基于里德堡原子的微波传感与通信

廖开宇, 涂海涛, 张新定, 颜辉*, 朱诗亮*

广东省量子精密测量工程技术研究中心, 广东省量子调控工程与材料重点实验室, 华南师范大学物理与电信工程学院, 广州 510006

*联系人, 颜辉, E-mail: yanhui@scnu.edu.cn; 朱诗亮, E-mail: slzhu@nju.edu.cn

收稿日期: 2020-06-17; 接受日期: 2020-07-30; 网络出版日期: 2021-03-23

国家自然科学基金(编号: 91636218, 11804104)、广东省重点领域研发计划(编号: 2019B030330001)和广州市科技计划(编号: 201804020055, 20190202-0002)资助项目

摘要 随着国际单位制(SI)基本单位的全面重新定义, 经典实物基准逐步被以量子物理为基础的自然基准取代. 由于原子体系具有可复现、精确、稳定等特点, 基于原子体系已经衍生了很多的量子计量新技术. 里德堡原子具有极强的微波跃迁电偶极矩和极化率, 对外界电磁场非常敏感, 利用原子量子相干效应可实现超宽频段电磁场的高精度高灵敏度测量. 尤其对于频率高于1 GHz的微波, 利用里德堡原子建立微波量子基准的研究正在稳步推进. 此外, 全光学材质且超宽频段的原子天线在航空航天、军事通信等领域具有广泛的应用前景. 本文回顾了基于里德堡原子的微波传感和通信研究, 详细介绍了其在微波电场强度量子基准、相干探测、光载无线通信和数字通信等方面的相关进展, 讨论了其应用前景及今后可能的发展方向.

关键词 微波计量, 原子天线, 里德堡原子, 量子精密测量

PACS: 32.80.Rm, 03.50.De, 42.62.Fi

1 引言

1.1 微波计量

作为电子信息产业的主要基石之一, 微波技术在雷达、通信、气象、医疗等领域均有关键应用, 涉及上万亿的产业市场^[1,2]. 目前, 在微波计量过程中, 人们普遍遵循标准天线或标准场的方法, 采用偶极天线作为电场探头对微波进行校准测量^[3-6]. 偶极天线的最小测量电场值约为1 mV/cm, 根据所测频段的不同, 其测量不确定度一般在4%~20%的范围^[4]. 限制偶极天线测量准确度的主要原因是天线

本身会随时间推移或环境改变而变化, 标准场和标准天线的校准没有绝对固定的基准, 会引入较大的校准误差; 而且偶极探头均为金属材料, 会对待测电场产生干扰; 微波测量的空间分辨率受限于偶极探头的尺寸. 除了偶极探头, 也有以铌酸锂电光调制为代表的集成光波导电场探头^[7,8], 这种探头将最小测量值降低到100 μ V/cm, 不过仍需要额外校准, 同时也会干扰待测微波场. 随着微波技术的发展, 如5G通信, 对于微波天线性能的要求越来越高, 精确测量微波天线的辐射参数也愈发重要. 传统微波测量的准确度和灵敏度已经难以满足当今科学研究

引用格式: 廖开宇, 涂海涛, 张新定, 等. 基于里德堡原子的微波传感与通信. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 074202

Liao K Y, Tu H T, Zhang X D, et al. Rydberg atom based microwave sensing and communication (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 074202, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0218](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0218)

与技术应用的要求, 迫切需要全新的测量技术来突破传统微波测量的限制.

1.2 量子基准

2018年, 第26届国际计量大会表决通过了“修订国际单位制”的一号决议. 至此, SI的7个基本单位全部实行由基本常数定义, 计量科学全面进入“量子时代”^[9]. 在以量子物理为基础的自然基准取代经典实物基准的技术变革中, 产生了众多精密测量的新原理和新方法, 极大提升了计量基准的技术水平^[10-13]. 在计量单位量子化和量值传递扁平化的新趋势下, 建设新一代高准确度、高稳定性的无线电量子计量基准是国际计量关注的热门问题^[14-17].

里德堡原子是指最外层电子被激发到主量子数 n 非常大的高激发态原子, 它可以被看成是原子实和一个外层电子构成的类氢原子^[18]. 它有丰富的能级资源, 巨大的跃迁偶极矩和极化率, 百微秒量级的相干时间, 使得里德堡原子成为实现量子计算和量子精密测量的重要体系之一^[19-27]. 电场强度是国际计量委员会定义的无线电计量七个关键量之一. 以里德堡原子作为电磁场探头, 采用基于原子相干效应的全光学探测方法, 这种原子电场计已成功实现全频段(DC-500 GHz)的电场测量.

对于频率高于1 GHz的微波场, 美国奥克拉荷马大学的Shaffer小组^[28,29]在里德堡原子气室中利用微波耦合相邻里德堡能级产生的Autler-Townes(AT)效应实现了微波电场的精密测量. 而当待测射频场的频率低于1 GHz时, 所需的里德堡能级接近于原子电离阈值, 而且里德堡能级十分紧密, AT分裂的测量方法不再适用, 这时采用射频调制里德堡能级的方法进行测量. 英国杜伦大学的Adams小组^[30]和美国密歇根大学的Raithel小组^[31-33]利用调制边带光谱分别对长波长射频的弱场和强场区域进行测量; 随后, 山西大学的赵建明小组^[34]利用里德堡能级之间的交叉和免交叉频点作为校准点, 使得长波长射频测量的不确定度小于1%.

综上所述, 测量频率高于1 GHz的微波和低于1 GHz的长波长射频所采用的是完全不同的物理机制. 不过, 相比传统的电场测量方法, 基于里德堡原

子的全频段电场测量都具备下述的共性优势: 这些测量方法利用原子参数进行自校准, 不依赖于外部参考, 可溯源至基本物理常数; 电场计探头是玻璃泡封装的原子气体, 对待测电场干扰少, 且易于实现小型化和集成化; 同时, 由于以原子作为最小测量单元, 原子传感器的空间分辨率不受限于探头尺寸, 便于实现亚波长量级的成像. 尤其在电磁辐射计量方面, 随着测量精度的不断提高, 实现电场强度和功率的量子基准指日可待, 届时实现的全频段电磁场精密测量技术, 必将给通信、材料、军事、生命等领域带来深远的影响.

在里德堡原子的量子传感方面, 还有一些研究组在低温微波谐振腔中利用里德堡原子的非经典态实现了微波电场的精密测量等^[35]. 本文仅限于介绍基于里德堡原子相干效应的频率高于1 GHz的微波传感和通信方面的工作, 主要包括微波电场测量原理简介、场强基准、相干探测以及在通信上的应用. 除了上述研究组的工作外, 美国国家标准与技术研究院(NIST) Holloway研究组^[32,33]、美国陆军研究实验室Kunz研究组^[36]、山西大学张临杰和贾锁堂研究组^[37]、中国计量科学研究院(NIM)宋振飞研究组^[38]以及华南师范大学研究组^[39-43]等在此领域也开展了一系列研究工作.

2 里德堡原子电场计

2.1 原子相干效应

里德堡原子具有极大的极化率, 临近的里德堡能级跃迁处于微波频段, 且微波跃迁的电偶极矩正比于主量子数 n 的平方($\propto n^2$), 所以微弱的微波电场也能产生很高的耦合强度. 例如铯原子的 $56P_{3/2} \rightarrow 55D_{5/2}$ 共振跃迁频率约为4.2 GHz, 当微波电场强度为60 $\mu\text{V}/\text{cm}$ (对应的微波功率密度为4.3 fW/cm^2)时, 产生的耦合拉比频率约为1 MHz. 基于原子的场强测量是通过测量待测场驱动下原子能级跃迁的拉比频率从而得到其场强值. 跃迁拉比频率可以通过原子布居数的拉比振荡进行直接测量^[44-46]. 不过, 拉比振荡测量方法通常适合待测场耦合了基态能级跃迁的情况, 而不适用于里德堡能

级这类高激发态. 为此, 这里利用原子的相干效应对里德堡能级跃迁的拉比频率进行间接测量: 微波场耦合相邻的里德堡能级产生原子缀饰态的分离, 利用电磁诱导透明效应(EIT)的全光学探测得到微波的AT分裂^[47], 从而实现微波场的精密测量.

2012年, Sedlacek等人^[28]通过微波共振耦合临近的两个里德堡能级, 利用里德堡原子的EIT效应探测微波的AT分裂实现了微波电场的精密测量. 其探测的最小场强约为 $8 \mu\text{V}/\text{cm}$, 测量灵敏度达到 $30 \mu\text{V cm}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$. 相关的能级结构和实验装置如图1所示, 探测光和耦合光反向传播经过铷泡, 当没有微波作用时, 可以观测到标准级联型三能级的EIT光谱(如图2(a)上透射谱); 而当施加共振微波场时, EIT透射峰因AT分裂效应而发生分裂(如图2(a)下透射谱). 在一定条件下, 里德堡能级的AT分裂 $2\pi\Delta f_0$ 等于原子微波跃迁的拉比频率 Ω_{MW} ,

即

$$\Omega_{\text{MW}} = 2\pi\Delta f_0. \quad (1)$$

考虑扫描探测光失谐时引入的多普勒修正因子, 微波电场强度 $|E|$ 表述为

$$|E| = \frac{\hbar}{\mu} \Omega_{\text{MW}} = 2\pi \frac{\hbar}{\mu} \frac{\lambda_p}{\lambda_c} \Delta f_m, \quad (2)$$

其中, $\hbar$ 是普朗克常数; μ 为原子的微波跃迁矩阵元, 其不确定度小于0.1%; λ_p 和 λ_c 分别是探测光和耦合光的中心波长. 这项技术通过光学谱线的拟合获得EIT透射峰的分裂间距 Δf_m , 从而实现微波电场的自校准测量. 如公式(1)所示, 里德堡原子微波电场计将微波场强溯源到普朗克常数, 而且微波的电场测量转换为频率的测量. 众所周知, 在所有物理量当中, 频率具有最高的测量准确度^[14]. 因此, 基于

图1 (网络版彩图)里德堡原子电场计. (a) 利用里德堡原子相干效应测量微波电场的四能级示意图; (b) 实验装置图

Figure 1 (Color online) Electrometry based on Rydberg atoms. (a) The four energy level configuration for microwave (MW) electric-field measurement based on the atomic coherence effect in Rydberg gases; (b) experimental setup.

图2 (网络版彩图)微波电场强度的溯源原理. (a) 共振四能级EIT系统的衰退缀饰态; (b) 大失谐四能级EIA系统的有效裸态和有效衰退缀饰态

Figure 2 (Color online) Traceability principle of MW electric-field strength. (a) Decaying-dressed states of the resonant EIT system with four-level atoms; (b) effective bare states and decaying-dressed states of the largely-detuned EIA system with four-level atoms.

里德堡原子的微波电场测量,不但具有自校准的优势,而且经过简短的量值传递,微波电场强度还能有效地溯源到SI. 综上所述,这项技术具备建立微波电场量子计量基准的优良潜力. 除了电场强度的测量,将原子气室内嵌在微波波导中,此方法同样适用于微波功率的自校准和溯源^[48].

在微波电场的精密测量方面, Shaffer团队在上述工作之后报道了一系列研究: 2013 年首次演示了矢量电场计, 微波的极化方向分辨率为 0.5° ^[49]; 2014年将原子传感技术用于微波的亚波长成像, 测量6.9 GHz微波场的空间分辨率达到 $66\ \mu\text{m}$ ($\sim \lambda/650$)^[50]; 2015 年研究了介电质气室的结构对微波场测量精度的影响^[51]; 随后分别采用基于光学干涉仪的平衡零拍探测和频率调制技术, 进一步将微波探测的灵敏度提高到了 $2\ \mu\text{V cm}^{-1}\ \text{Hz}^{-1/2}$ ^[52,53]. 另外, 密歇根大学的Raithel团队^[31,54]通过探测微波双光子跃迁下的里德堡EIT-Floquet光谱, 实现了电场强度高于 $100\ \text{V/m}$ 的微波精密测量.

2.2 衰变缀饰态

在一个外场驱动的二能级系统中, AT分裂与EIT是两个十分相似而又不同的量子光学现象^[55]: 探测光谱线均表现为两个吸收峰和一个透明窗口; 这两种现象在物理起源上则完全不同, EIT是量子相消干涉(一般而言是Fano干涉)的结果, 而AT分裂源于强驱动场诱导的双线结构, 是量子相长干涉的结果. 自从Anisimov等人^[56,57]提出衰变缀饰态分析方法后, 一些研究工作给出了在三能级系统中区分EIT和AT分裂的定量判据.

在本质上, 基于里德堡原子相干效应的微波电场计是待测微波场诱导原子缀饰态分离的一种全光学探测. 为了评估这类全光探测的系统误差, 需要分析四能级系统的衰变缀饰态. 2018 年, Rawat等人^[58]利用共振极子理论对微波场和耦合光场共同驱动下的四能级系统进行了量子干涉分析. 由稳态光学布洛赫方程可解出四能级系统中探测光诱导的线性极化率为

$$\chi(\delta) = \frac{OD\Gamma}{k_p L} \frac{d_3 d_4 - \Omega_{\text{MW}}^2/4}{d_2 d_3 d_4 - d_2^2 \Omega_{\text{MW}}^2/4 - d_4 \Omega_c^2/4}, \quad (3)$$

其中 $d_i = \delta - \Delta_i - i\gamma_i$ 是各能级的复失谐. 从极化率表达式可以看出, 光谱中具有三个决定原子响应的共振极点 δ_i . 如图2(a)所示, 在共振EIT测量方案中, 这三个共振极点分别对应于三个衰变缀饰态, 相应衰变缀饰态的能移和退相率分别由 δ_i 的实部和虚部决定. 于是, 极化率可以写成三个共振响应的叠加

$$\chi(\delta) = \frac{OD\Gamma}{k_p L} \sum_{i=1}^3 \frac{S_i}{\delta - \delta_i}. \quad (4)$$

通过解析以上共振响应函数 S_i , 共振四能级系统的探测光谱在不同的参数条件下存在三种不同的量子干涉现象: 双EIT($\Omega_{\text{MW}} \ll \Gamma$)、临界点($\Omega_{\text{MW}} \sim \Gamma$)和双AT分裂($\Omega_{\text{MW}} \gg \Gamma$). 从共振极子理论可以看出, 共振四能级系统的AT分裂不仅依赖于微波场强, 还与耦合光功率、能级退相率等系统参数有关. 因此, 严格上说, 等式(1)在共振四能级EIT测量方案中是失效的. 即在共振EIT 测量方案中, 等式(1)的破缺将不可避免地引入测量不确定度.

为了消除上述系统误差, Liao等人^[42,59]随后提出基于电磁诱导吸收(EIA)效应的微波测量新方案. 如图2(b)所示, 在耦合光大失谐的条件下, 四能级系统的中间激发态被绝热消除, 得到等效三能级系统的哈密顿量

$$H_{\text{eff}} = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & \Omega_{\text{eff}} & 0 \\ \Omega_{\text{eff}} & -2(\delta + \Delta_{\text{AC}}) & \Omega_{\text{MW}} \\ 0 & \Omega_{\text{MW}} & -2\delta \end{pmatrix}, \quad (5)$$

其中 Ω_{eff} 是双光子有效拉比频率, 而 Δ_{AC} 则是耦合场诱导的AC Stark频移. 这时探测光谱中具有两个决定原子响应的共振极点

$$\delta_{\pm} = \frac{1}{2} \left[-\Delta_{\text{AC}} + i(\gamma_3 + \gamma_4) \pm \sqrt{\Omega_{\text{MW}}^2 + (\Delta_{\text{AC}} - i\gamma_3 + i\gamma_4)^2} \right]. \quad (6)$$

因为两个里德堡能级的退相率很小且数值接近, 所以大失谐四能级EIA系统的线性极化率可简化为

$$\chi(\delta) \propto OD \left[\frac{1}{(\delta + \Omega_{\text{MW}}/2) - i(\gamma_3 + \gamma_4)/2} + \frac{1}{(\delta - \Omega_{\text{MW}}/2) - i(\gamma_3 + \gamma_4)/2} \right]. \quad (7)$$

从上式看出, 探测场谱线表现为很好的双洛伦兹线型, 正如图2(b)中插图的下半部分所示. 而且EIA吸收峰的AT分裂严格等于微波跃迁的拉比频率, 与其他系统参数无关, 此现象即EIA-AT分裂效应.

2.3 利用冷里德堡原子EIA效应测量微波电场

受限于多普勒效应所导致的谱线增宽, 从热原子的探测场光谱通常无法还原微波跃迁的拉比频率, 所以我们难以检验微波拉比频率与双峰拟合AT分裂的全等性(即方程(1)). 另外, 室温原子气室的里德堡EIT透明窗口半高宽一般在MHz量级, 对应于热原子微波电场计可直接溯源至SI的最小电场约为 5 mV cm^{-1} . Wang等人^[40]利用大光学厚度的冷原子系综研究了微波电场的精密测量, 具有全解析形式的冷原子谱线有助于验证微波拉比频率与AT分裂之间的关系, 同时, 冷原子的亚自然线宽和更小的退相率能有效地提升测量的动态范围. 而且他们实验证明, 对于冷原子微波探头而言, EIA-AT分裂是一种显著优于共振EIT的微波电场测量和校准的方案.

采用四能级系统极化率对冷原子谱线进行最小二乘法拟合, 得到所施加微波场的跃迁拉比频率; 同时采用双洛伦兹线型对谱线进行双峰拟合得到AT分裂. 为了定量反映场强溯源的准确度, 定义微波测量的内在偏差为

$$\Delta = 100 \times (2\pi\Delta f - \Omega_{\text{MW}}) / \Omega_{\text{MW}}. \quad (8)$$

图3为共振微波场作用下冷里德堡原子在双EIT、临界点、双AT分裂和EIA-AT分裂参数区间的AT分裂测量结果. 从图3(c)和(d)看出, 在双EIT, 临界点和双AT分裂条件下的测量内在偏差普遍大于5%; 而绝热消除中间激发态后, EIA-AT分裂的内在偏差则降低至1%以下. 除了具备更高的测量准确度, EIA-AT分裂测量方案还对原子团光学厚度、耦合光功率和耦合场失谐等系统参数的改变表现出很好的鲁棒性. 另外, 基于窄线宽的优势, EIA信号可以实现 $\sim 100 \text{ } \mu\text{V cm}^{-1}$ 量级电场的直接SI溯源, 这相比室温原子气室探头提升了50倍.

2.4 微波电场测量的量子基准

目前, 标准射频电场校准的相对不确定度无法

图3 (网络版彩图)冷里德堡原子在双EIT、临界点、双AT分裂和EIA-AT分裂参数区间的微波场强测量结果. (a) AT分裂vs.微波场强; (b) AT分裂vs.微波拉比频率; (c) 微波电场的溯源偏差及(d) 局部放大图. 图片来自文献[39], 已获得授权

Figure 3 (Color online) MW E-field strength measurement using cold Rydberg atoms for the four different regimes: double EIT, crossover, double ATS and EIA-AT splitting. (a) AT splitting Δf as a function of MW power; (b) AT splitting Δf vs. MW Rabi frequency Ω_{MW} ; (c) deviation Δ and (d) a close-up of the shadow region vs. the MW electric-field amplitude. Reproduced from ref. [39] with permission from American Physical Society.

小于4%^[4]. 在采用标准场或标准天线方法的校准过程, 需要将待校准的探头放在一个“已知”场强的电场里, 而要知道这个“已知”电场的场强又需要用到一个被校准过的探头, 于是导致标准天线和标准场之间陷入“到底先有鸡还是先有鸡蛋”的悖论. 除此之外, 传统的射频电场溯源至SI的量值传递系统非常庞大繁杂, 需要消耗大量的资源. 里德堡原子电场计基于原子能级与射频场的相互作用, 直接将射频场强溯源至基本物理常数和SI基本单位, 为射频电场的校准和溯源提供了全新的解决方案. 基于里德堡原子的电场测量不确定度明显优于传统的方法, 非常适合用于建立电场计量的量子基准. 在微波电场的量子基准方面, NIST的Holloway小组^[60,61]和NIM的宋振飞小组^[62,63]分别全面评估过里德堡原子电场计的不确定度.

根据不确定来源的不同, 里德堡原子微波测量系统的不确定度可分为两大类: 系统不确定度和测量不确定度^[60]. 因为在里德堡原子电场计中, 唯有AT分裂测量可以直接有效地溯源到SI, 所以这里仅讨论AT分裂测量的不确定度. AT分裂的系统不确定度的来源包括电偶极矩自身的不确定度、杂散电磁场导致偶极矩的改变以及等式(1)破缺引入的不确定度^[28,42,61]; 而其测量不确定度的来源则主要包括激光功率、线宽和探测器白噪声等技术噪声、谱线拟合误差、扫频定标误差以及原子气室对待测场的

的扰动^[60]. 如2.3节所述, 等式(1)破缺导致的不确定度可利用冷原子EIA测量方案压制在1%以内^[42]; 通过有效抵消杂散电磁场, 与偶极矩相关的系统不确定度可以小于1%. 在测量不确定方面, 它的最大来源是装载原子的介电气室^[64–68], 其他测量不确定度均容易控制在0.5%以内^[60].

作为碱金属原子载体的原子气室直接影响到测量准确度、空间分辨率和溯源有效性. 2015年, Fan等人^[29]基于介电质谐振腔理论和电磁仿真方法, 首次研究了立方体原子气室对空间场的扰动特性. 图4是他们通过AT分裂方法测量的不同波长微波场在原子气室内部的分布情况, 只要缩小气室尺寸即可有效地消除气室结构对待测射频场的扰动. 当气室尺寸与待测场波长的比值 D/λ_{rf} 小于0.1时, 在10–30 GHz频段上获得了优于传统方法的测量准确度^[51]. 随后, Zhang等人^[69]报道了当气室尺寸小于波长的1/10时立方体泡的Fabry-Perot效应会比圆柱体泡的更明显, 而且较薄的原子气室壁在精确计量方面表现更优.

2.5 基于原子超外差的微波相干探测

通过上述全光学的读取方式, 典型的四能级里德堡原子探头只能检测微波场的幅度和极化两个维度, 而无法检测微波的相位和频率信息, 这一缺

图4 (网络版彩图)铯泡内部不同微波波长下的电场分布. (a) 内径8 mm的铯泡; (b) 内径9 mm的铯泡. 图片来自文献[48], 已获得授权

Figure 4 (Color online) Electric field distribution of cesium vapor cells under different MW wavelengths. (a) The 8-mm-inner-diameter vapor cell; (b) the 9-mm-inner-diameter vapor cell. Reproduced from ref. [48] with permission from American Physical Society.

陷极大地限制了它在弱场检测, 特别是在雷达探测方面的应用^[70,71]. 除此之外, 上述方法的电场测量灵敏度受限于探测光的散粒噪声, 最高灵敏度仅为 $\sim 2 \mu\text{V cm}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$. 2019年, Jing等人^[37]结合经典的超外差方法, 通过微波场缀饰下的里德堡原子探头实现了微波的相位和频率测量, 将电场灵敏度提高了约38倍.

Jing等人的原子超外差工作原理和实验方案如图5所示. 在一个典型的四能级里德堡EIT系统中, 他们利用里德堡原子作为射频信号的混频器, 一束共振的微波作为本振场耦合临近的里德堡能级, 产生AT分裂. 另一束小失谐(百kHz量级)的信号微波也作用于里德堡原子, 这两束射频场会发生外差干涉, 而拍频信号携带在透射的探测光场中. 拍频信号的相位直接对应于本振微波和信号微波之间的相对相位, 而探测光的透射率随时间的变化表示为

$$P(t) = \bar{P}_0 + \kappa \Omega_s \cos(2\pi\delta_s t + \phi_s). \quad (9)$$

从上式看出, 探测光在时间上随差频频率 δ_s 变化, 相位由 ϕ_s 决定, 所以通过原子超外差可以得到微波的相位和频率信息. 相比普通原子电场计, 里德堡原子超外差在弱场信号检测方面具有显著优势: 原子超外差本质上属于斜率探测, 它通过压制经典噪声来提升灵敏度; 原子超外差的频率分辨率与里德堡原子的相干时间无关, 仅受限于微波本振源的频率稳

定性.

如图6所示, 他们使用铯泡对6.94 GHz的信号微波场进行量子超外差测量. 在 $\Omega_s \ll \Gamma_{\text{EIT}}$ 的弱场区域内, 原子超外差不同于基于非线性探测的普通原子电场计, 其检测灵敏度正比于经典噪声所决定的最小误差, 他们实验测得的灵敏度达到 $55 \text{ nV cm}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$; 通过有效地延长测量时间, 可探测的最小电场值约为 780 pV cm^{-1} ; 还演示了针对移动目标的多普勒频移测量, 频率分辨率达到 μHz 的量级.

在理想状况下, 受量子投影噪声极限的限制, 原子超外差检测电场的最高灵敏度理论上为

$$E_{\text{QPNL}} = \frac{\hbar}{\mu\tau_c \sqrt{2N}} \approx 700 \text{ pV cm}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}, \quad (10)$$

其中 τ_c 为里德堡EIT的相干时间, N 为参与EIT过程的原子数. 而在现实状况下, 原子超外差的检测灵敏度主要受限于电子器件热噪声, 原子渡跃展宽及激光线宽等因素导致的技术噪声. 通过放大探测光和耦合光束腰, 减小原子渡跃展宽, 或者用零差或外差探测代替平衡探测, 减小光电探测器噪声等方法, 原则上会压制相关的技术噪声. 这样即使不需要原子或光场的非经典态等资源, 原子超外差的灵敏度也可以逼近原子传感器的量子投影噪声极限. 基于上述特点, 原子超外差探测技术在射电天文学、雷达探测和计量等领域具有良好的应用前景. 值得一提的是, 倘若将原子天线阵列和原子超外差结合起来, 则有希望制造相控阵式的原子天线, 从而实现包括幅度、偏振、相位和角向的全维度微波场的测量.

3 基于里德堡原子天线的微波通信

近年来, 一些研究报道了将上述里德堡原子探头作为无线信号的接收天线, 结合经典的调制解调技术, 所发展的原子天线技术在无线通信和光纤无线融合方面具有广泛的应用场景. 在模拟通信方面, 2018年国际研究组利用里德堡原子EIT演示了射频信号的光载无线通信(RoF)^[72]; 随后利用原子天线接收和还原了经过幅度调制或频率调制加载的音频信号, 基带信号的带宽约为100 kHz, 证实了载波频率可覆盖从C波段到Q波段的电磁波频谱^[73];

图5 原子超外差原理. (a) 能级图; (b) 本振场缀饰下的里德堡原子微波传感器; (c) 工作原理图. 图片来自文献^[37]

Figure 5 Atomic superheterodyne receiver. (a) Level scheme; (b) MW sensing with MW-dressed Rydberg EIT spectroscopy; (c) operating principles. Reproduced from ref. ^[37].

图6 原子超外差探测的灵敏度和不确定度。(a) 电场测量; (b) 不同积分时长下的测量结果; (c) 微波信号的傅里叶频谱. 图片来自文献[37]

Figure 6 Sensitivity and uncertainties of atomic superhet. (a) Electric field measurement; (b) MW signal measured at different measurement times; (c) Fourier spectrum of MW signal. Reproduced from ref. [37].

2019年国内研究组利用幅度调制AT分裂提升了通信的可靠性, 信号保真度大于95%, 且信号响应达到30 dB的动态范围^[74]. 在数字通信方面, 2018年美国陆军研究实验室将调幅波施加于原子天线, 利用原子接收端的正交解调实现了移相键控通信方案, 此项工作有望用于配备高带宽超高灵敏度的量子接收器, 在战场背景噪声干扰下进行高速的频分复用通信, 从而顺利入选了2018年美国陆军的十大科技进展^[36]. 随后国内研究组^[38]演示了载波频率与跃迁频率失谐情况下的数字通信, 证实原子天线的载波频率可以连续调谐200 MHz. 原子天线的通信技术发展迅速, 下面对代表工作进行具体介绍.

3.1 光载无线通信

RoF技术直接利用光载波来传输射频信号, 同时具备高带宽、低损耗和抵抗电磁干扰的优势, 是针对高速大容量无线通信的需求将光纤通信和无线通信有机结合起来的无线接入技术. 如图7(b)所示, 传统的RoF通过激光源的强度调制或者电光晶体的幅度相位调制来实现, 这一过程需要复杂的电气连

接、放大和滤波环节. 由于传统晶体的克尔非线性很小, 通常需要较高的光泵功率, 所以利用传统电气技术将微波信号有效转换为光信号是一项巨大的挑战.

基于原子天线的RoF结构如图7(c)所示, Deb等人^[72]通过原子天线将自由空间射频信号直接编码到光载波上, 光纤传输后经过光电探测得到基带信号, 此过程消除了接收端对任何电气连接的需要, 使得RoF结构更加简单且通用. 然后, 他们对幅度调制后的光载波信号进行频谱分析, 信噪比大于10的频谱信号定义为高保真RoF的截止点. 如图8所示, 在-1 dB m的载波功率下, 射频信号光传输的带宽正比于耦合光的功率. 目前RoF系统的最大带宽约为1.1 MHz, 这主要受限于探测装置的本底噪声和激光线宽. 如果采用更高的耦合光功率、频率调制光谱以及散粒噪声极限的探测装置等方式, 则有望实现百MHz量级的带宽以及更高的信噪比.

基于原子天线的RoF技术在一些特殊应用场景具有不可替代的价值. 比如, 完全的电气隔离能消除同轴电缆中电接触不良或辐射冲击所造成的信号

图 7 (网络版彩图)射频信号光纤传输技术. (a) 传统天线发送信号; (b) 传统RoF构架; (c) 原子型RoF构架. 图片来自文献[70], 已获得授权

Figure 7 (Color online) Techniques of radio-over-fiber (RoF) for signal transmission. (a) Signal coupled to free-space via a transmitter antenna; (b) conventional RoF architecture; (c) atom-based RoF architecture. Reproduced from ref. [70] with permission from AIP Publishing.

破坏, 从而避免诸如雷电和太阳风暴造成的致命损害; 由于全光学材质的原子天线具有天然的电气隔离特性, 因此, 原子探头型RoF在地球物理领域具有广泛的应用; 仅由小型化原子气室和光纤组件够成的RoF装置比传统的RoF设计更加轻便, 原子天线在航空电子设备等应用场景具有明显优势; 除此之外, RoF结构中的非金属特性也有利于医疗环境中的电生理信号检测. 最近的实验研究表明, 里德堡原子的六波混频过程能有效地进行微波与光波之间的相干转换, 它既可工作在单光子的量子水平, 也保持了光子的相位信息 [27]. 这类微波光波的相干转换技术十分适合将超导芯片中的微波光子转换为光频光子, 在形成超导计算机的量子节点从而构建可拓展的量子网络方面具有重要价值.

3.2 数字通信

除在光纤无线融合方面的优良性能之外, 里德堡原子传感技术在无线数字通信方面也有关键应用. 基于里德堡原子的接收天线能同时覆盖从 0.1 GHz–1 THz 的载波频段, 超宽的频段资源有望实现高速的频分复用通信, 高度抵抗电磁背景干扰从而保障通信安全. 而且原子天线的信号接收灵敏度不必受限于传统天线的热噪声, 在理论上可逼近原子的量子投影噪声极限. 尤其在某些防御系统和太空通信等场景下, 原子天线全光学的结构保护它免遭电子元器件的损坏, 从而有效地抵御电磁脉冲武器的攻击. 无论从原理还是技术上讲, 基于全光学检测方式的原子天线是安全数字通信的理想选择.

2018年, Meyer等人 [36]利用幅度调制演示了基于原子天线的微波通信, 图9是原子天线的能级系统

图 8 (网络版彩图)光载射频信号传输结果. 图片来自文献[70], 已获得授权

Figure 8 (Color online) RoF signal transmission results. Reproduced from ref. [70] with permission from AIP Publishing.

图 9 (网络版彩图)基于原子天线的数字通信. (a) 装置图; (b) 能级图; (c) 光强探测; (d) 光外差探测. 图片来自文献[36], 已获得授权

Figure 9 (Color online) Digital communication using Rydberg atoms. (a) Experimental setup; (b) level diagram; (c) probe intensity detection; (d) heterodyne detection. Reproduced from ref. [36] with permission from AIP Publishing.

及其数字通信示意图. 在发送端, 数字基带信号经过幅度调制加载在与里德堡跃迁共振的微波上. 原子气室作为载波信号的接收端, 典型的里德堡四能级系统利用EIT效应将接收到的频带信号转移至探测光场. 在与一束失谐的本振场做外差探测后, 中频信号经过锁相放大器进行正交解调, 最终还原出调制相位 φ_μ . 解调信号 V_I 与探测场失谐的五个不同示例如图10(b)所示. 然后, 他们通过快速改变调制相位 φ_μ 演示了基于原子天线的八相移相键控(PSK)方案, 图10(c)和(d)分别是信号传输后的调制相位信号及其相应的相轨迹图.

根据Shannon-Hartley定理, 任何天线可达到的通信速率取决于它单个信道的最大信道容量

$$C = f_{\text{sym}} \log_2 \left(1 + \frac{S^2}{N^2 f_{\text{sym}}} \right), \quad (11)$$

其中 f_{sym} 为调制频率, S 为电压信号, 而 N 为电压噪声本底. 当信噪比为1时得到信道容量的优化值; 然后随着调制频率的增加, 信道容量将饱和. 当调制频率超过由原子和测量方法所决定的特征频率后, 原子天线的信道容量呈现下降趋势. 利用17 GHz的载波信号, 他们以40 kHz的调制频率获得了8.2 Mbit s⁻¹的信道容量. 此时的信道容量主要受限于耦合光功率、原子自然线宽和光场散粒噪声等因素. 值得注意的是, 原子天线信道容量的量子极限与载波频率无关, 它不会受到传统天线工作带宽Chu极限的制约. 为此, 美国陆军实验室组在长波段通信方面展

示了这一显著的量子优势^[75]: 以10 MHz的载波频率为例, 原子天线的带宽品质因子比同尺寸传统天线的Chu极限高4个数量级, 达到了60个有效原子所对应的标准量子极限水平.

4 总结与展望

作为微波电场校准和检测的新手段, 以及量子精密测量的新应用, 基于里德堡原子的微波传感和通信技术正呈现加速发展的趋势. 原子微波天线技术突破了传统微波天线所受到的诸多限制, 这项技术将微波电场直接溯源至SI和基本物理常数, 为微波量子计量基准的实现提供了可能. 同时, 其全光学的读取方式、完美的电气隔离以及量子优势下的通信速率等特性, 使得原子天线在航天、地球物理、医疗、军事通信和其他交叉领域具有广阔的应用前景. 冷原子和气室原子在微波天线的技术前景上具有各自的差别优势. 相比之下, 由于优越的测量准确度, 冷原子探头更适合做微波场强或功率的计量基准; 而气室探头具有更轻巧的结构, 从而适用于无线电的信号检测、雷达和通信等应用场景.

原子天线芯片化的关键在于原子气室的微型化. 通过取代传统吹玻璃法的气室制作工艺, 微机械系统新技术的引入将原子气室的尺寸从厘米量级缩小到了毫米量级, 使得气室的微型化成为可能. 当

图10 (网络版彩图)原子天线接收无线数字信号及正交解调. (a) 探测光频谱; (b) 示例解调的传输信号; (c) PSK发送和接收相位; (d) 相位星座图. 图片来自文献[36], 已获得授权

Figure 10 (Color online) Atomic antenna receiving wireless signal and IQ demodulation. (a) Probe transmissions; (b) example demodulated transmission signals; (c) PSK sent and received phases; (d) phase constellation. Reproduced from ref. [36] with permission from AIP Publishing.

前人们对原子微波天线的掌控水平距离商用化仍有相当的距离, 但高效率的激光单通倍频为里德堡相干激发的光源提供了进一步集成化的可能, 结合小

型化的原子气室, 原子天线技术在计量方面已经开始迈入实用化阶段, 相关研究的应用开发是值得关注且大力推行的方向.

致谢 感谢华中科技大学李霖教授、中国计量科学研究院宋振飞副研究员、山西大学张临杰教授的帮助和讨论.

参考文献

- Bernhard J, Reed J, Park J M, et al. 2010 final report of the national science foundation workshop on enhancing access to the radio spectrum. In: Proceedings of the National Science Foundation Workshop. Arlington, 2010
- Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology. *Nat Photon*, 2007, 1: 97–105
- Tishchenko V A. The beginning of the metrology of radio-frequency electromagnetic fields and the first standards of electric field strength. *Measure Tech*, 2003, 46: 76–84
- Kanda M. Standard probes for electromagnetic field measurements. *IEEE Trans Antennas Propag*, 1993, 41: 13
- Kanda M. Standard antennas for electromagnetic interference measurements and methods to calibrate them. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 1994, 36: 261–273
- Tishchenko V A, Tokatly V I, Luk'yanov V I. Upgrading radio-frequency electromagnetic field standards: I. *Measure Tech*, 2003, 46: 796–801
- Naghski D H, Boyd J T, Jackson H E, et al. An integrated photonic Mach-Zehnder interferometer with no electrodes for sensing electric fields. *J Lightw Tech*, 1994, 12: 1092–1098
- Sriram S S, Kingsley S A, Boyd J T. Electro-optical sensor for detecting electric fields. US Patent, 1992, 5267336
- Stock M. The revision of the SI—Towards an international system of units based on defining constants. *Measure Tech*, 2018, 60: 1169–1177
- Hall J L. Nobel lecture: Defining and measuring optical frequencies. *Rev Mod Phys*, 2006, 78: 1279–1295
- Cronin A D, Schmiedmayer J, Pritchard D E. Optics and interferometry with atoms and molecules. *Rev Mod Phys*, 2009, 81: 1051–1129
- Degen C L, Reinhard F, Cappellaro P. Quantum sensing. *Rev Mod Phys*, 2017, 89: 035002
- Budker D, Romalis M. Optical magnetometry. *Nat Phys*, 2007, 3: 227–234
- Ludlow A D, Boyd M M, Ye J, et al. Optical atomic clocks. *Rev Mod Phys*, 2015, 87: 637–701
- Rosi G, Sorrentino F, Cacciapuoti L, et al. Precision measurement of the Newtonian gravitational constant using cold atoms. *Nature*, 2014, 510: 518–521
- Savukov I M, Veltzer S J, Romalis M V, et al. Tunable atomic magnetometer for detection of radio-frequency magnetic fields, *Phys Rev Lett*, 2005, 95: 063004
- Koschorreck M, Napolitano M, Dubost B, et al. Sub-projection-noise sensitivity in broadband atomic magnetometry. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 093602
- Gallagher T F. *Rydberg Atoms*. New York: Cambridge University Press, 1994
- Abel R P, Carr C, Krohn U, et al. Electrometry near a dielectric surface using Rydberg electromagnetically induced transparency. *Phys Rev A*, 2011, 84: 023408
- Tauschinsky A, Thijssen R M T, Whitlock S, et al. Spatially resolved excitation of Rydberg atoms and surface effects on an atom chip. *Phys Rev A*, 2010, 81: 063411
- Hattermann H, Mack M, Karlewski F, et al. Detrimental adsorbate fields in experiments with cold Rydberg gases near surfaces. *Phys Rev A*, 2012, 86: 022511
- Kübler H, Shaffer J P, Baluktian T, et al. Coherent excitation of Rydberg atoms in micrometre-sized atomic vapour cells. *Nat Photon*, 2010, 4: 112–116
- Figger H, Leuchs G, Straubinger R, et al. A photon detector for submillimetre wavelengths using Rydberg atoms. *Opt Commun*, 1980, 33: 37–41
- Goy P, Moi L, Gross M, et al. Rydberg atom masers: II. Triggering by external radiation and applications to millimeter-wave detectors. *Phys Rev A*, 1983, 27: 2065
- Wade C G, Šibalić N, de Melo N R, et al. Real-time near-field terahertz imaging with atomic optical fluorescence. *Nat Photon*, 2017, 11: 40–43
- Mohapatra A K, Jackson T R, Adams C S. Coherent optical detection of highly excited rydberg states using electromagnetically induced transparency. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 113003

- 27 Han J, Vogt T, Gross C, et al. Coherent microwave-to-optical conversion via six-wave mixing in Rydberg atoms. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 093201
- 28 Sedlacek J A, Schwettmann A, Kübler H, et al. Microwave electrometry with Rydberg atoms in a vapour cell using bright atomic resonances. *Nat Phys*, 2012, 8: 819–824
- 29 Fan H, Kumar S, Sedlacek J, et al. Atom based RF electric field sensing. *J Phys B*, 2015, 48: 202001
- 30 Mohapatra A K, Bason M G, Butscher B, et al. Giant electro-optic effect using polarizable dark states. *Nat Phys*, 2008, 4: 890–894
- 31 Anderson D A, Miller S A, Raithel G, et al. Optical measurements of strong microwave fields with Rydberg atoms in a vapor cell. *Phys Rev Appl*, 2016, 5: 034003
- 32 Holloway C L, Gordon J A, Jefferts S, et al. Broadband Rydberg atom-based electric-field probe for SI-traceable, self-calibrated measurements. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2014, 62: 6169–6182
- 33 Gordon J A, Holloway C L, Schwarzkopf A, et al. Millimeter wave detection via Autler-Townes splitting in rubidium Rydberg atoms. *Appl Phys Lett*, 2014, 105: 024104
- 34 Jiao Y, Hao L, Han X, et al. Atom-based radio-frequency field calibration and polarization measurement using cesium nD_J floquet states. *Phys Rev Appl*, 2017, 8: 014028
- 35 Facon A, Dietsche E K, Grosso D, et al. A sensitive electrometer based on a Rydberg atom in a Schrödinger-cat state. *Nature*, 2016, 535: 262–265
- 36 Meyer D H, Cox K C, Fatemi F K, et al. Digital communication with Rydberg atoms and amplitude-modulated microwave fields. *Appl Phys Lett*, 2018, 112: 211108
- 37 Jing M, Hu Y, Ma J, et al. Atomic superheterodyne receiver based on microwave-dressed Rydberg spectroscopy. *Nat Phys*, 2020, 16: 911–915
- 38 Song Z, Liu H, Liu X, et al. Rydberg-atom-based digital communication using a continuously tunable radio-frequency carrier. *Opt Express*, 2019, 27: 8848
- 39 Yan H, Liao K Y, Li J F, et al. Bichromatic electromagnetically induced transparency in hot atomic vapors. *Phys Rev A*, 2013, 87: 055401
- 40 Wang Y, Li J, Zhang S, et al. Efficient quantum memory for single-photon polarization qubits. *Nat Photon*, 2019, 13: 346–351
- 41 Liu X H, Liang J, Chen C J, et al. Microwave electric field measurement based on electromagnetically-induced transparency and absorption in atomic vapor cell at room temperature. *J South China Normal Univ*, 2020, 52: 10–16
- 42 Liao K Y, Tu H T, Yang S Z, et al. Microwave electrometry via electromagnetically induced absorption in cold Rydberg atoms. *Phys Rev A*, 2020, 101: 053432
- 43 Huang W, Liang Z T, Du Y X, et al. Rydberg-atom-based electrometry (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2015, 64: 160702 [黄巍, 梁振涛, 杜炎雄, 等. 基于里德堡原子的电场测量. *物理学报*, 2015, 64: 160702]
- 44 Camparo J C. Atomic stabilization of electromagnetic field strength using Rabi resonances. *Phys Rev Lett*, 1998, 80: 222–225
- 45 Osterwalder A, Merkt F. Using high Rydberg states as electric field sensors. *Phys Rev Lett*, 1999, 82: 1831–1834
- 46 Carter J D, Cherry O, Martin J D D. Electric-field sensing near the surface microstructure of an atom chip using cold Rydberg atoms. *Phys Rev A*, 2012, 86: 053401
- 47 Fleischhauer M, Imamoglu A, Marangos J P. Electromagnetically induced transparency: Optics in coherent media. *Rev Mod Phys*, 2005, 77: 633–673
- 48 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. *Appl Phys Lett*, 2018, 113: 094101
- 49 Sedlacek J A, Schwettmann A, Kübler H, et al. Atom-based vector microwave electrometry using rubidium Rydberg atoms in a vapor cell. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 063001
- 50 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. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 244102
- 51 Fan H, Kumar S, Sheng J, et al. Effect of vapor-cell geometry on Rydberg-atom-based measurements of radio-frequency electric fields. *Phys Rev Appl*, 2015, 4: 044015
- 52 Kumar S, Fan H, Kübler H, et al. Atom-based sensing of weak radio frequency electric fields using homodyne readout. *Sci Rep*, 2017, 7: 42981
- 53 Kumar S, Fan H, Kübler H, et al. Rydberg-atom based radio-frequency electrometry using frequency modulation spectroscopy in room temperature vapor cells. *Opt Express*, 2017, 25: 8625
- 54 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. *Phys Rev A*, 2014, 90: 043419
- 55 Abi-Salloum T Y. Electromagnetically induced transparency and Autler-Townes splitting: Two similar but distinct phenomena in two categories of three-level atomic systems. *Phys Rev A*, 2010, 81: 053836
- 56 Anisimov P M, Dowling J P, Sanders B C. Objectively discerning Autler-Townes splitting from electromagnetically induced transparency. *Phys*

- [Rev Lett](#), 2011, 107: 163604
- 57 Hao L, Jiao Y, Xue Y, et al. Transition from electromagnetically induced transparency to Autler-Townes splitting in cold cesium atoms. [New J Phys](#), 2018, 20: 073024
- 58 Rawat H S, Dubey S K, Ojha V N. Distinction between double electromagnetically induced transparency and double Autler-Townes splitting in RF-driven four-level ladder ^{87}Rb atomic vapor. [J Phys B-At Mol Opt Phys](#), 2018, 51: 155401
- 59 Akulshin A M, Barreiro S, Lezama A. Electromagnetically induced absorption and transparency due to resonant two-field excitation of quasidegenerate levels in Rb vapor. [Phys Rev A](#), 1998, 57: 2996–3002
- 60 Simons M T, Kautz M D, Gordon J A, et al. Uncertainties in Rydberg atom-based RF E-field measurements. In: Proceedings of the 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE). Amsterdam, 2018
- 61 Holloway C L, Simons M T, Gordon J A, et al. Electric field metrology for SI traceability: Systematic measurement uncertainties in electromagnetically induced transparency in atomic vapor. [J Appl Phys](#), 2017, 121: 233106
- 62 Song Z, Zhang W, Wu Q, et al. Field distortion and optimization of a vapor cell in Rydberg atom-based radio-frequency electric field measurement. [Sensors](#), 2018, 18: 3205
- 63 Zhang W, Song Z, Mu H, et al. Depolarization effect of a vapor cell in atom-based radio-frequency electric field measurement. [Jpn J Appl Phys](#), 2018, 57: 090310
- 64 Li W, Mourachko I, Noel M W, et al. Millimeter-wave spectroscopy of cold Rb Rydberg atoms in a magneto-optical trap: Quantum defects of the ns, np, and nd series. [Phys Rev A](#), 2003, 67: 052502
- 65 Mack M, Karlewski F, Hattermann H, et al. Measurement of absolute transition frequencies of Rb87 to $n\text{S}$ and $n\text{D}$ Rydberg states by means of electromagnetically induced transparency. [Phys Rev A](#), 2011, 83: 052515
- 66 Wheeler E L. Scientific Glassblowing. New York: Interscience Publishers, 1958
- 67 Daschner R, Ritter R, Kübler H, et al. Fabrication and characterization of an electrically contacted vapor cell. [Opt Lett](#), 2012, 37: 2271
- 68 Swan-Wood T, Coffey J G, Camparo J C. Precision measurements of absorption and refractive-index using an atomic candle. [IEEE Trans Instrum Meas](#), 2001, 50: 1229–1233
- 69 Zhang L, Liu J, Jia Y, et al. Vapor cell geometry effect on Rydberg atom-based microwave electric field measurement. [Chin Phys B](#), 2018, 27: 033201
- 70 Meyer D H, Castillo Z A, Cox K C, et al. Assessment of Rydberg atoms for wideband electric field sensing. [J Phys B-At Mol Opt Phys](#), 2020, 53: 034001
- 71 Simons M T, Haddab A H, Gordon J A, et al. A Rydberg atom-based mixer: Measuring the phase of a radio frequency wave. [Appl Phys Lett](#), 2019, 114: 114101
- 72 Deb A B, Kjærgaard N. Radio-over-fiber using an optical antenna based on Rydberg states of atoms. [Appl Phys Lett](#), 2018, 112: 211106
- 73 Anderson D A, Sapiro R E, Raithel G. An atomic receiver for AM and FM radio communication. [IEEE Trans Antennas Propag](#), 2020, doi: 10.1109/TAP.2020.2987112
- 74 Jiao Y, Han X, Fan J, et al. Atom-based receiver for amplitude-modulated baseband signals in high-frequency radio communication. [Appl Phys Express](#), 2019, 12: 126002
- 75 Cox K C, Meyer D H, Fatemi F K, et al. Quantum-limited atomic receiver in the electrically small regime. [Phys Rev Lett](#), 2018, 121: 110502

Rydberg atom based microwave sensing and communication

LIAO KaiYu, TU HaiTao, ZHANG XinDing, YAN Hui* & ZHU ShiLiang*

Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center for Quantum Precision Measurement, Key Laboratory of Quantum Engineering and Quantum Materials, School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China

With the overall redefinition of the international system of units (SI), the classical physical standards are gradually replaced by the natural standards based on quantum physics. Due to the reproducibility, accuracy and stability of atomic system, many new technologies of quantum precision measurement have been developed based on the atomic systems. Rydberg atoms are very sensitive to external electromagnetic fields because of their large MW transition dipole moment and polarizability. With the atomic coherence effect, the ultra wideband electric field can be measured with high precision and high sensitivity. Especially for the microwave range whose frequency is higher than 1 GHz, the research of establishing microwave quantum standard is advancing steadily. In addition, all optical materials and ultra wide band atomic antenna have a wide range of applications in aerospace, military communications and other fields. In this paper, we review the researches of microwave sensing and communication based on Rydberg atoms, and introduce the progress in the quantum standard of microwave electric field strength, coherent detection, radio-over-fiber, digital communication, etc., and discuss the possible applications and research frontiers in this rapid developing field.

microwave electric field metrology, atomic antenna, Rydberg atom, quantum precision measurement

PACS: 32.80.Rm, 03.50.De, 42.62.Fi

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0218](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0218)