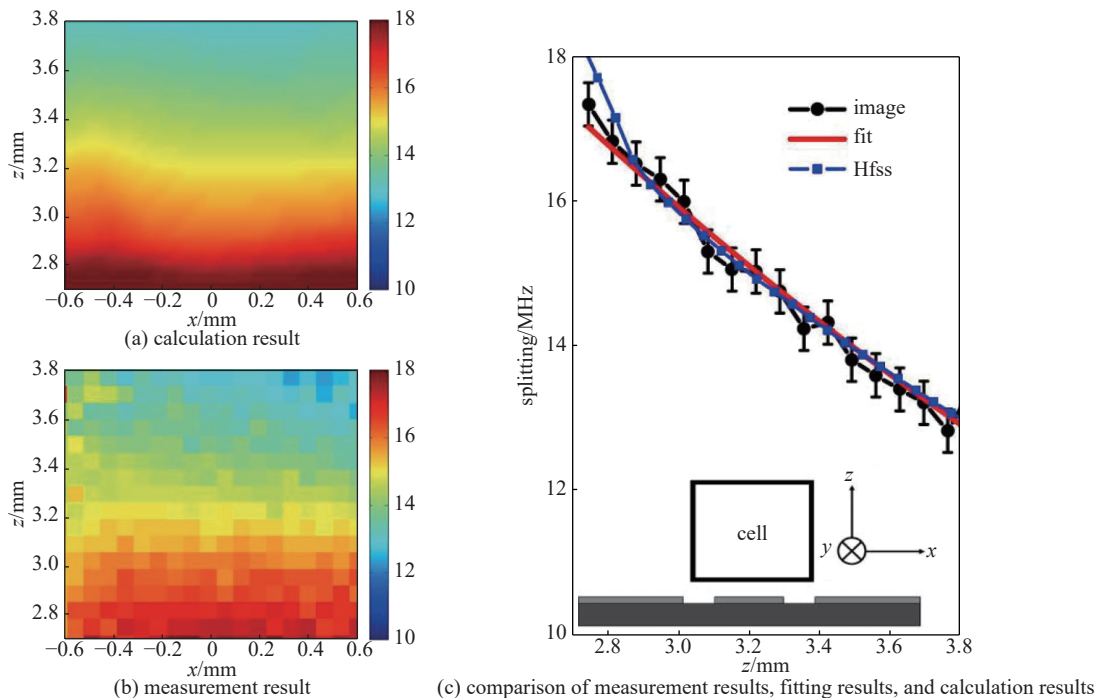
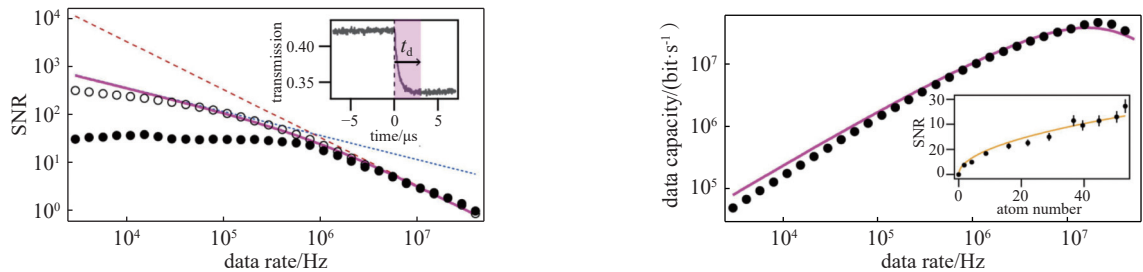


Fig. 18 Two-dimensional imaging results^[90]

图 18 二维成像结果^[90]

望测得小于 $10\ \mu\text{m}$ 的空间分辨率^[90]。

(2) 在通信实用化研究方面, 首先需要对里德堡原子对电场的幅度、频率调制的响应特征进行研究。2016年, 美国密西根大学团队在实验中分别在铷原子的 $60S_{1/2}$ 和 $58D_{5/2}$ 两个里德堡态上调制了 50 MHz 和 100 MHz 的电场, 研究了里德堡原子量子态对电场的幅度、频率调制的响应特性^[15]; 2018年, 新西兰研究小组在实验中首次报道了里德堡原子量子天线调幅微波场的光纤通信实验, 分别利用载频频率 12.7、14.2、17.0 和 19.3 GHz 的微波实现了大于 1 MHz 信号带宽的传输^[91]; 同一年, 美国马里兰大学和美国陆军研究实验室的研究人员利用 17 GHz 载频实现了幅度调制通信更大的数据传输率, 达到了 8.2 Mbit/s, 并演示了 8 位编码的 PSK 数字通信协议^[92]; 进一步, 该团队再次使用一种基于热里德堡原子的无线电接收天线, 在极小的电场范围内接收编码在电磁场中的数据, 其传感体积不到电场波长的立方的 10^{-7} 。他们引入了数据容量的标准量子限制, 并在实验上进行了 10 kHz 到 30 MHz 带宽的数据接收。这项工作提供了一个可替代经典通信天线的里德堡无线电天线原型, 避免了 Chu-Harrington 极限, 表明了里德堡原子微波量子天线可以有效克服天线尺寸效应, 如图 19 所示^[93]; 2019年中国山西大学在幅度调制下的 PSK 协议通信信号保真度、动态响应范围^[94] 以及微波载波的带宽^[95] 等方面进行了研究。同年美国 NIST 研究组利用里德堡原子超外差接收机体制, 实现了基于里德堡原子量子天线在 BPSK、QPSK 以及 QAM 调制协议下通信实验^[96]。2023年, 英国的 Menchetti 等团队巧妙地提出了一种无本地振荡器的里德堡原子通信接收机, 他们在不使用本地振荡器检测射频调制信号的情况下检测 5G 频率载波 (3.5 GHz) 并从载波中解码数字信号的能力, 利用该技术进行数据编码和提取, 通过多种编码方案实现了 238 kbit/s 的数据速率传输^[97]。



(a) as the data transmission rate increases, the signal-to-noise ratio remains basically unchanged below 1 MHz; after exceeding 1 MHz, the signal-to-noise ratio decreases significantly

(b) SNR data from (a) are used to plot data capacity versus data rate

Fig. 19 Using a quantum sensor based on thermal Rydberg atoms to receive data encoded in electromagnetic fields in the extreme electrically small regime^[93]

图 19 电小范围内基于里德堡原子实现信号接收^[93]

(3) 在集成化方面, 2018年, NIST 研究小组将矩形波导和光纤波导和原子气室进行集成, 开始了器件小型化的探索^[98-99]。2019年, 该小组又将原子气室和平行板波导进行集成^[88]。2020年, 美国里德堡公司将整个实验系统开始制备成可搬运的结构, 并开展了对脉冲信号成像的研究^[100]。2021年, 美国陆军研究室 Meyer 等将传统平面微波波导和里德堡原子进行耦合制备为小型化、高灵敏度、高线性动态范围、较大瞬时带宽的原子频谱仪和射频接收机^[81]。2022年, 国防科技大学付云起团队提出了一种提高传输效率的光学耦合原子气室探头^[101]。最近, 华南师范大学颜辉、边武等已经实现了可搬运原子微波电场测量仪的制备^[102-103]。这些工作都促进了里德堡原子无线电集成技术的发展。

(4) 在相位测量方面, 早期基于 EIT-AT 效应工作的里德堡原子电场计虽然对无线电振幅的测量可追溯至普朗克常数并实现了优于传统金属天线电场计的测量精确度和准确度, 但实现无线电信号相位的测量一直没有很好的解决方案。而相位的测量是包括天线计量学、通信和雷达等诸多重要应用的必要组成部分, 因此对相位测量的研究显得尤为重要。2019年, 美国 NIST 的 Holloway 团队提出利用里德堡原子作为混频器, 将高频的无线电射频场下变频到 kHz 量级的中频信号并映射到探测光的透射谱, 进而测量探测光透射谱并结合已知的本地场可反演出射频场的相位、频率和振幅信息。实验装置如图 20 所示, 最终他们利用这种方法测量了喇叭天线与里德堡原子探测系统不同距离时无线电波的相移, 且实验结果表明基于里德堡原子的射频相位测量可将射频场的传播常数测量到理论值的 0.1% 误差内^[104]。如前所述, 2020年山西大学将里德堡原子做出超外差的混频器实现了超高灵敏度的探测, 此外, 他们也对无线电波的相位进行了测量, 结果表明测量的电场相位和设定电场相位保持高度的一致性, 最终实现了 0.6° 的相位分辨率^[27]。除了利用原子的混频特性外, 2022年, 美国里德堡科技公司的 Raithel 等提出可使用全光相位法实现无线电波相位的探测。这种方式无需信号已知的本地场, 利用不同的里德堡态构建为一个原

子干涉仪以增强对入射场相位和振幅的探测灵敏度。当对入射场相位进行调制时,可测量光学信号确定入射场的相位信息,最终实现了 2 mrad(约为 0.1°)的相位分辨率^[105]。

(5)里德堡原子在其他实用化方面的研究近年来也正在加速推进。2019年,Holloway等利用里德堡原子对乐器演奏进行实时录音^[106];2020年,山西大学团队实现了基于多普勒频移的微波场测速原理验证,可实现的测速范围覆盖数米每秒到数千米每秒^[27];同年,Cardman等对八木天线完成了近场测量和成像^[107];2022年,中国科学技术大学丁冬生团队克服了一般里德堡原子进行无线电探测需要求解主方程的过程,将原子传感与深度学习有机结合,降低了里德堡原子间相互碰撞和环境带来的噪声影响,充分利用里德堡原子具有的高探测灵敏度特点对多个频率的微波电场进行解调,为里德堡原子接收机应用于同时探测多个目标提供了参考路径和实现方式^[108];2023年,Meyer等实现了从 1.7 GHz 到 116 GHz 的五个不同信号的同时解调和检测,展示了基于里德堡原子的无线电探测系统在多波段检测的超带宽优势^[109]。里德堡原子无线电技术实用化落地过程中也必须考虑系统工作的动态范围,近年来针对这一指标也取得了较好的突破:2020年,山西大学基于里德堡原子的超外差接收机达到了 90 dB 的线性动态范围^[27]。2021年和 2022年,美国陆军和华南师范大学分别基于里德堡原子的非共振外差技术和基于辅助微波场的外差探测方式实现了 80 dB 的线性动态范围^[81,110]。随着理论的不断深入、探测系统的不断优化,里德堡原子有望在媲美传统无线电探测的具体应用中跨上新的台阶。

4 总结与展望

物理学与信息技术等学科交叉融合而来的量子科学与技术,经过二十多年来的发展,已经展示出了在推动全球科技进步方面的巨大潜力,受到了全世界的关注。在无线电技术面临众多瓶颈的当下,充分将量子信息科技应用在数据通信、雷达探测、卫星定位、天文探测、气象、医疗等领域中突破传统无线电技术的探测灵敏度、精度及准确度引起了研究热潮。基于里德堡原子的无线电技术因具备高灵敏度、可溯源至国际物理常数、大工作带宽、具有亚波长空间高分辨率、对被测场扰动小、原子本身不存在 Johnson-Nyquist 噪声等优势可解决传统无线电探测面临的众多瓶颈问题。毫无疑问,里德堡原子技术的发展将有望对传统无线电技术产生颠覆性的冲击。尤其是,美国国防高级研究计划局为推动基于里德堡原子的无线电技术不遗余力,已于 2020 年开展了“量子孔径”(Quantum Apertures)计划以展示原子无线电技术在国防领域中的优势,这进一步促进了原子无线电技术的实用化发展。除了美国首先关注的军事领域,从民用的角度考量里德堡原子技术可能引发的新变革同样具有很强的战略和前瞻意义。可以说,它有可能是下一代雷达、通信、导航等设备的核心技术,在提升国防安全、社会民生等方面的应用前景十分广阔,最终原子无线电技术发挥出的效能将会远超我们的想象。

诚然,里德堡原子的发展将对下一代无线电技术产生巨大的影响,然而这一领域的基础和应用研究,仍面临一些共性的核心问题和关键技术瓶颈需要进一步攻关突破。未来,还需要解决里德堡原子无线电探测的一些关键技术和挑战主要包括:

(1)先进激光系统的制备

里德堡原子无线电系统中,低噪声的激光系统是整个实验系统最为关键的部分。想要实现高灵敏度、高精度、大动态范围频段的无线电系统探测,激光系统最好需具备极低的频率噪声和强度噪声、拥有足够的稳定性和高精度的频率扫描特性,同时支持较大范围的无跳模扫描。然而这些系统体积大,价格昂贵,限制了里德堡原子无线电传感系统的便携性和可扩展性。因此,如何制备满足以上所提要求的先进激光器系统和光纤耦合器件,同时降低激光系统的成本,成为将来高性能里德堡原子传感系统需要突破的一个重要技术方向。

(2)里德堡原子探测系统集成化

以山西大学的超外差里德堡原子无线电系统为例^[27],整个系统主要包括激光器系统、激光频率和功率稳定系统、原子气室、微波系统、光路和数据采集系统等部分。可见,整个系统体积较大且复杂,目前的里德堡原子无线

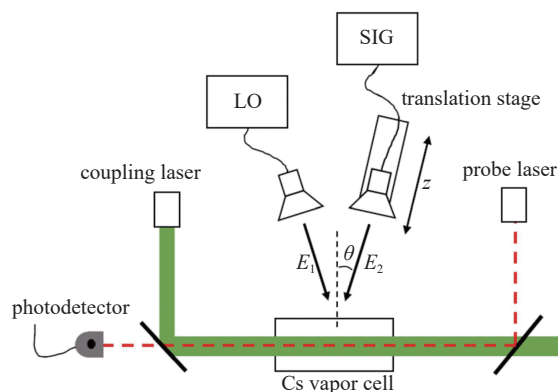


Fig. 20 Experimental schematic of NIST using atomic mixer to realize phase measurement^[104]

图 20 NIST 利用原子混频器实现相位测量的实验装置图^[104]

电探测系统难以满足可搬移、便携式等应用要求,所以另一个亟需解决的瓶颈是实现里德堡原子无线电探测系统的集成化、小型化。最近,Shaffer 研究小组利用微机电系统制备技术,将里德堡原子气室小型化,为进一步优化整个探测系统提供了参考途径^[11]。

(3) 进一步提升里德堡原子接收机的探测灵敏度

当前,室温下传统雷达或者接收机受限于金属自由电子热噪声的影响,其理论探测灵敏度约为 -174 dBm/Hz。虽然里德堡原子接收机已经在探测灵敏度方面取得了很大的进展,但目前还没有报道出超越传统接收机灵敏度的工作。如何继续提升整个量子系统的探测灵敏度,早日突破经典接收机热噪声灵敏度成为了里德堡原子探测的一个里程碑式的目标。

(4) 与现有无线电系统的有机结合

在关注里德堡原子无线电技术的传感与探测的同时,还需要注意的是,里德堡原子无线电系统并不能发射信号,需要与现有的无线电发射系统有机结合,与传统天线及其配套设备仪器集成协同工作、实现发射接收一体化是未来要考虑的重要实用化落地措施。

(5) 里德堡原子探测阵列研究

类比传统天线通过组阵的方式实现更高灵敏度、更高精度的探测技术,发展里德堡原子阵列探测将是一个具有吸引力的方向;未来的里德堡原子雷达探测系统可能是基于里德堡原子阵列组建的探测系统,这将进一步提高里德堡原子探测系统的灵敏度,实现电磁波信号幅度、频率和极化等多参量的精确测量,媲美甚至超越传统雷达系统的探测性能。

(6) 扩展瞬时带宽

经典无线电系统中,瞬时带宽表示天线系统可以同时响应的频率范围,即系统可以实时接收信号的带宽。受限于里德堡原子的能级寿命(系统达到稳态的驰豫时间)^[23],里德堡原子无线电探测系统瞬时带宽很窄,为数 kHz~10 MHz,远小于传统无线电接收机接近 GHz 的带宽,瞬时带宽小是里德堡原子无线电探测系统的一个主要缺点。根据香农公式,信道能够传输的最大信息速率和信道的带宽成正比,想要将里德堡原子用在高速通信等应用中,就必须开发新的技术来拓展瞬时带宽。

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] 约翰·D. 克劳斯, 罗纳德·J. 马赫夫克. 天线[M]. 章文勋, 译. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2018. (Kraus J D, Marhefka R J. *Antennas: for all applications* [M]. Zhang Wenxun, trans. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018)
- [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] Chu L J. Physical limitations of omni-directional antennas[J]. *Journal of Applied Physics*, 1948, 19(12): 1163-1175.
- [5] Harrington R F. Effect of antenna size on gain, bandwidth, and efficiency[J]. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1960, 64D(1): 1-12.
- [6] McLean J S. A re-examination of the fundamental limits on the radiation Q of electrically small antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1996, 44: 672.
- [7] 贺青. 面向量子信息处理的超导微波谐振器研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022. (He Qing. *Researches on superconducting microwave resonators for quantum information processing*[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022)
- [8] Bao Han, Duan Junlei, Jin Shenchao, et al. Spin squeezing of 10^{11} atoms by prediction and retrodiction measurements[J]. *Nature*, 2020, 581(7807): 159-163.
- [9] Ji Wentao, Zhang Lin, Wang Mengqi, et al. Quantum simulation for three-dimensional chiral topological insulator[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125: 020504.
- [10] Zheng Xin, Dolde J, Lochab V, et al. Differential clock comparisons with a multiplexed optical lattice clock[J]. *Nature*, 2022, 602(7897): 425-430.
- [11] Stray B, Lamb A, Kaushik A, et al. Quantum sensing for gravity cartography[J]. *Nature*, 2022, 602(7898): 590-594.
- [12] Jiang Min, Su Haowen, Garcon A, et al. Search for axion-like dark matter with spin-based amplifiers[J]. *Nature Physics*, 2021, 17(12): 1402-1407.
- [13] Aasi J, Abadie J, Abbott B P, et al. Enhanced sensitivity of the LIGO gravitational wave detector by using squeezed states of light[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(8): 613-619.
- [14] Jiao Yuechun, Hao Liping, Han Xiaoxuan, et al. Atom-based radio-frequency field calibration and polarization measurement using cesium nD_J Floquet states[J]. *Physical Review Applied*, 2017, 8: 014028.
- [15] Miller S A, Anderson D A, Raithel G. Radio-frequency-modulated Rydberg states in a vapor cell[J]. *New Journal of Physics*, 2016, 18: 053017.
- [16] Jiao Yuechun, Han Xiaoxuan, Yang Zhiwei, et al. Spectroscopy of cesium Rydberg atoms in strong radio-frequency fields[J]. *Physical Review A*, 2016, 94: 023832.

- [17] Jau Y Y, Carter T. Vapor-cell-based atomic electrometry for detection frequencies below 1 kHz[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13: 054034.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Xiao Min, Li Yongqing, Jin Shaozheng, et al. Measurement of dispersive properties of electromagnetically induced transparency in rubidium atoms[J]. *Physical Review Letters*, 1995, 74(5): 666-669.
- [21] Harris S E. Pondermotive forces with slow light[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(19): 4032-4035.
- [22] Li Huaqiang, Hu Jinlian, Bai Jingxu, et al. Rydberg atom-based AM receiver with a weak continuous frequency carrier[J]. *Optics Express*, 2022, 30(8): 13522-13529.
- [23] Liu Bang, Zhang Lihua, Liu Zongkai, et al. Electric field measurement and application based on Rydberg atoms[J]. *Electromagnetic Science*, 2023, 1: 0020151.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Kanda M. Standard probes for electromagnetic field measurements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1993, 41(10): 1349-1364.
- [27] Jing Mingyong, Hu Ying, Ma Jie, et al. Atomic superheterodyne receiver based on microwave-dressed Rydberg spectroscopy[J]. *Nature Physics*, 2020, 16(9): 911-915.
- [28] 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.
- [29] 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: 244102.
- [30] Mohapatra A K, Bason M G, Butscher B, et al. A giant electro-optic effect using polarizable dark states[J]. *Nature Physics*, 2008, 4(11): 890-894.
- [31] Zhang Linjie, Liu Jiasheng, Jia Yue, et al. Vapor cell geometry effect on Rydberg atom-based microwave electric field measurement[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27: 033201.
- [32] Fan Haoquan, Kumar S, Sheng Jiteng, et al. Effect of vapor-cell geometry on Rydberg-atom-based measurements of radio-frequency electric fields[J]. *Physical Review Applied*, 2015, 4: 044015.
- [33] Yuan Jinpeng, Yang Wenguang, Jing Mingyong, et al. Quantum sensing of microwave electric fields based on Rydberg atoms[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2023, 86: 106001.
- [34] Fan Haoquan, 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: 104004.
- [35] Kumar S, Fan Haoquan, 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.
- [36] Liu Xiubin, Jia Fengdong, Zhang Huaiyu, et al. Using amplitude modulation of the microwave field to improve the sensitivity of Rydberg-atom based microwave electrometry[J]. *AIP Advances*, 2021, 11: 085127.
- [37] Kumar S, Fan Haoquan, Kübler H, et al. Atom-based sensing of weak radio frequency electric fields using homodyne readout[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 42981.
- [38] Li Shaohua, Yuan Jinpeng, Wang Lirong. Improvement of microwave electric field measurement sensitivity via multi-carrier modulation in Rydberg atoms[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10: 8110.
- [39] 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: 073501.
- [40] 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: 204001.
- [41] Chopinaud A, Pritchard J D. Optimal state choice for Rydberg-atom microwave sensors[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 16: 024008.
- [42] 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: 043103.
- [43] 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: 214001.
- [44] Liao Kaiyu, Tu Haitao, Yang Shuzhe, et al. Microwave electrometry via electromagnetically induced absorption in cold Rydberg atoms[J]. *Physical Review A*, 2020, 101: 053432.
- [45] 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 Mingyong. Microwave precision measurement based on Rydberg-atom superhet[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020)
- [46] Li Shaohua, Yuan Jinpeng, Wang Lirong, et al. Enhanced microwave electric field measurement with cavity-assisted Rydberg electromagnetically induced

- transparency[J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 846687.
- [47] 武博, 林沂, 吴逢川, 等. 基于平行板谐振器的量子微波电场测量技术[J]. *物理学报*, 2023, 72: 034204. (Wu Bo, Lin Yi, Wu Fengchuan, et al. Quantum microwave electric field measurement technology based on enhancement electric field resonator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2023, 72: 034204)
- [48] Ding Dongsheng, Liu Zongkai, Shi Baosen, et al. Enhanced metrology at the critical point of a many-body Rydberg atomic system[J]. *Nature Physics*, 2022, 18(12): 1447-1452.
- [49] 张临杰, 景明勇, 张好. 基于里德堡原子的微波电场量子传感[J]. *山西大学学报(自然科学版)*, 2022, 45(3): 712-722. (Zhang Linjie, Jing Mingyong, Zhang Hao. Quantum sensing of microwave electric fields based on Rydberg atoms[J]. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, 2022, 45(3): 712-722)
- [50] Riedel M F, Böhi P, Li Yun, et al. Atom-chip-based generation of entanglement for quantum metrology[J]. *Nature*, 2010, 464(7292): 1170-1173.
- [51] Gross C, Zibold T, Nicklas E, et al. Nonlinear atom interferometer surpasses classical precision limit[J]. *Nature*, 2010, 464(7292): 1165-1169.
- [52] Strobel H, Muessel W, Linnemann D, et al. Fisher information and entanglement of non-Gaussian spin states[J]. *Science*, 2014, 345(6195): 424-427.
- [53] Penasa M, Gerlich S, Rybarczyk T, et al. Measurement of a microwave field amplitude beyond the standard quantum limit[J]. *Physical Review A*, 2016, 94: 022313.
- [54] Tanasittikosol M, Pritchard J D, Maxwell D, et al. Microwave dressing of Rydberg dark states[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2011, 44: 184020.
- [55] Facon A, Dietsche E K, Grosso D, et al. A sensitive electrometer based on a Rydberg atom in a Schrödinger-cat state[J]. *Nature*, 2016, 535(7611): 262-265.
- [56] Tu Haitao, Liao Kaiyu, He Guodong, et al. Approaching the standard quantum limit of a Rydberg-atom microwave electrometer[DB/OL]. arXiv preprint arXiv: 2307.15617, 2023.
- [57] Cai Minghao, Xu Zishan, You Shuhang, et al. Sensitivity improvement and determination of Rydberg atom-based microwave sensor[J]. *Photonics*, 2022, 9: 250.
- [58] Cai Minghao, You Shuhang, Zhang Shanshan, et al. Sensitivity extension of atom-based amplitude-modulation microwave electrometry via high Rydberg states[J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 122: 161103.
- [59] Borówka S, Pylypenko U, Mazelanik M, et al. Continuous wideband microwave-to-optical converter based on room-temperature Rydberg atoms[J]. *Nature Photonics*, 2024, 18(1): 32-38.
- [60] Gordon J A, Holloway C L, Schwarzkopf A, et al. Millimeter wave detection via Autler-Townes splitting in rubidium Rydberg atoms[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105: 024104.
- [61] 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.
- [62] Song Zhenfei, Feng Zhigang, Liu Xinmeng, et al. Quantum-based determination of antenna finite range gain by using Rydberg atoms[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 1589-1592.
- [63] 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: 011027.
- [64] 陈志文, 余圳跃, 廖开宇, 等. 基于 Rydberg 原子天线的太赫兹测量[J]. *物理学报*, 2021, 70: 060702. (Chen Zhiwen, She Zhenyue, Liao Kaiyu, et al. Terahertz measurement based on Rydberg atomic antenna[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70: 060702)
- [65] Zhou Yanchen, Peng Ruijie, Zhang Jinbiao, et al. Theoretical investigation on the mechanism and law of broadband terahertz wave detection using Rydberg quantum state[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14: 5931808.
- [66] 焦月春, 赵建明, 贾锁堂. 基于 Rydberg 原子的超宽带射频传感器[J]. *物理学报*, 2018, 67: 073201. (Jiao Yuechun, Zhao Jianming, Jia Suotang. Broadband Rydberg atom-based radio-frequency field sensor[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67: 073201)
- [67] Bason M G, Tanasittikosol M, Sargsyan A, et al. Enhanced electric field sensitivity of rf-dressed Rydberg dark states[J]. *New Journal of Physics*, 2010, 12: 065015.
- [68] Tanasittikosol M. Rydberg dark states in external fields[D]. Durham: Durham University, 2011.
- [69] Anderson D A, Schwarzkopf A, Miller S A, et al. Two-photon microwave transitions and strong-field effects in a room-temperature Rydberg-atom gas[J]. *Physical Review A*, 2014, 90: 043419.
- [70] Anderson D A, Miller S A, Raitzel G, et al. Optical measurements of strong microwave fields with Rydberg atoms in a vapor cell[J]. *Physical Review Applied*, 2016, 5: 034003.
- [71] Yoshida S, Reinhold C O, Burgdörfer J, et al. Photoexcitation of $n \approx 305$ Rydberg states in the presence of an rf drive field[J]. *Physical Review A*, 2012, 86: 043415.
- [72] Coop S, Palacios S, Gomez P, et al. Floquet theory for atomic light-shift engineering with near-resonant polychromatic fields[J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32550-32559.
- [73] Paradis E, Raitzel G, Anderson D A. Atomic measurements of high-intensity VHF-band radio-frequency fields with a Rydberg vapor-cell detector[J]. *Physical Review A*, 2019, 100: 013420.
- [74] 崔帅威, 彭文鑫, 李松浓, 等. 基于里德堡原子的工频电场测量[J]. *高电压技术*, 2023, 49(2): 644-650. (Cui Shuaiwei, Peng Wenxin, Li Songnong, et al. Power frequency electric field measurement based on Rydberg atoms[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(2): 644-650)

- [75] 李伟, 张淳刚, 张好, 等. 基于里德伯原子 AC-Stark 效应的工频电场测量[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58: 1702002. (Li Wei, Zhang Chungang, Zhang Hao, et al. Power-frequency electric field measurement based on AC-stark effect of Rydberg atoms[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58: 1702002)
- [76] Liu Weixin, Zhang Linjie, Wang Tao. Atom-based power-frequency electric field measurement using the radio-frequency-modulated Rydberg spectroscopy[J]. Chinese Physics B, 2023, 32: 053203.
- [77] Osterwalder A, Merkt F. Using high Rydberg states as electric field sensors[J]. Physical Review Letters, 1999, 82(9): 1831-1834.
- [78] Holloway C, Simons M, Haddab A H, et al. A multiple-band Rydberg atom-based receiver: AM/FM stereo reception[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2021, 63(3): 63-76.
- [79] 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: 034001.
- [80] Anderson D A, Sapiro R E, Raithel G. An atomic receiver for AM and FM radio communication[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(5): 2455-2462.
- [81] 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: 014053.
- [82] 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: 032824.
- [83] Zhang Lihua, Liu Zongkai, Liu Bang, et al. Rydberg microwave-frequency-comb spectrometer[J]. Physical Review Applied, 2022, 18: 014033.
- [84] Sedlacek J A, Schwettmann A, Kübler H, et al. Atom-based vector microwave electrometry using rubidium Rydberg atoms in a vapor cell[J]. Physical Review Letters, 2013, 111: 063001.
- [85] 黄巍, 梁振涛, 杜炎雄, 等. 基于里德堡原子的电场测量[J]. 物理学报, 2015, 64: 160702. (Huang Wei, Liang Zhentao, Du Yanxiong, et al. Rydberg-atom-based electrometry[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64: 160702)
- [86] 任盛源, 景明勇, 张好, 等. 基于原子的射频识别标签近场散射场矢量测量[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(1): 298-303. (Ren Shengyuan, Jing Mingyong, Zhang Hao, et al. Atom-based vector measurement of near field scattering field of radio frequency identification tag[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(1): 298-303)
- [87] 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.
- [88] Wang Yuhan, Jia Fengdong, Hao Jianhai, et al. Precise measurement of microwave polarization using a Rydberg atom-based mixer[J]. Optics Express, 2023, 31(6): 10449-10457.
- [89] Böhi P, Treutlein P. Simple microwave field imaging technique using hot atomic vapor cells[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101: 181107.
- [90] Fan Haoquan, Kumar S, Daschner R, et al. Subwavelength microwave electric-field imaging using Rydberg atoms inside atomic vapor cells[J]. Optics Letters, 2014, 39(10): 3030-3033.
- [91] 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: 211108.
- [92] 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: 110502.
- [93] Deb A B, Kjærgaard N. Radio-over-fiber using an optical antenna based on Rydberg states of atoms[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112: 211106.
- [94] Jiao Yuechun, Han Xiaoxuan, Fan Jiabei, et al. Atom-based receiver for amplitude-modulated baseband signals in high-frequency radio communication[J]. Applied Physics Express, 2019, 12: 126002.
- [95] Song Zhenfei, Liu Hongping, Liu Xiaochi, et al. Rydberg-atom-based digital communication using a continuously tunable radio-frequency carrier[J]. Optics Express, 2019, 27(6): 8848-8857.
- [96] Holloway C L, Simons M T, Gordon J A, et al. Detecting and receiving phase-modulated signals with a Rydberg atom-based receiver[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(9): 1853-1857.
- [97] Menchetti M, Bussey L W, Gilks D, et al. Digitally encoded RF to optical data transfer using excited Rb without the use of a local oscillator[J]. Journal of Applied Physics, 2023, 133: 014401.
- [98] 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: 094101.
- [99] Simons M T, Gordon J A, Holloway C L. Fiber-coupled vapor cell for a portable Rydberg atom-based radio frequency electric field sensor[J]. Applied Optics, 2018, 57(22): 6456-6460.
- [100] Anderson D A, Sapiro R E, Raithel G. A self-calibrated SI-traceable Rydberg atom-based radio frequency electric field probe and measurement instrument[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(9): 5931-5941.
- [101] 林沂, 吴逢川, 毛瑞祺, 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: 170702. (Yi Li, Wu Fengchuan, Mao Ruiqi, et al. Development of three-port fiber-coupled vapor cell probe and its application in microwave digital communication[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71: 170702)
- [102] 边武, 郑顺元, 李仲启, 等. 可搬运原子微波电场测量仪[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60: 1106022. (Bian Wu, Zheng Shunyuan, Li Zhongqi, et al. A transportable Rydberg atomic microwave electrometry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60: 1106022)
- [103] 边武, 李仲启, 梁琼崇, 等. 基于里德堡原子天线的微波场强仪比对验证[J]. 导航与控制, 2022, 21(5/6): 185-191, 79. (Bian Wu, Li Zhongqi, Liang

- Qiongchong, et al. Comparison experiment of integrated microwave field strength meter based on Rydberg atomic antenna at room temperature[J]. *Navigation and Control*, 2022, 21(5/6): 185-191,79)
- [104] 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: 114101.
- [105] 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: 044020.
- [106] Holloway C L, Simons M T, Haddab A H, et al. A “real-time” guitar recording using Rydberg atoms and electromagnetically induced transparency: Quantum physics meets music[J]. *AIP Advances*, 2019, 9: 065110.
- [107] Cardman R, Gonçalves L F, Sapiro R E, et al. Atomic 2D electric field imaging of a Yagi-Uda antenna near-field using a portable Rydberg-atom probe and measurement instrument[J]. *Advanced Optical Technologies*, 2020, 9(5): 305-312.
- [108] Liu Zongkai, Zhang Lihua, Liu Bang, et al. Deep learning enhanced Rydberg multifrequency microwave recognition[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 1997.
- [109] 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: 014025.
- [110] Liu Xiaohong, Liao Kaiyu, Zhang Zuanxian, et al. Continuous-frequency microwave heterodyne detection in an atomic vapor cell[J]. *Physical Review Applied*, 2022, 18: 054003.
- [111] Noaman M, Amarloo H, Pandiyan R, et al. Vapor cell characterization and optimization for applications in Rydberg atom-based radio frequency sensing[C]. *Proceedings of the SPIE 12447, Quantum Sensing, Imaging, and Precision Metrology*. 2023: 173-178.