

基于里德堡原子的无线电光学测量及其光谱处理技术 (特邀)

吴金云, 杨 剑*, 高伟超*, 张引发*

(国防科技大学 信息通信学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 里德堡原子是一种高激发态的原子, 具有较大电偶极矩, 相邻能级差可覆盖 DC~THz 的超宽频谱范围, 因而可以实现电磁场高灵敏、超宽带的传感接收。基于里德堡原子的无线电光学测量是通过碱金属原子在探测光和控制光等两束激光的精确调控下转变为里德堡原子, 并使探测光透射光谱产生电磁诱导透明效应, 进而在输入的无线电信号的作用下, 使其透明光谱发生 Autler-Townes (AT) 劈裂, 完成无线电信号到光学信号的转化, 从而实现无线电信号频率、幅度、相位等信息的提取, 具有直接解调、无需校准、抗电磁毁伤等特点。近年来, 该技术在电场计量、电磁频谱侦测、通信、雷达等电子信息领域引起人们的强烈关注。该技术的关键在于如何从原子系统输出光谱中快速准确地提取出无线电信号的信息。针对静态无线电信号、动态无线电信号、单频无线电信号、多频无线电信号等不同类型的无线电信号, 对应的信息提取和光谱处理方式也不同。依据不同类型的无线电信号, 对基于里德堡原子的无线电光学测量及其光谱处理技术进行分类, 并综述其原理、技术特点及国内外研究进展, 最后结合该技术特点及其应用前景, 对未来发展趋势作了展望。

关键词: 里德堡原子; 电磁诱导透明; 无线电; 光学测量; 光谱处理

中图分类号: TN249; TN98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230264

0 引言

无线电通常指频率在 0~300 GHz 频谱范围内的电磁波, 该波段在航空航天、电子战、雷达、通信等领域应用广泛, 如何利用尽量少的天线对超宽频谱的电磁信号进行接收感知一直是十分重要的科学问题^[1-2]。

目前, 常用的无线电接收感知主要采用电偶极天线^[3-5]或电光晶体^[6-10]等方法。电偶极天线的基本原理是通过电磁感应现象将电磁波信号转换成感应电流, 这种方法存在诸多限制, 比如: (1) 由于采用级联校准, 溯源链比较复杂, 实现绝对测量困难; (2) 对被接收场扰动大, 不确定度较高; (3) 天线尺寸对波长有依赖, 高分辨率难以实现; (4) 传感器带宽有限, 无法直接宽频接收等^[2, 11]。例如, 一个 3 GHz 的无线电信

号波长为 10 cm, 天线的尺寸应不小于这个波长的 1/3, 这被称为 Chu-Harrington 极限^[1, 12-13], 而电光晶体易受到工艺差异的制约^[14-15]。

与传统天线不同, 基于里德堡原子的无线电光学测量技术有望克服这些问题, 该技术属于量子传感技术的一种^[15-19]。该技术利用两束激光调控碱金属原子的量子状态至主量子数 n 很高的里德堡态, 此时原子具有大电偶极矩和长寿命, 从而可与 DC~THz 范围内的无线电信号发生强电偶极耦合^[16, 20-23], 不受原子泡几何尺寸的限制, 信道容量可远超同等尺寸的传统电偶极天线^[24]。与此同时, 当两束激光的强度满足特定关系时, 透过原子泡的探测光会产生电磁诱导透明效应 (Electromagnetic Induced Transparency, EIT)^[17-18, 25], 并在无线电信号缀饰下发生 Autler-Townes (AT) 劈裂

收稿日期: 2023-04-25; 修订日期: 2023-05-28

基金项目: 中国博士后科学基金 (2021MD703982, 2022T150784); 国防科技大学信息通信学院科研计划 (ZZKY-2022-03-001, YJKT-RC-2112)

作者简介: 吴金云, 男, 讲师, 博士, 主要从事理论物理和原子无线电方面的研究。

通讯作者: 杨剑, 男, 副教授, 硕士, 主要从事光通信和原子无线电方面的研究。

高伟超, 男, 讲师, 博士, 主要从事光学工程和原子无线电方面的研究。

张引发, 男, 教授, 硕士, 主要从事光通信和原子无线电方面的研究。

效应^[26-28],实现无线电信号到光学信号的转化。通过处理和探测光的透射光谱特征,可实现无线电信号频率^[29-34]、幅度或功率^[35-38]、极化方向^[39-40]、相位^[41-42]、到达角^[43]等信息的提取,具有直接解调、无需校准、抗电磁毁伤等特点^[14, 29, 44-46]。该技术物理实现简单,不需要通常量子技术所需的严苛物理条件,比如单光子源或超冷、超导条件等,在常温下即可实现,并且不受工艺水平的限制,具有高稳定性、高精度和高可重复性^[15, 22, 47]。

近年来,该技术在可溯源至基本物理学常数的电场计量^[15, 20, 35, 40, 48-56]、可实现极化方向/频率/相位/到达角高精度分辨的电磁频谱侦测^[21, 29, 40, 43, 49, 57]、全光读取的无线通信^[24, 58-65]、亚波长雷达成像^[55, 66-68]等电子信息技术领域的巨大应用前景引起人们的强烈关注,被认为是可能最快应用的量子技术之一^[1, 2, 62, 69-70]。例如,基于里德堡原子的无线电光学测量技术已经被人们用来接收频率为 0~20 GHz 的调幅或调频收音机、WiFi 和蓝牙信号^[21],实时视频通信^[65],检测信号的到达角^[43]等。

基于里德堡原子的无线电光学测量的关键在于如何从原子系统输出光谱中快速准确地提取出无线电信号的信息。针对静态无线电信号、动态无线电信号、单频无线电信号、多频无线电信号等不同类型的无线电信号,对应的信息提取和光谱处理方式也不同。

文中首先介绍基于里德堡原子的无线电光学测量基本原理,再根据无线电信号的类型,分别对单频静态无线电信号、单频动态无线电信号、多频无线电信号的光学测量光谱处理技术的原理、特点及国内外

进展进行介绍,最后结合该技术特点、应用前景及国内外研究现状,对未来发展趋势进行展望。

1 基于里德堡原子的无线电光学测量基本原理

基于里德堡原子的无线电光学测量基本原理如图 1 左图所示,对应的传统标准传感器相应部分示意图如图 1 右图所示^[62]。该技术的核心器件为一个几微米至几厘米大小的常温碱金属原子泡,其在激光的精确调控下转变为里德堡原子,并使其探测光透射光谱产生 EIT 效应,进而在输入的无线电信号的作用下,使其透明光谱发生 AT 劈裂,完成无线电信号到光学信号的转化,进而实现无线电信号频率、幅度、相位等信息的提取。里德堡原子是一种处于高激发态的原子,通常使用铷原子或铯原子,因其原子序数大,相比原子序数较小的碱金属原子,其最外层电子基态能级更高,更易被激发到高激发态。这种原子具有特殊的量子特性见表 1,包括相邻能级间隔差在无线电频段(DC~THz)、原子半径大、寿命长等^[16, 20-23]。相邻能级间隔差在无线电频段使其可以对无线电信号进行响应,且原子传感器尺寸与无线电信号波长无关;而其原子半径大,导致其电偶极矩很大,因此对无线电信号电场非常敏感;长寿命则导致其与外场可以有很长的相干时间,增强光学信号的同时,也为实验操控提供了便利。

基于里德堡原子的无线电光学测量在技术实现上通常采用双光子激发方案,主要实验装置包括:铷原子或铯原子蒸气室、480 nm (或 510 nm) 的控制光

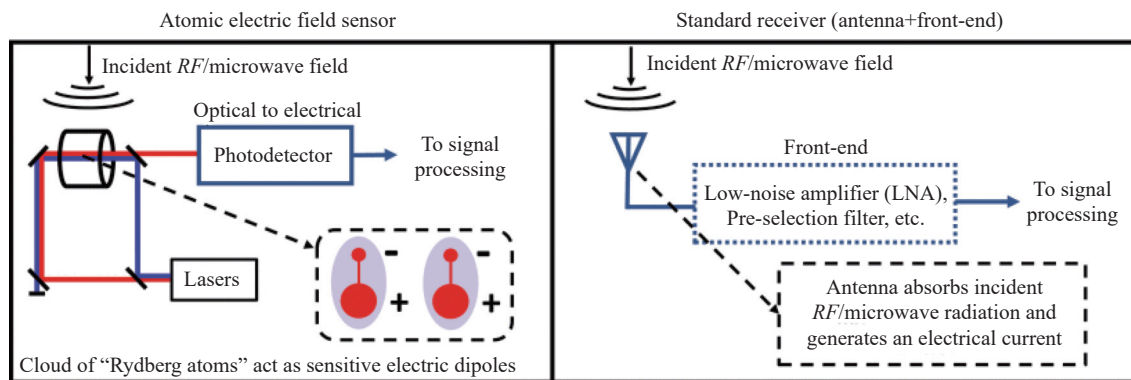


图 1 原子电场传感器与标准接收器感知入射射频或微波辐射机理示意图^[62]

Fig.1 General schematic of the atomic electric field sensor versus a standard receiver for sensing incident RF or microwave radiation^[62]

表 1 碱金属原子量子特性对主量子数 (n) 的依赖关系^[23]

Tab.1 Alkali atom principal quantum number (n) scaling of the most important properties of Rydberg states^[23]

Property	Quantity	Scaling
Energy levels	E_n	n^{-2}
Level spacing	ΔE_n	n^{-3}
Radius	$\langle r \rangle$	n^2
Transition dipole moment ground to Rydberg states	$\langle n\ell -er g \rangle$	$n^{-3/2}$
Radiative lifetime	τ	n^3
Transition dipole moment for adjacent Rydberg states	$\langle n\ell -er n\ell' \rangle$	n^2
Resonant dipole-dipole interaction coefficient	C_3	n^4
polarisability	α	n^7
van der Waals interaction coefficient	C_6	n^{11}

激光器、780 nm (或 850 nm) 的探测光激光器以及探测光的光电转换器件等部分, 见图 2^[62]。其中图 2(a) 为实验设置, 红光和蓝光分别代表探测光 (probe laser) 和控制光 (control laser 或耦合光 coupling laser), 两束激光对向重合入射通过原子泡以尽可能抵消多普勒展宽效应, 图 2(b) 为原子能级结构设置, 探测光与原子的基态 2 kHz 和第一激发态 |2> 发生电偶极耦合, 频率失谐量为 Δ_p ; 耦合光与原子的第一激发态 |2> 和里德堡态 |3> 发生电偶极耦合, 频率失谐量为 Δ_c , 无线电信号 (射频场 RF 或微波场 MW) 与原子的里德堡态 |3> 和里德堡态 |4> 发生电偶极耦合, 频率失谐量为 Δ_{RF} 。两个激光场激发原子到里德堡态, 此时价电子距离原子实较远, 可以看成是对某些频率 (ω_{RF}) 非常敏感的偶极子。如要激发铷 (铯) 原子到 Rydberg 态, 可以应用波长为 $\lambda_p \approx 780 \text{ nm}$ ($\lambda_p \approx 852 \text{ nm}$) 的近红外激光, 和波长为 $\lambda_c \approx 480 \text{ nm}$ ($\lambda_c \approx 510 \text{ nm}$) 的可见激光。利用 EIT-AT 效应检测无线电信号时, 通常扫描或锁定 Δ_c (或 Δ_p), 此时 $\Delta_c \approx 0$ (或 $\Delta_p \approx 0$) 和 $\Delta_{RF} \approx 0$ ^[62]。其中两个光场在原子泡中反向传播, 以尽可能抵消多普勒效应。探测光与控制光和原子发生量子相干过程, 产生 EIT 现象。无线电信号作为缀饰场与原子进行耦合, 改变原子的量子状态, 进而对通过原子的探测光光场进行调制, 产生 EIT 光谱的 AT 劈裂现象。与传统天线不同, 原子天线不会吸收无线电信号的能量,

可以实现隐蔽传感^[16]。除了这种典型的双光子激发方案之外, 还有三光子激发方案等^[37, 46, 71-73]。

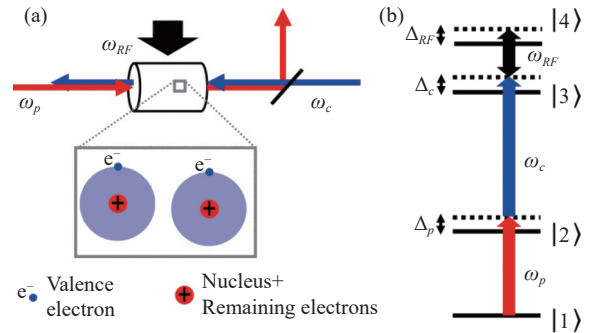


图 2 基于里德堡原子的无线电光学测量双光子激发方案示意图。

(a) 实验设置; (b) 能级设置^[62]

Fig.2 Schematic diagram of the radio-optical measurement of two-photon excitation based on Rydberg atoms. (a) Experimental setup; (b) Experimental setup^[62]

当原子在激光激励下被制备到 Rydberg 态 |3> 时, 原子将对与邻近 Rydberg 态 |4> 的跃迁共振或近共振的无线电信号非常敏感。如果入射的无线电信号与原子的量子状态远离共振区域, 此时仍会引起能级 |3> 的 Stark 频移^[26]。通过对出射探测光的光学检测, 进行光谱分析, 可以提取入射无线电信号的特性。

图 3 显示了在理想情况下不同外场对探测光输出光谱的影响。在只有探测光通过原子的情况下, 当调整光的频率与原子接近共振时, 会发生强烈吸收现象, 见图 3(a)。当控制光被打开时, 一部分原子被激发到 Rydberg 态, 此时会出现 EIT 的现象, 即在探测光的吸收光谱中出现一个窄带宽的高透明窗口, 见图 3(b) 和图 3(c)。最后, 当与邻近的里德堡态发生共振或近共振的无线电信号入射时, 诱发 EIT 光谱的 AT 劈裂^[27], 见图 3(d)。这种原子与外场量子干涉产生的 EIT-AT 效应, 即是基于里德堡原子的无线电光学测量的基本原理。

事实上, 发生 AT 劈裂现象时, 里德堡原子对外界无线电最敏感, 此时 RF 或微波场与特定原子能级跃迁处于谐振或接近谐振状态。由于原子的里德堡能级十分丰富, 因此可以谐振响应的无线电频段可以包含 DC~THz 频段范围内的数万个离散载波频率^[16, 23, 68]。然而当无线电信号频率低于 100 MHz 时, 原子接收机谐振响应频点非常密集, 相互干扰会较

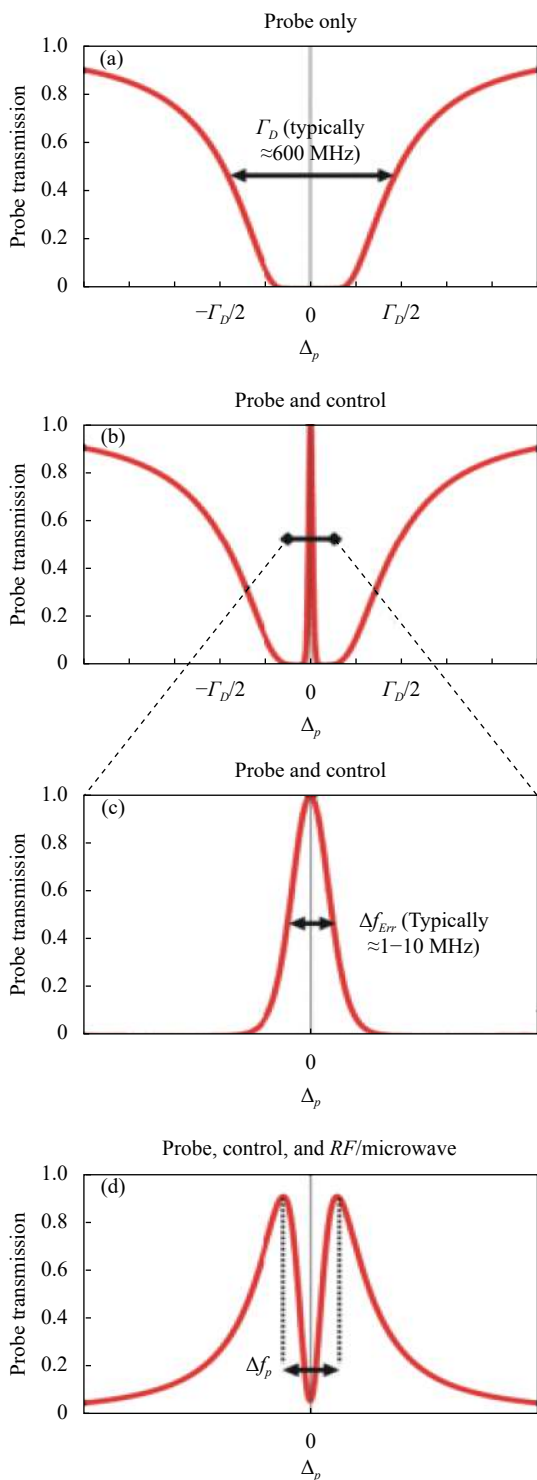


图 3 不同外场下的探测光透射光谱图。(a) 只有探测光时；(b) 和 (c) 加入控制光时；(d) 进一步加入 RF 或微波场时^[62]

Fig.3 Transmission spectra of the probe laser under different external fields. (a) Only with the probe laser; (b) and (c) With the addition of control laser; (d) With further addition of RF or microwave fields^[62]

大。因此，为了减少干扰，还可利用非谐振时的 AC Stark 频移效应用于测量载波频率低于 UHF 的场。非谐振区域的灵敏度比谐振区域差，但已经有原理验证实验表明，对于足够强的电场，该传感器可以感知连续可调频率直至接近 DC^[21, 24, 49]。

在探测光透射光谱发生 AT 劈裂现象时，AT 劈裂宽度 Δf_p 与无线电信号的强度 \vec{E}_{RF} 及原子跃迁电偶极矩 $\vec{\mu}_{RF}$ 成线性关系：

$$\Delta f_p = \begin{cases} \frac{\lambda_c}{\lambda_p} \frac{\Omega_{RF}}{2\pi} & \text{if } \Delta_p \text{ is scanned} & (1a) \\ \frac{\Omega_{RF}}{2\pi} & \text{if } \Delta_c \text{ is scanned} & (1b) \end{cases}$$

式中：控制光波长和探测光波长之比 (λ_c/λ_p) 源自于扫描探测光时的两个激光场之间的多普勒失配^[74-75]； Ω_{RF} 为无线电信号对应的原子跃迁 Rabi 频率。 Ω_{RF} 与电场强度成正比为：

$$\Omega_{RF} = \frac{\vec{\mu}_{RE} \cdot \vec{E}_{RE}}{\hbar} \quad (2)$$

式中： \hbar 为约化普朗克常数。根据公式 (2) 可以发现，基于里德堡原子的无线电光学测量技术无需像偶极天线一样进行校准，可以直接溯源到基本物理学常数，即普朗克常数。此外，最小可感知的电场强度 E_{min} 由最小可分辨的 AT 劈裂宽度 Δf_p 决定。在 AT 劈裂区域，最小可感知的电场强度与测量时间和相互作用强度成反比^[51]：

$$E_{min} = \frac{h}{|\vec{\mu}_{RF}| T_{meas} \sqrt{N}} \quad (3)$$

式中： h 为普朗克常数； T_{meas} 为测量时间； N 为独立重复测量次数^[51]。可以看到，电偶极矩越大，测量时间越长，有效参与测量的原子数目越多，基于里德堡原子的无线电光学测量的最小可测场强越小^[69]。由于原子波函数的投影测量具有概率性，因此这种关系通常被称为原子散粒噪声极限。

当测量时间大于退相干时间 T_2 时，公式 (3) 的定义必须进行调整，此时可将 T_{meas} 取为 T_2 ，并且将独立测量次数 N 取为 $N = N_a T_{int} / T_2$ ，其中 T_{int} 是总积分时间， N_a 是激发的 Rydberg 原子的平均数量，每个原子单次参与测量的时间为 T_2 ，则原子散粒噪声下的最小可测场强为^[51]：

$$E_{min} = \frac{h}{|\vec{\mu}_{RF}| \sqrt{N_a T_{int} T_2}} \quad (4)$$

需要注意的是,在给定体积内的 Rydberg 原子密度受到阻塞半径 (blockade radius) 的限制,而 Rydberg 原子的总数受到两束激光场与原子泡重叠体积大小的限制。当原子气体温度从常温到超冷变化时,人们对 Rydberg 原子数量 N_a 的估计值在 $100^{[24]}$ 和 $1000^{[76]}$ 之间,远低于阻塞半径的限制,可以改进的方法包括使用更高功率的激光、专门的磁光陷阱等^[62]。对于热原子,退相干速率会受到渡越时间展宽的限制,即原子离开光场横截面区域所需的时间。渡越时间引起的退相干速率由光束宽度和原子温度决定;对于 $1/e^2$ 束腰半径为 $100\ \mu\text{m}$ ($1\ \text{mm}$) 的光束,该速率在室温下约为 $2\pi \times 370\ \text{kHz}$ ($2\pi \times 37\ \text{kHz}$)^[77]。对于冷原子,由于原子可在光场横截面内停留更长时间,因此其退相干速率较低,约为 $1\ \text{kHz} \sim 1\ \text{MHz}$ ^[77]。

基于里德堡原子的无线电光学测量还可通过交流斯塔克效应^[29],分析与原子能级相关联的探测光输出光谱特征的变化,测量与量子态 $|4\rangle$ 态非共振的射频或微波场,但相比于利用共振干涉的 EIT-AT 效应的无线电光学测量灵敏度要低,非共振场测量技术包括混频检测方案^[14, 21, 49]、自校准方案^[24, 44]等,可用于精密计量^[44]和超宽带频谱分析^[21]。

2 基于里德堡原子的无线电光学测量光谱处理技术

基于里德堡原子的无线电光学测量的实验设置

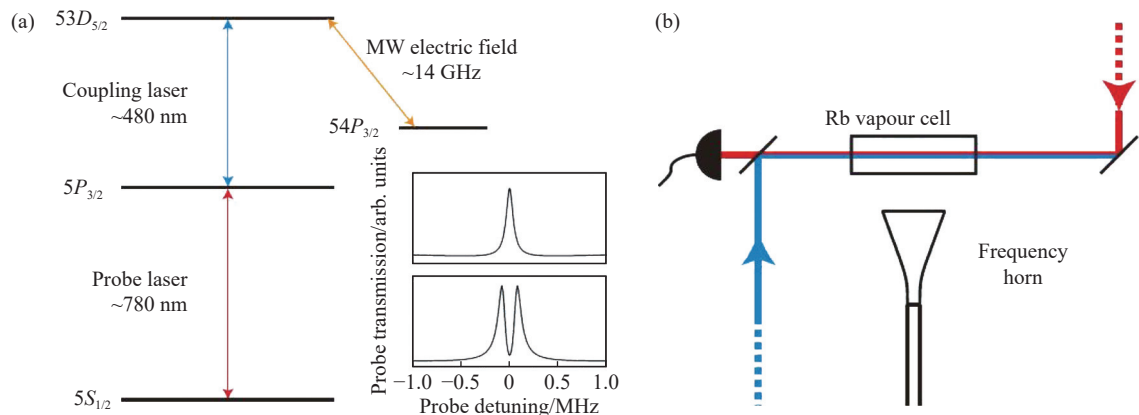


图 4 针对单频静态微波电场的里德堡原子光学测量的能级设置和实验装置示意图^[15]。(a) 四能级系统的能级图,插图顶部为关闭微波场时的 EIT 光谱,插图底部为打开微波场时的 EIT-AT 光谱;(b) 实验设置

Fig.4 Level scheme and experimental setup for Rydberg atomic optical measurement of a single-frequency static microwave electric field^[15]. (a) Level diagram of the four-level system, with the top inset showing the EIT spectrum when the microwave field is off and the bottom inset showing the EIT-AT spectrum when the microwave field is on; (b) Experimental setup

包括 3 个方面:(1)是原子系统内部量子状态(能级系统)的选择;(2)是影响或改变原子系统量子状态的外场设置;(3)是将原子感知到的状态变化通过特定的物理现象转化为便于读取的信号。

从基于里德堡原子的无线电光学测量的基本原理可以发现,无线电信号信息快速准确读取的关键在于对原子系统输出光谱特征的分析。针对静态无线电信号、动态无线电信号、单频无线电信号、多频无线电信号等不同类型的无线电信号,对应的信息提取和光谱处理方式也不同,将在下文进行详细介绍。

2.1 单频静态无线电信号测量的光谱处理

基于里德堡原子的无线电光学测量技术,最先被用于单频静态无线电信号的传感,包括射频信号、微波信号、甚至太赫兹波段,以实现无需校准的电场强度的绝对测量及成像应用。

2012 年 11 月,美国俄克拉荷马大学和德国斯图加特大学的 James P. Shaffer 等人首次报道了基于里德堡原子 EIT-AT 现象的 $(14.233\ 0 \pm 0.000\ 1)\ \text{GHz}$ 静态微波场的光学测量实验,能级系统和实验装置如图 4 所示,其中图 4(a) 右侧插图分别为微波场关闭和打开时分别对应的探测光透射光谱中的 EIT 和 EIT-AT 现象,微波电场测量灵敏度达到 $30\ \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$,可探测的最小场强达到 $8\ \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$ ^[15];2013 年,这个研究小组首次实验演示了单频静态微波电场的矢量测量,实现微波电场偏振分辨率为 0.5° ^[40],并在 2014 年首次将该

传感技术用于微波电场成像,在 6.9 GHz 上的成像空间分辨率为 $66 \mu\text{m}$ ($\sim\lambda/650$)^[68]; 2015~2017 年又分别采用了基于 Mach-Zehnder 干涉仪的零差探测技术和频率调制技术改进了测量,并将微波电场探测的灵敏度优化至 $3 \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ ^[45, 51, 78]。美国国家标准技术研究院的 Christopher L. Holloway 等人分别在 2014、2016、2017 年进行了跟进研究,开展了里德堡原子电场计的创新应用,把可探测场推进至毫米波,甚至是太赫兹波段^[54, 79-80]。美国密歇根大学 G. Raithel 教授等人则在 2016、2017 年重点研究了微波强电场测量,通过比对 Floquet 模型和实验结果,在 Ka 波段实现了 ± 1 GHz 带宽、强度达到 $2.3\sim 10 \text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的强微波电场的测量,精度达到 6%^[31, 81],并于 2019 年基于改进的 Floquet 模型,实现了 50~500 MHz 频段高达 $50 \text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 强微波电场的测量,频率精度和场强精度分别达到 1% 和 1.5%^[82]。

国内相关团队在微波电场测量研究方面也有显著进展。2020 年,山西大学由贾锁堂和肖连团等人带头的激光光谱研究团队,在基于里德堡原子的微波精密测量研究中取得了突破性进展,在国际上首次实现里德堡原子微波超外差接收机样机,极大地提升了微波电场场强的探测灵敏度,微波测量灵敏度达到 $55 \text{nV}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$,最小可探测到的微波场强约为 $780 \text{pV}\cdot\text{cm}^{-1}$,大大超过了原有相关记录^[20]。2020 年,南京航空航天大学潘时龙等人提出了一种光子辅助的原子系统,用于在大光谱范围内测量微波信号的频率和相位噪声,待测量的频率和相位噪声均从被测信号与其参考信号之间的相位差中提取,该相位差被可变光延迟线 (VODL) 所延迟。系统校准、频率测量和相位噪声测量是通过在不同的工作模式下调整 VODL 来执行的,实验证明了在 5~50 GHz 较大频率范围内对微波信号的频率和相位噪声的精确测量^[83]。2021 年,中国科学院大学的贾凤东等人设计了一种配置有辅助微波的里德堡原子微波电场计,最小可测场强达到 $\mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$,该方法比测量探测光透光率变化的方法更准确、直观和方便^[36];并于 2023 年提出在不加本地辅助微波场情况下,基于 EIT-AT 效应的色散光谱直接测量微波场电场强度的新方法,测得的最小电场强度可达 $0.056 \text{mV}\cdot\text{cm}^{-1}$,比通常采用的通过 EIT-AT 透射光强劈裂宽度直接测得的最小值低 30 倍^[84]。

2020 年,华南师范大学的廖开宇等人将冷原子样品中的电磁感应吸收 (Electromagnetically Induced Absorption, EIA) 线宽缩小到 500 kHz,进一步利用 EIA-AT 分裂,实现了在线性区域内可测量的最小微波场强度的分辨率为 $100 \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ ^[35];并于 2022 年提出应用两个失谐微波场作为可调谐本地振荡场的新型外差技术方案,从而可以在超过 1 GHz 的连续频率范围检测信号微波的幅度、相位和频率信息,远超传统谐振外差的频带范围,灵敏度可达 $1.5 \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$,实现 80 dB 的线性动态范围^[34]。2022 年,中国科学技术大学丁冬生等人基于 AC Stark 效应和非共振外差技术,通过引入一个本地振荡电场来放大系统对微弱信号电场的响应,通过测量探测光的电磁诱导透明光谱得到信号电场的强度,实现了对 30 MHz 微波电场的高灵敏度测量,最小电场强度为 $37.3 \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$,灵敏度为 $-65 \text{dBm}/\text{Hz}$,动态范围超过 65 dB^[57];并紧接着提出利用相变临界点处强相互作用的多体原子系统代替单原子系统测量微波电场的新方法,显著提高了测量微波的精度和灵敏度,灵敏度达到 $49 \text{nV}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ ^[85]。

总体来看,基于里德堡原子的单频静态无线电信号传感的光谱处理主要分为四种情形,分别对应输入的无线电信号强度为微弱、中等强度 (较弱、较强) 和很强。其中中等强度无线电信号的测量相对容易实现。

2.1.1 中等强度无线电信号测量的光谱特征及其处理

对于中等强度的无线电信号,探测光输出光谱主要特征表现为 EIT 透明峰的下降 (较弱强度) 和 AT 劈裂 (较强强度) 如图 5 所示^[15]。当选择使用的原子里德堡态不同时,该方案适用的信号电场强度也不同,总体处在 $0.1 \text{mV}\cdot\text{cm}^{-1}\sim 0.1 \text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间^[40, 51, 61]。此时,探测光输出光谱的特征提取是通过读取 AT 劈裂宽度来实现的。根据公式 (1) 中所给出的无线电电场强度与 AT 劈裂宽度成正比的关系即可得到电场强度的大小。其中图 5(a) 为较弱微波电场强度下 EIT 透射峰的衰减 (黑色) 及其理论光谱曲线 (红色)。理论和实验之间的差异归因于这些图中使用的是忽略了精细能级的四能级理论而不是包含精细劈裂能级的完整 52 能级理论,以及渡越时间展宽具有随机性。图 5(b) 为较强微波电场强度下发生的 $53\text{D}_{5/2}\rightarrow 54\text{P}_{3/2}$ 里德堡跃迁的 AT 劈裂光谱,劈裂宽度为 $\lambda_v/\lambda_p\Omega_{\text{MW}}/2\pi$ (公式 (1a))^[15]。

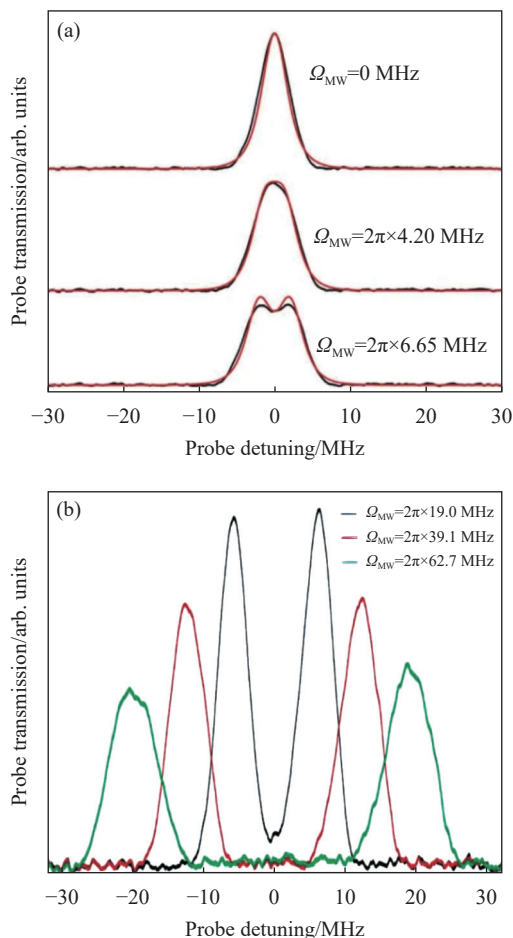


图 5 微波电场引起的探测光输出光谱的 EIT 和 AT 劈裂^[15]。(a) 较弱微波电场强度, (b) 较强微波电场强度

Fig.5 Electric fields induced EIT and AT splitting in the probe laser transmission spectrum^[15]. (a) Corresponds to the weak field, while (b) corresponds to the modest field^[15]

2.1.2 微弱强度无线电信号测量的光谱特征及其处理

对于微弱强度的无线电信号, 此时里德堡原子与无线电信号的相互作用强度不足以使 EIT 峰发生 AT 劈裂, 探测光输出光谱主要特征表现为 EIT 透明峰增强, 见图 6^[15]。图 6(a) 为 EIT 峰值增强程度随电场强度的变化, 红线代表理论, 黑线代表实验数据。随着电场强度逐渐增加到 Autler-Townes 区域, 峰值处的透射率开始降低。图 6(b) 为在微弱强度下, 当增加微波电场强度时, EIT 透射率增强的物理机理, 即 EIT 透射率增加是由原子速度空间扩展引起的。当选择使用的原子里德堡态不同时, 该方案适用信号电场强度也不同, 总体处于 $\mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}\sim\text{mV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间^[15,20,34]。

此时, 探测光输出光谱的特征提取是通过读取 EIT 透明峰的高度变化来实现的, 如图 7 所示。图 7

(a) 为微波场微弱区域电场强度和频率失谐量对探测光透射光谱的影响。黑色曲线是实验数据, 进行了 9 000 次平均; 红色曲线是对数据进行高斯拟合得到的结果。图 7(b) 为 EIT 透明峰高度对微波电场强度的依赖情况。2012 年, 美国俄克拉荷马大学和德国斯图加特大学的 James P. Shaffer 等人据此测得的灵敏度为 $\sim 30 \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, 最小场强为 $8.33 \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$ ^[15]。需注意在弱场时, 无线电信号电场强度与 EIT 透明峰高度之间的关系是复杂的非线性关系 (见图 7(b))^[15], 难以表述成为一个简单的比例公式, 在理论上, 可通过光学布洛赫方程 (Optical Bloch Equation, OBE) 来进行严格求解^[18,86]。

实际中, 除了对微弱信号直接探测以外, 人们还

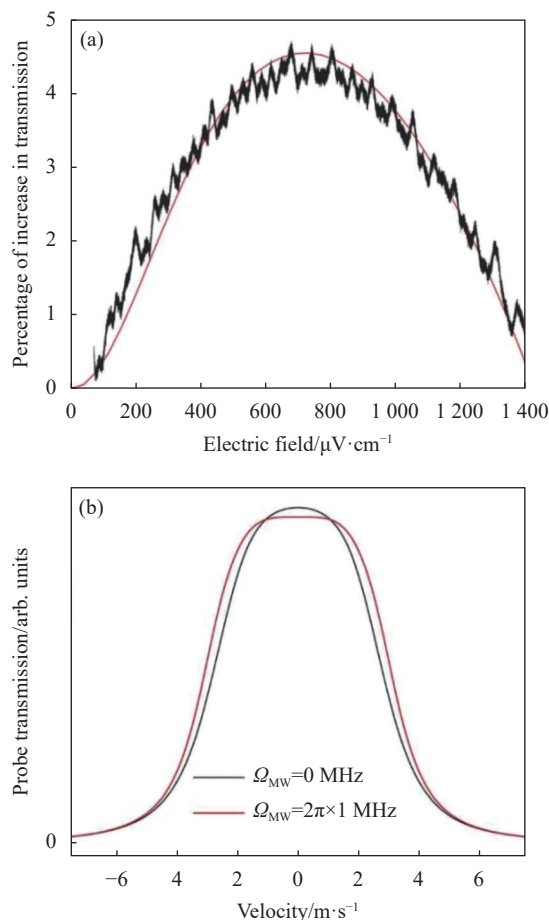


图 6 微弱微波电场引起的探测光输出光谱的 EIT 透明峰的增强^[15]。(a) EIT 峰值增强; (b) EIT 透射率增强的物理机理

Fig.6 Enhancement of the EIT transparency peak of the transmission spectrum of the probe laser under the weak field^[15]. (a) EIT peak enhancement; (b) Physical mechanism behind the enhancement of EIT transmission

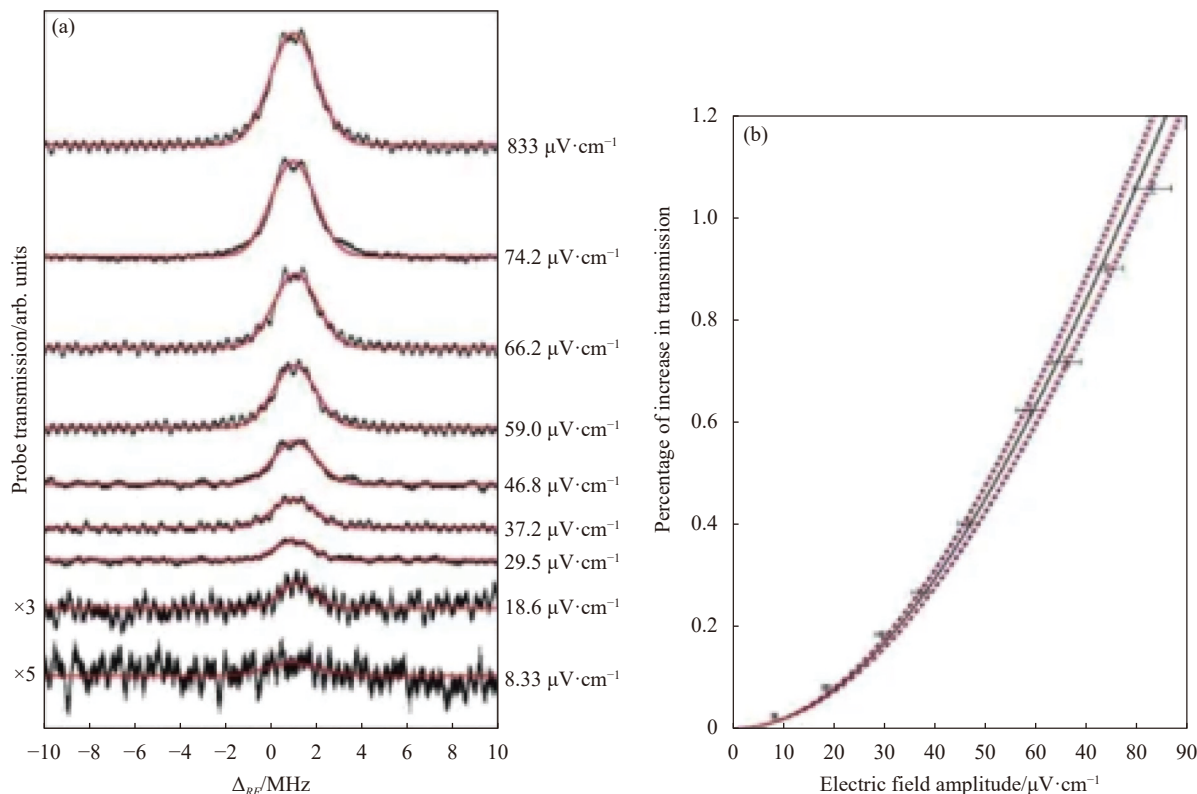


图 7 微弱微波电场测量的光谱图^[15]。(a) 微波场对探测光透射光谱的影响; (b) EIT 透明峰高度对微波电场强度的依赖

Fig.7 Transmission spectrum induced by a weak microwave electric field^[15]. (a) Effect of the microwave field on the transmission spectrum of the probe laser; (b) Dependence of the EIT transparency peak height on the microwave electric field strength

可以采用增加本地微波场, 如超外差方法^[20, 34, 48, 57, 85], 使输出光谱状态处于 EIT 区域, 然后再对微弱信号进行传感接收, 优点在于能够根据光谱特性, 选择灵敏度较高的测量点进行测量, 对于特定微波场强产生尽可能大的光学信号变化, 可以提高灵敏度, 代价则是需要本地微波天线, 这可能限制原子天线本身优势的发挥, 比如超宽频谱特性等。

2020 年, 山西大学贾锁堂和肖连团等人针对拉比频率 Ω_s 远小于 EIT 线宽的 6.947 GHz 超弱微波场, 提出了基于里德堡原子的无线电超外差接收机, 实验设置如图 8 所示^[20]。图 8(a) 为能级结构设置, 态 |1>、|2> 和里德堡态 |3> 分别通过探测光场 (Ω_p) 和控制光场 (Ω_c) 场进行共振耦合。本地微波电场 (蓝色) 通过拉比频率 Ω_L 共振驱动电偶极跃迁 |3>-|4>。微弱信号微波 (红色) 与本地微波具有相位差 ϕ_s 和频率差 δ_s 的耦合 $\Omega_s e^{-i(2\pi\delta_s t + \phi_s)}$ 。图 8(b) 为在本地场调制下的微波电场测量示意图。在较强本地微波的作用下, 探测光透射率发生 EIT 峰的 Autler-Townes 劈裂现象^[18]。共振透射点 \bar{P}_0 位于 EIT 谱线半腰上 (斜率为 $|\kappa|$), 在里德堡缀

饰态 $|\pm\rangle$ 中会出现能量位移: $\pm E_1 = \pm \hbar \Omega_s \cos(2\pi\delta_s t + \phi_s)/2$, 此时透射率处于线性变化区间。当能量扰动 $\pm E_1$ 将两条 EIT 线向外移动时, 这种移动以速率 $|\kappa|$ 线性地转化为共振处光透射率的变化。

因此, 通过调节 Ω_L , 可以调整 EIT 线的轮廓, 从而使得 \bar{P}_0 处的斜率 $|\kappa_0|$ 最大, 即检测 E_1 的最佳点。图 8 (c) 为由本地微波 $E_{L(t)}$ 缀饰的里德堡原子组成的超外差接收机实验设置示意图, 可以检测信号微波的频率、相位和线性放大的探测光输出 $P_{\text{out}}(t)$:

$$P_{\text{out}}(t) = P(t) - \bar{P}_0 = |P(\delta_s)| \cos(2\pi\delta_s t + \phi_s) \quad (5)$$

由共振点处输出光信号的变化量 $|F(\delta_s)|$ 可以获得信号微波场的拉比频率 Ω_s :

$$\Omega_s = \frac{|P(\delta_s)|}{|\kappa_0|} \quad (6)$$

然后再由公式 (2) 即可获知 E_s 。基于里德堡原子的超外差无线电光学测量输出光谱处理如图 9 所示。其中图 9(a) 为不同本地场强 E_L 下的 $|F(\delta_s)|$, 可以看到最佳测量点的存在, 该点对应的 EIT-AT 光谱见图 9(b), 对应的本地场电场强度 $E_L = 3.0 \text{ mV}\cdot\text{cm}^{-1}$, 对

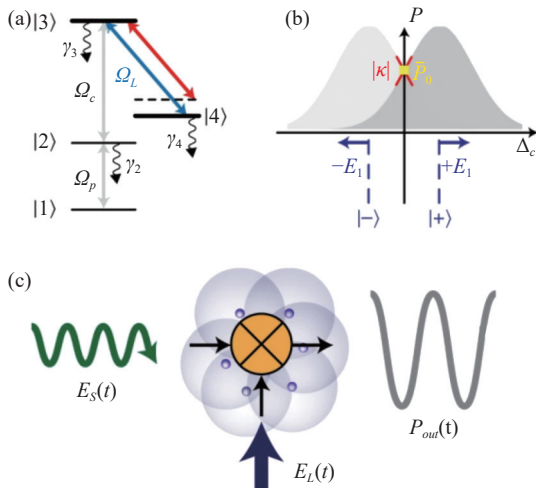


图 8 基于里德堡原子的超外差无线电光学测量方案示意图^[20]

Fig.8 Schematic diagram of the radio-optical measurement heterodyne receiver based on Rydberg atoms^[20]

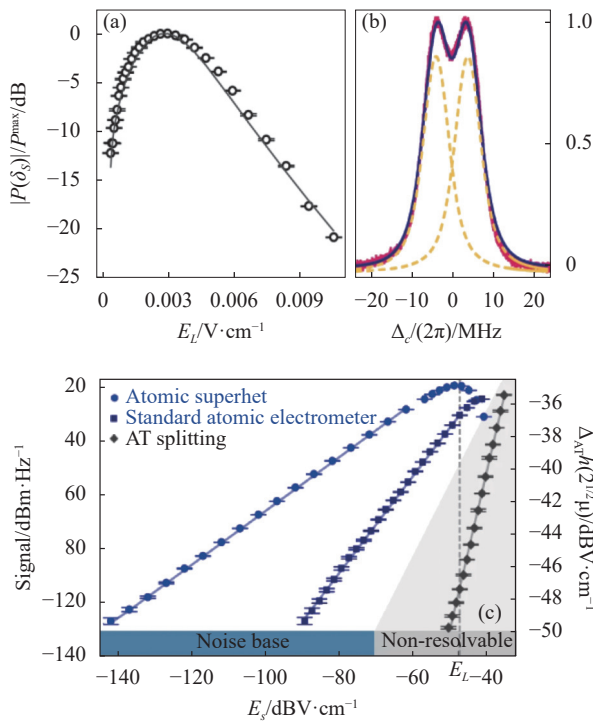


图 9 基于里德堡原子的超外差无线电光学测量输出光谱处理^[20]

Fig.9 Spectral processing procedure of the radio-optical measurement heterodyne receiver based on Rydberg atoms^[20]

应的拉比频率 $\Omega_L = 2\pi \times 7.9 \text{ MHz} \sim \Gamma_{EIT}$ 。图 9(c) 为分别利用原子超外差检测共振频率处探测光透射率变化、使用标准原子电场计^[15, 51] 检测共振频率处探测光透射率变化和根据公式 (1) 测量 AT 劈裂宽度等三种不同方法来测量信号微波电场强度时的光谱处理结果。最终发现, 使用原子超外差方法具有更大的线

性动态范围, 可达 90 dB, 并极大地提升了微波电场场强的探测灵敏度, 可达 $55 \text{ nV} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 最小可探测微波场强可达 $780 \text{ pV} \cdot \text{cm}^{-1}$, 超过了原有相关记录^[20]。

2.1.3 强场无线电信号测量的光谱特征及其处理

传统无线电信号电场测量主要是基于电偶极天线和整流二极管实现的^[3-4], 由于金属结构感应电场的干扰、工艺差异、短期和长期漂移等因素, 使用中需要定期校准, 对高强度无线电信号电场测量精度有限, 不确定度通常大于 1 dB 或 5%^[87-89]。

对于强场无线电信号, 原子对外界微波场的响应已经超出了探测光输出光谱的 AT 劈裂线性动态范围, 此时探测光输出光谱主要特征表现为强烈的 AC Stark 频移效应, 如图 10 所示^[81], 实验光谱图用线性灰度表示, 理论仿真结果用圆点表示。当选择使用的原子里德堡态不同时, 该方案适用的信号电场的强度也不同, 总体处在 $0.1 \sim 10 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 之间^[31, 81-82]。其中图 10(a) 为相对较弱场强下, 与铷原子 $26D_{5/2} - 27P_{3/2}$ 耦合的 132.6495 GHz 微波场引起的原子能级频率偏移量与电场强度的关系, 此时光谱表现为线性度较好的 AT 劈裂; 图 10(b) 为相对强场情形下, 与铷原子 $65D - 66D$ 耦合的 12.4611548 GHz 微波场引起的原子能级频率偏移量与电场强度的关系, 此时光谱表现为非线性的 AC Stark 频移^[81]。

探测光透射 EIT 光谱反映了里德堡原子对高强度无线电信号电场的量子响应, 进一步将实验光谱图与 Floquet 模型计算的参考光谱进行比较, 即可读取无线电信号电场幅度、频率和相位等参数的测量值^[81]。

在强直流电场中, 不同角动量对应的精细结构能级发生退简并, 能级重新耦合成 Stark 态, 在弱场中表现出近似二次移位, 在强场中表现出线性移位^[16]。典型实验方案如图 11 所示。图 11(a) 为设备设置和能级结构设置。其中 ^{85}Rb 原子玻璃泡是圆柱形结构, 横截面为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$; 电场由泡内的两个平面金属电极产生, 两个电极长度为 9 mm 、宽度为 0.5 mm 、厚度为 3 mm 、间距为 $d = (380 \pm 15) \mu\text{m}$, 电场强度可达 10 kV/m ; 原子能级结构为三能级阶梯型结构^[90], 两束窄线宽激光 (线宽小于 1 MHz , 光斑 FWHM 小于 $70 \mu\text{m}$) 与原子量子干涉, 在 780 nm 探测光透射光谱上形成电磁诱导透明 (EIT) 现象。图 11(b) 为探测光透射光强随着 480 nm 控制光频率失谐量变化的光谱图, 当控制光的

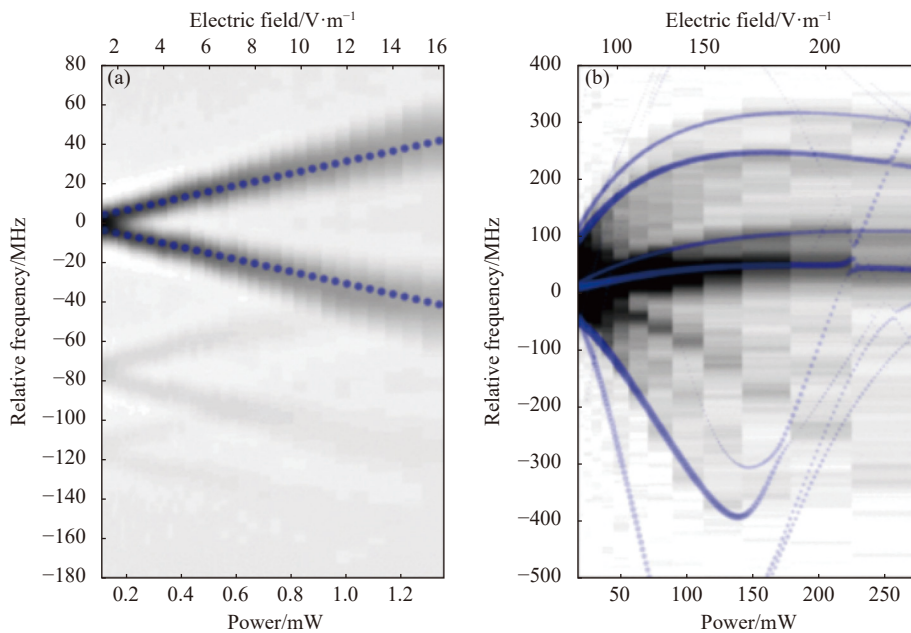


图 10 不同场强下的 AC Stark 频移效应, (a) 对应较弱场强, (b) 对应强场^[81]

Fig.10 AC Stark shift effect under different field strengths, where (a) corresponds to weaker field strength and (b) corresponds to stronger field strength^[81]

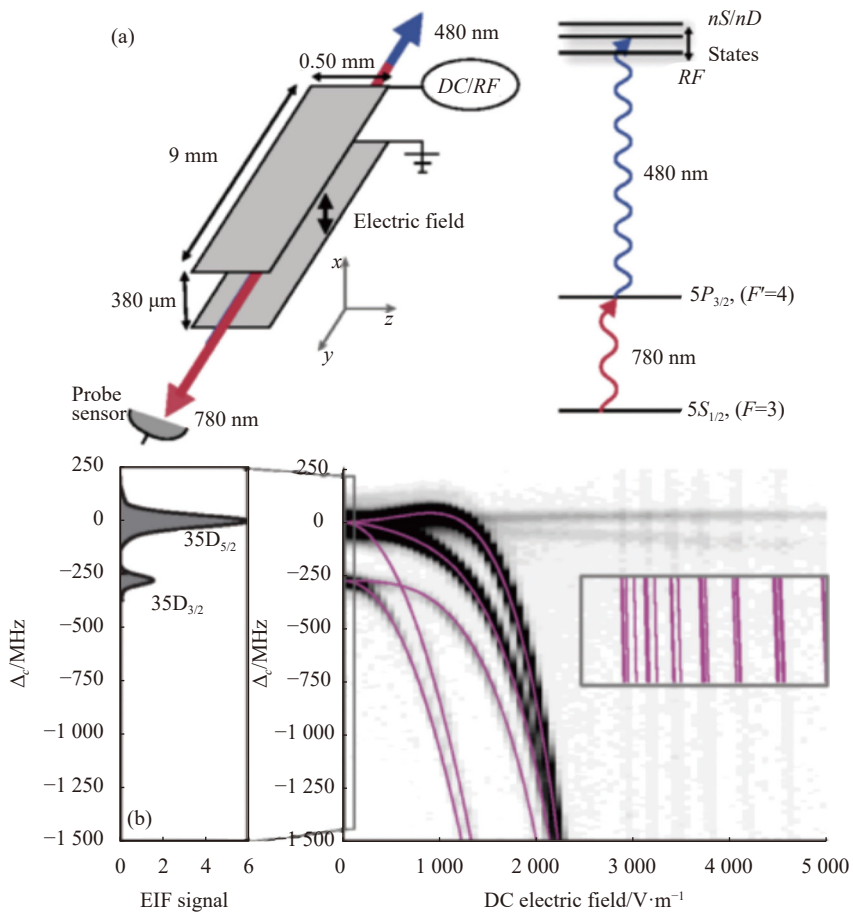


图 11 基于里德堡原子的强场无线电信号电场测量原理图^[82]. (a) 实验装置和能级结构设置; (b) 探测光输出光谱图

Fig.11 Schematic diagram of the electric field measurement of strong RF signals based on Rydberg atoms^[82]. (a) Experimental setup and level structure configuration; (b) Transmission spectrum of the probe laser

频率恰好与某个原子里德堡态能级共振时,可以看到探测光透射率急剧增加,即出现 EIT 峰。在控制光 2 GHz 频率扫描范围内,可以看到在 $35D_{5/2}$ 和 $35D_{3/2}$ 两个能级处出现了两个 EIT 透明峰。在直流电场下,探测光透射光谱随着电场强度的变化情况,其中品红色实线是 Floquet 模型^[81] 计算的结果,见图 11(c)。

在强交流电场下,交流电场频率的偶次谐波会出现现在探测光的 EIT 光谱中^[28],并会产生复杂的射频调制边带,具有交流斯塔克位移和交叉或反交叉现象^[91],如图 12 所示。图 12(a) 为里德堡原子在 50 MHz 视频

交流电场耦合下的 EIT 光谱随场强的变化,在控制光的 2 GHz 扫描范围内存在 $30D_{5/2}$ 和 $30D_{3/2}$ 两个里德堡能级,随着电场强度的增加,偶次谐波分量出现,对应的 AC 斯塔克频移为 $2nv_{rf}$,蓝色和红色圆圈分别对应 $m_J = 1/2$ 和 $m_J = 3/2$ 情形下的 Floquet 模型计算结果;图 12(b) 为电场强度为 41.5 dBI 时,里德堡原子在 50 MHz 交流电场耦合下的 EIT 光谱,在光谱上出现了 6 个谐波峰,平均频率间距为 (99 ± 4) MHz = $2v_{rf}$,考虑了 $m_J = 1/2$ 和 $m_J = 3/2$ 的总贡献之后, Floquet 模型计算的结果用圆圈表示;图 12(c) 为电场强度为 46 dBI 时,里德堡原子在不同频率交流电场耦合下的 EIT 光谱,其中难以分辨的小峰的包络存在 $-5v_{rf}$ 大小的周期。实际在强场下, n 阶谐波诱导的 n 阶边带的频率位置有经验公式 $\Delta_c = -(\alpha/4)E_{rf}^2 - nhV_{rf}$ ^[28]。

通过比较实验测得的 EIT 光谱和 Floquet 模型计算得到的 EIT 光谱,美国密歇根大学 G. Raithel 等人在 Ka 波段实现了 ± 1 GHz 带宽、强度达到 $2.3 \sim 10$ V·cm⁻¹ 的强无线电信号电场的测量,精度达到 6%^[31, 81],在 50~500 MHz 频段实现了高达 50 V·cm⁻¹ 强无线电信号电场的测量,频率精度和场强精度分别达到 1% 和 1.5%^[82],高于传统测量方式。

从相关文献可以看出,对于不同强度范围的无线电信号,必须利用不同的物理效应来进行信息的光学读取,光谱处理方法也有差别。进一步说明了里德堡原子与激光和无线电信号之间有着非常丰富的物理现象,可以用来应对各种不同的应用场景,在取代部分传统天线上具有前景。

2.2 单频动态无线电信号测量的光谱处理

随着静态无线电信号测量技术的发展,人们开始考虑推广该技术的应用场景,首先即是基于单频动态无线电信号测量的无线通信接收,其中里德堡原子无线通信接收机与传统无线通信接收机的信号解调过程基本原理对比如图 13 所示。

2018 年 3 月,美国陆军研究实验室首次提出将基于里德堡原子的无线电光学测量技术拓展应用到无线通信领域,并开展了具体的原理验证。在美国国防部长办公厅“量子科学与工程”项目支持下,美陆军研究实验室在国际上率先发表了基于里德堡原子 EIT-AT 效应的微波通信原理验证实验, D. H. Meyer 等人利用铷 87 原子的里德堡能级 $50D_{5/2}$ 和 $51P_{3/2}$ 实现了

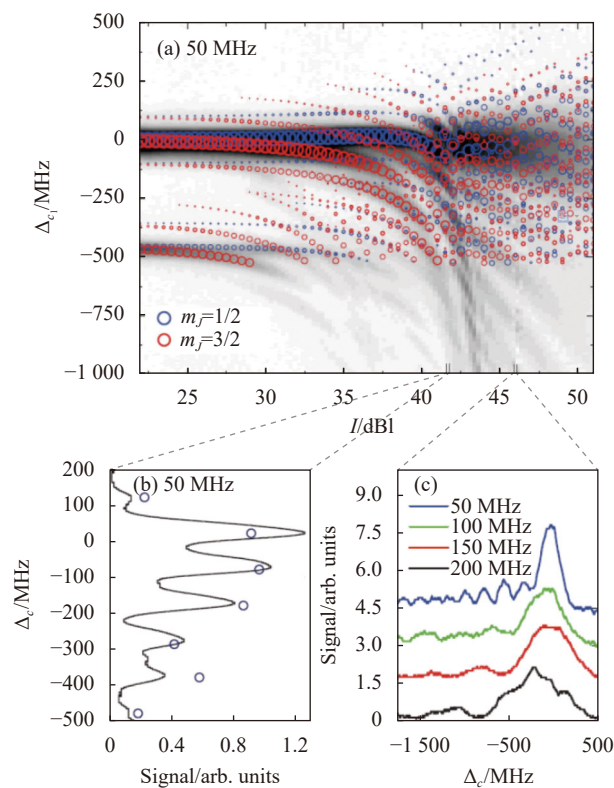


图 12 射频强交流电场下的探测光 EIT 光谱图^[82]。(a) 里德堡原子在 50 MHz 交流电场耦合下的 EIT 光谱随场强的变化; (b) 电场强度为 41.5 dBI 时,里德堡原子在 50 MHz 交流电场耦合下的 EIT 光谱; (c) 电场强度为 46 dBI 时,里德堡原子在不同频率交流电场耦合下的 EIT 光谱

Fig.12 EIT spectrum of the probe laser under strong ac fields^[82].

(a) EIT spectrum of Rydberg atoms coupled to a 50 MHz ac field as a function of field strength; (b) EIT spectrum of Rydberg atoms coupled to a 50 MHz ac field with an electric field intensity of 41.5 dBI; (c) EIT spectrum of Rydberg atoms coupled to ac fields at different frequencies with an electric field intensity of 46 dBI

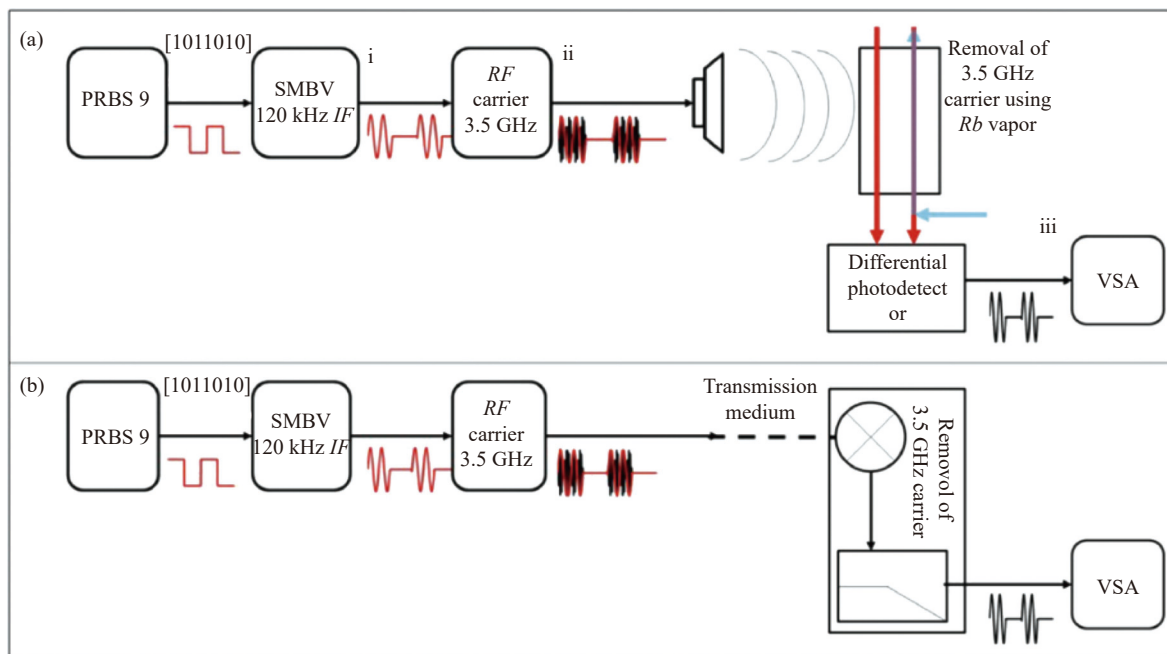


图 13 里德堡原子无线通信接收机 (a) 与传统无线通信接收机 (b) 的信号解调过程示意图^[95]

Fig.13 Schematic diagram of the signal demodulation process for Rydberg atomic wireless communication receiver (a) and traditional wireless communication receiver (b)^[95]

17 GHz 微波载频下基于 8PSK 调制方式的 8.2 Mbit/s 通信速率的实验演示^[61]；该团队在 DARPA 项目支持下，2020 年 1 月从理论角度分析了从 1 kHz~1 THz 宽频谱和宽振幅范围的微波电场灵敏度，并且利用铷 87 原子的里德堡能级 $50D_{5/2}$ 、 $60D_{5/2}$ 和 $70D_{5/2}$ 开展了对 1~20 GHz 微波频率的探测实验，通过与电光晶体接收机和偶极子耦合无源接收机进行对比，发现里德堡原子无线通信接收机的灵敏度与这两种典型无线接收机相当^[14]；同样在 DARPA 项目支持下，2021 年 1 月通过微波波导耦合增强和大失谐下交流 Stark 效应这两个技术手段的改进，该团队开发了基于里德堡原子的微波传感器和频谱分析仪并对 0~20 GHz 的无线电信号进行采样，实验信号包括调幅 (AM)、调频 (FM)、Wi-Fi、蓝牙以及其他通信信号，结果表明新系统能够超越传统射频传感器、接收机和频谱分析仪的灵敏度、带宽和精度极限^[21]；并于 2023 年提出了多波带通信和空分复用通信技术的新方案^[92-93]。

此外，其他国外研究团队也对基于里德堡原子的无线通信接收机开展了相关研究。2019 年，美国国家标准技术研究院和美国科罗拉多大学 Christopher L. Holloway 等人开展了相位调制方面的实验研究，通过引入一个与探测光频率极其接近的本地光信号，利用

零差探测或外差探测将 20 GHz 高频电磁波的相位探测转换为 kHz 量级的零差或外差信号的相位探测，实验证实了该方法可以较为精确地探测出电磁波的相位信息，与理论值的误差可以缩小到 0.1% 以内^[41]；并于 2022 年通过调整原子响应速率，实现了 480 i NTSC 格式彩色电视和游戏视频信号的实时接收^[65]。2021 年，美国里德堡技术公司的 Anderson 等人进行了 AM 和 FM 通信实验，实现基带 3 dB 带宽为 100 kHz，初步论证了全光电路、多波带、高灵敏度和对电磁干扰可恢复性强等特点^[60]。2018 年，新西兰奥塔哥大学 Amita B. Deb 等人尝试了无损光纤直连光电检测器的方案，并通过实验测试到信号带宽为 1 MHz，论证了通信带宽主要受限于控制光光强和原子的光学密度^[94]。2023 年，英国电信和伯明翰大学的 Marco Menchetti 等人报道了基于里德堡原子的 5 G 频率载波 (3.5 GHz) 信号通信接收技术的实验验证，通信速率达到 238 kbps^[95]。

国内相关团队在原子无线电信号接收研究方面也展开了初步的探索。2019 年，中国计量院宋振飞等人在 10.22 GHz 处开展了原子通信实验，通过探测对称或不对称的 EIT-AT 劈裂峰中心频率处的探测光场强来实现，实现了 200 MHz 以内的 500 kbps 速率的可

调带宽数字通信^[64]。同年,山西大学焦月春等人利用 16.98 GHz 载波与铷原子 $60S_{1/2}$ - $60P_{1/2}$ 跃迁共振诱导产生 EIT-AT 分裂,验证了幅度调制 AM 通信接收的可行性,信号保真度 >95%,基带带宽约为 60 kHz,动态范围约为 30 dB^[59]。2023 年,中国科学院精密测量科学与技术创新研究院刘红平等人报道了基于里德堡原子的 1.2 GHz 和 31.9 GHz 双微波场同时通信接收实验,发现两个微波场的通信质量会相互影响,并验证了多波带通信的可行性^[73]。2023 年,华南师范大学和中国科学院精密测量科学与技术创新研究院的朱诗亮和颜辉等人报道了基于里德堡原子的 8 PSK 调制方式下的 338.7 GHz 太赫兹通信实验,通信距离有望达到 18 km^[96]。

与单频静态无线电信号的测量不同,无线通信接收要求里德堡原子系统能够对快速时变的无线电信号实时跟踪响应,并在末端实现 EIT 光谱变化特征的快速读取。基于单频动态无线电信号测量的无线通信接收实验设置如图 14 所示^[61]。图 14 (a) 为两束激光对向入射与铷原子相互作用的双光子激发方案,波长分别为 780 nm 和 480 nm,对应耦合的原子能级跃迁分别为 $5S_{1/2}$ - $5P_{3/2}$ 和 $5P_{3/2}$ - $50D_{5/2}$,原子能级结构如图 14 (b) 所示。微波场载波频率是 $\omega_\mu = 17$ GHz,与原子能级跃迁 $50D_{5/2}$ - $51P_{3/2}$ 耦合,拉比频率为 Ω_μ ,同时微波场还叠加有基带信号,调制频率为 f_m ,调制方式为 8 PSK。图 14 (c) 和 (d) 为两种可选的探测光输出

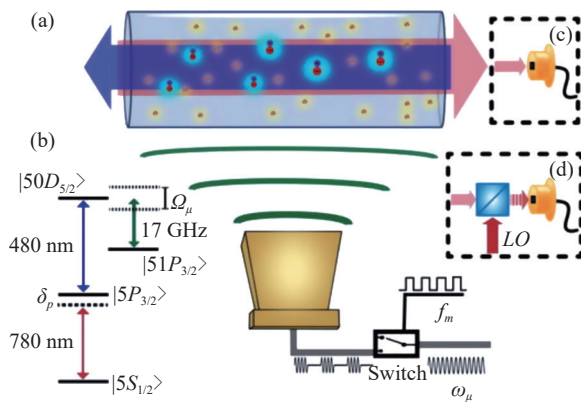


图 14 基于单频动态无线电信号测量的里德堡原子无线通信接收实验设置示意图^[61]

Fig.14 Schematic diagram of the experimental setup for Rydberg atom wireless communication receiver based on single-frequency dynamic radio signal measurement^[61]

光谱读取方式,分别是直接探测和外差探测。

基于单频动态无线电信号测量的无线通信接收光谱处理如图 15 所示。图 15 (a) 为微波场打开和关闭时的 EIT 和 EIT-AT 光谱图。通信中采用 8PSK 的微波场幅度调制,对应图 15 (b) 右上角相图中的 8 个取值。通过与微波关闭时的 EIT 谱相减,图 15 (b) 给出了其中 5 个取值时的探测光输出光谱图。 V_I 和 V_Q 分别为锁相放大器的两个输出电压,信号微波的调制相位为 $\phi_\mu = \arctan(V_Q/V_I)$ 。图 15 (c) 即为输出的相位图。

根据图 15 得到的探测光输出光谱,可以分析出

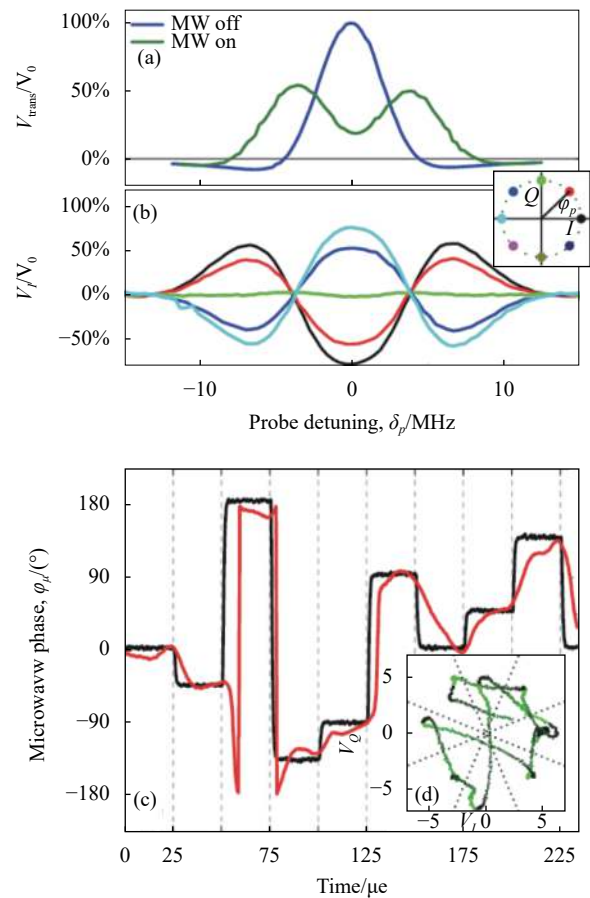


图 15 基于单频动态无线电信号测量的无线通信接收光谱处理过程^[61]。(a) EIT-AT 光谱;(b) 加上 8 PSK 调制后的光谱图;(c) 输入输出的相位对比;(d) 输出相位的轨迹图

Fig.15 Wireless communication receiver spectral processing based on single-frequency dynamic radio signal measurement^[61]。(a) EIT-AT spectrum;(b) Spectrum with 8 PSK modulation;(c) Phase comparison between input and output;(d) Trajectory of the output phase

基于单频动态无线电信号测量的无线通信的性能,其中最重要的是信道容量。估计信道容量的关键是带宽,即光电探测器输出电压或探测光输出光强变化的最小切换时间,即所谓的上升、下降时间。图 16 (a) 为探测光输出光强随信号微波调制的时域轨迹图;图 16 (b) 和图 16 (c) 分别为下降、上升时间与对应的主要影响因素的依赖关系,可以看到上升、下降时间主要受到控制光功率的制约,且下降时间存在极限;图 16 (d) 为符号速率与信道容量的关系。通过优化,

马里兰大学和美国陆军研究实验室的 David H. Meyer 等人将信道容量提高到了 8.2 Mbit/s^[61]。

通过相关研究可以发现,基于里德堡原子的无线通信接收可以通过监测探测光 EIT-AT 光谱的实时变化将载波上的中频或基带信号直接转换为光信号,实现直接解调^[61, 63-64, 70, 95],已经验证的通信方式包括幅度调制 AM^[59, 61, 97]、频率调制 FM^[21, 53, 63]、相位调制 PM^[41, 98-99] 等。

值得注意的是,与单频静态无线电信号测量时通常对探测光或控制光扫描不同,对于单频动态无线电信号,由于信号参数在快速实时变化,扫描会限制调制速率。因此在文献中,人们通常是通过固定探测光频率到某一个数值,然后通过测量该频率点上的探测光透射率的快速变化,来实现调制解调的。但是这种方法也存在缺点,特别是当同时存在多个频率的无线电信号时,探测光输出光谱会变得非常复杂,此时仅从某一个频率上的探测光透射率的变化来同时解调出多个频率无线电信号的信息就会变得非常困难,甚至不可能,这时需要采用新的方法。

2.3 多频无线电信号测量的光谱处理

里德堡原子具有丰富的能级结构,基于 EIT 效应,可以对 DC~THz 范围内几乎连续频谱的无线电信号进行共振或非共振的响应。因此,利用里德堡原子天然可以实现多频无线电信号的同时测量感知。对于多频无线电信号的测量,探测光输出光谱会变得非常复杂,如何快速有效地从中读取和分辨不同频率无线电信号的信息是一个很大的挑战,相关研究还相对较少。当前的相关研究集中在对于动态多频无线电信号,开展基于里德堡原子的通信接收验证上。

2019 年,美国国家标准技术研究院 Christopher L. Holloway 等人将铷原子和铯原子放在同一个原子泡内,并分别在各自的能级上加载 20.644 GHz(FM) 和 19.626 GHz(AM) 的无线电载波,首次实现了双频带通信接收能力,可以从 AM 和 FM 信号中实现高保真度的立体声接收,实验方案如图 17 所示^[75],其中铷原子加载 20.644 GHz 无线电信号,调制方式为 FM,激光器波长分别为 780 nm 和 480 nm;铯原子加载 19.623 GHz 无线电信号,调制方式为 AM,激光器波长为 850 nm 和 510 nm。

2022 年,美国陆军研究实验室 David H. Meyer 等

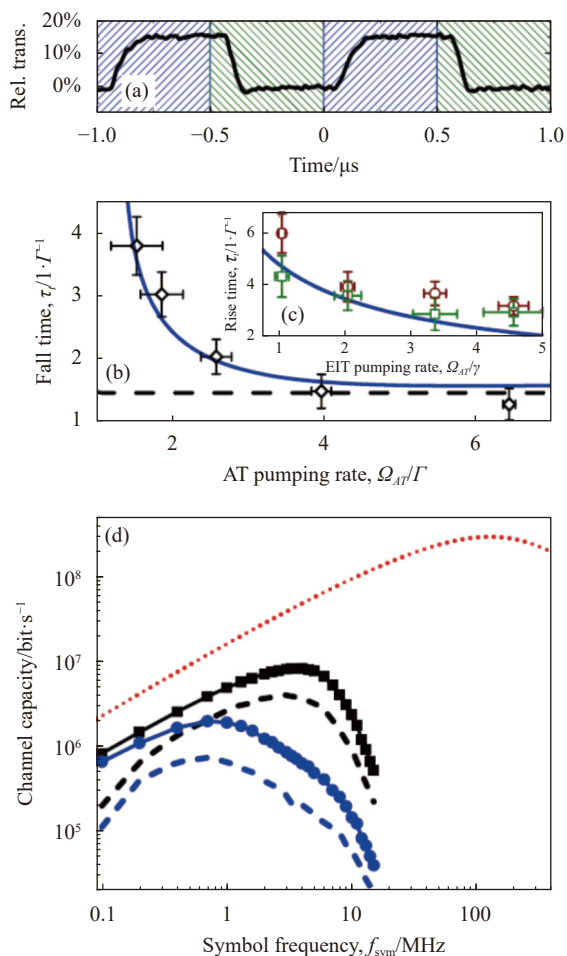


图 16 基于单频动态无线电信号测量的无线通信接收信道容量估计。(a) 通信接收时的探测光信号时域图;(b) 和 (c) 为不同泵浦速率下的上升沿和下降沿;(d) 信道容量与采样速率的关系^[61]

Fig.16 Wireless communication receiver channel capacity estimation based on single-frequency dynamic radio signal measurement. (a) Time-domain plot of the detected optical signal during communication reception; (b) and (c) Rising and falling edges at different pump rates; (d) Relationship between channel capacity and sampling rate^[61]

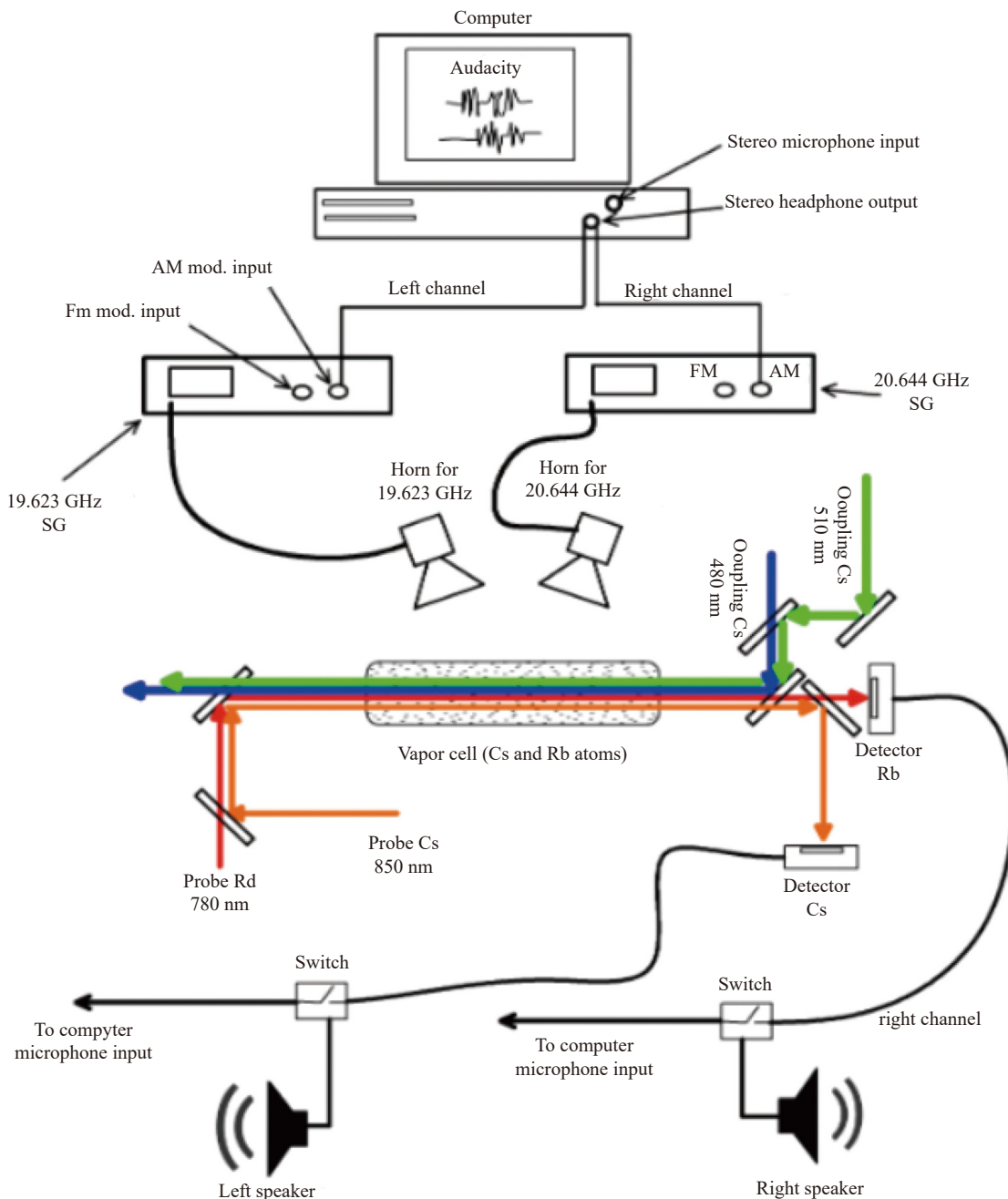


图 17 双频带通信接收实验方案示意图^[75]

Fig.17 Schematic diagram of the dual-band communication reception experiment^[75]

人基于里德堡原子的无线电光学测量技术, 报道了对几乎跨越 6 个八度 (1.7~116 GHz) 的 1.72、12.11、27.42、65.11、115.75 GHz 等 5 个无线电信号同时测量和解调的实验进展, 实验中展示了每个频率的相位和幅度的连续恢复, 并报告了该系统在多频段检测方面的灵敏度和带宽能力^[92]。实验设置如图 18 所示, 图 18(a) 为能级结构设置, 在前 3 个能级构成探测光 EIT 光谱的基础上, 叠加 5 个不同波长的无线电信号 (5 个信号

微波场由同一个喇叭天线叠加发射, 并搭配 4 个不同的本地强场, 由 4 个喇叭天线发射), 分别与 EIT 效应中的里德堡态 $56D_{5/2}$ 和另外 4 个不同的里德堡态 $59P_{3/2}$ 、 $57P_{3/2}$ 、 $54F_{7/2}$ 、 $52F_{7/2}$ 发生电偶极耦合, 其中第 5 个无线电信号 1.72 GHz 相对共振里德堡态 $57P_{3/2}$ 远失谐至 -10.287 GHz; 图 18(b) 为设备配置, 5 个喇叭共发射出 5 个信号无线电, 光探测方式为平衡零差探测; 图 18(c) 为该探测方式中相位分量的 EIT 光谱图。

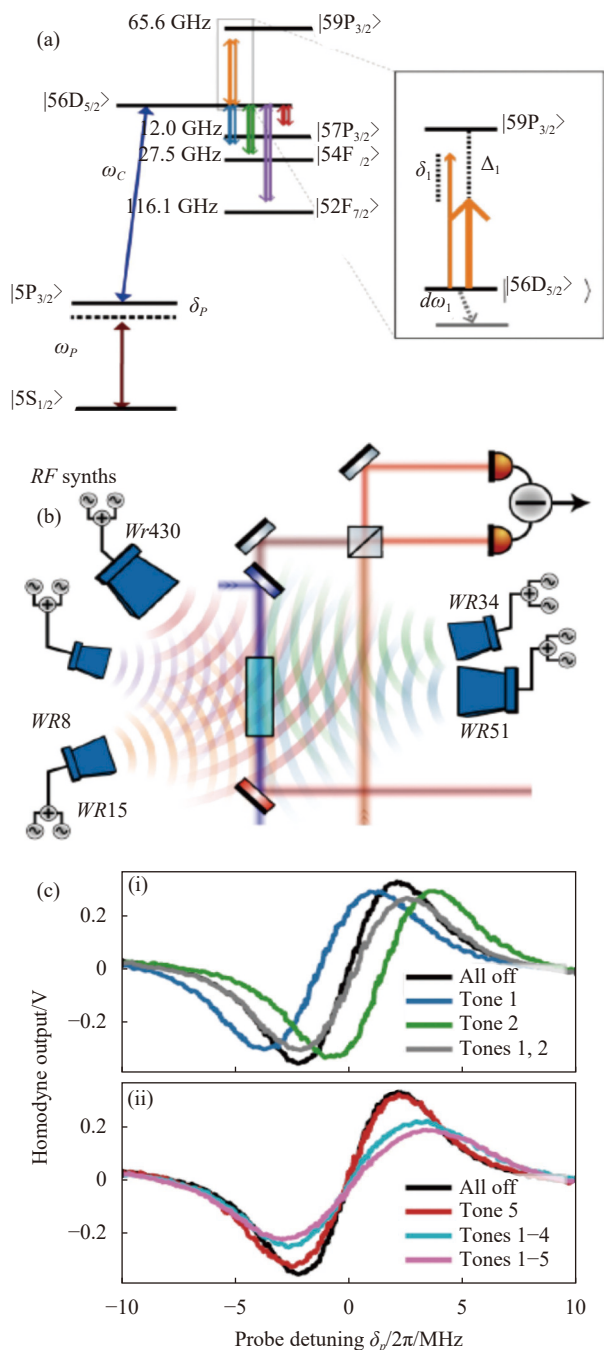


图 18 基于里德堡原子的 5 个无线电信号同时测量实验设置^[92]。

(a) 能级结构; (b) 设备配置; (c) EIT 光谱

Fig.18 Experimental setup for simultaneously measuring five microwave fields based on Rydberg atoms^[92]. (a) Energy level structure; (b) Equipment configuration; (c) EIT spectrum

根据图 18 所示, EIT 光谱对无线电信号最灵敏的频点位于谐振频率处, 在该探测光频率处, 5 个无线电信号同时解调得到的输出光强时域图如图 19 所示, 图 19(a) 为总的光电探测器输出信号的时域图以

及恢复出来的 5 个无线电信号的幅度 (蓝色曲线) 和相位 (红色曲线) 时域图, 需要注意的是幅度都是恒定值, 而在相位上, 对 1、2、5 这三个无线电信号分别加载了 205、110、100 Hz 的调制; 图 19(b) 为图 19(a) 的快速傅里叶变换 (FFT), 分辨率设为 1 Hz, 图 (ii) 为图 (i) 的局部放大。

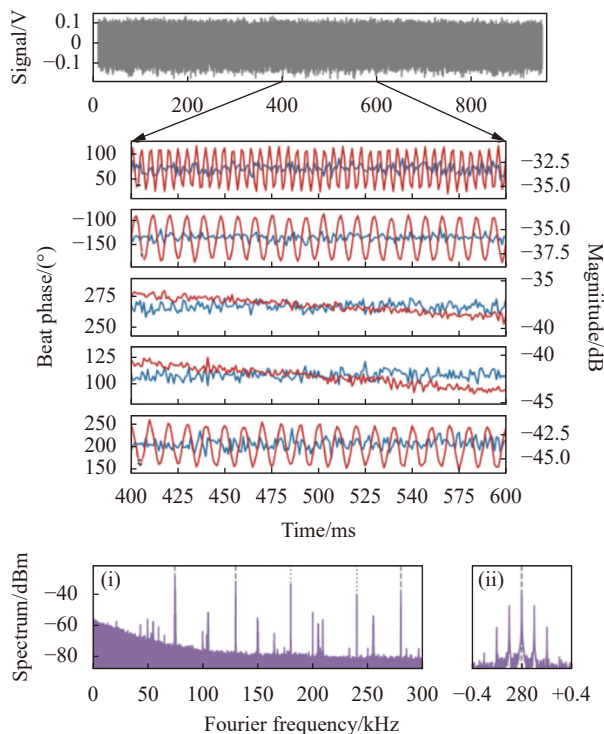


图 19 基于里德堡原子的 5 个无线电信号同时测量信号恢复过程^[92]

Fig.19 Simultaneous amplitude and phase recovery for five microwave fields based on Rydberg atoms^[92]

基于里德堡原子的多波带无线电接收机总容量由基带瞬时带宽决定^[61], 对 EIT 输出光谱通过频谱分析仪得到的结果如图 20 所示, 图 20(a) 和图 20(b) 为不同基带频率下的功率谱, 图 20(c) 中, 文中通过传输具有固定幅度和变化频率的傅里叶分量的射频来直接测量带宽, 即通过改变第 2 个信号频率的相位调制频率来实现, 再利用双极低通滤波器对数据进行拟合, 可得其 3 dB 带宽为 6.11(16) MHz。

原则上可同时测量的拍频数量取决于带宽和测量的分辨率带宽, 比如在此处以 10 kHz 间隔输出拍频信号, 6.1 MHz 带宽名义上可以允许 610 个拍频信号。通过参数优化, David H. Meyer 等人最终实现各通道通信速率在 4~40 kbit/s 情况下, 误码率均保持在

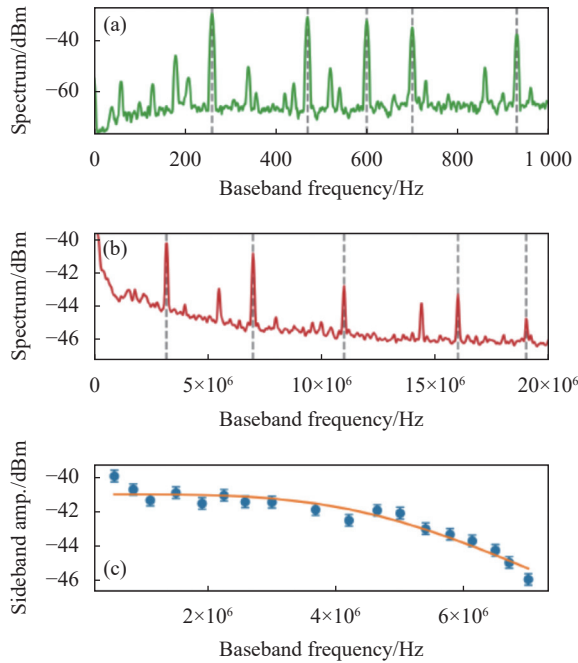


图 20 基于里德堡原子的 5 个无线电信号同时测量的 EIT 输出光谱频谱分析^[92]

Fig.20 Spectrum and bandwidth analysis of EIT output for simultaneous multiband measurement of five radio-frequency signals based on Rydberg atoms^[92]

$10^{-3} \sim 10^{-5}$ 的水平,证实了利用里德堡原子同时实现超宽带频谱范围内(跨越 1.7~116 GHz)多频率同时通信的可行性。

此外,针对多频无线电信号同时注入时探测光输出光谱非常复杂,读取有效信息困难的问题,中国科学技术大学郭光灿等人于 2022 年将里德堡原子与深度学习模型结合来解决干扰环境下的多频无线电信

号电场识别问题^[100]。

实验设置如图 21 所示。图 21(a) 为铷原子能级结构设置,特别是与两个里德堡能级 $51D_{3/2}$ 和 $50F_{5/2}$ 耦合的四路频分复用(Frequency-division multiplexing, FDM)无线电信号:

$$E = A_1 \cos[(\omega_0 + \omega_1)t + \varphi_1] + A_2 \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + \varphi_2] + A_3 \cos[(\omega_0 + \omega_3)t + \varphi_3] + A_4 \cos[(\omega_0 + \omega_4)t + \varphi_4] \quad (7)$$

式中: $2\pi\omega_0 = 17.62$ GHz 为共振频率。输入无线电信号的频率分别为:

$$\begin{aligned} 2\pi(\omega_0 + \omega_1) &= 17.62 \text{ GHz} - 3 \text{ kHz} \\ 2\pi(\omega_0 + \omega_2) &= 17.62 \text{ GHz} - 1 \text{ kHz} \\ 2\pi(\omega_0 + \omega_3) &= 17.62 \text{ GHz} + 1 \text{ kHz} \\ 2\pi(\omega_0 + \omega_4) &= 17.62 \text{ GHz} + 3 \text{ kHz} \end{aligned}$$

式中: 相邻频率间隔为 2 kHz, 各路无线电信号的幅度、频率和相位均可独立调控。相位矢量 $(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4)$ 表示某一时刻的信息比特串, 其中 $\varphi_4 = 0, \varphi_{1,2,3} = 0/\pi$ 代表二进制比特 0/1。通过随时间变化 $\varphi_{1,2,3}$ 的相位, 即可获得二进制相移键控(binary phase-shift keying, 2 PSK) 调制的 FDM 信号。

实验中, 信号受到的干扰来自环境和原子碰撞。由于原子对外场非常敏感, 导致信号被噪声淹没, 因此笔者采用深度学习模型来提取相对相位信息 $(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$ 。实验方案如图 21(b) 所示, FDM 无线电信号经由一个喇叭天线垂直于探测光光路辐射入原子泡内, 探测光的参考光信号(与耦合光不重合)与 EIT

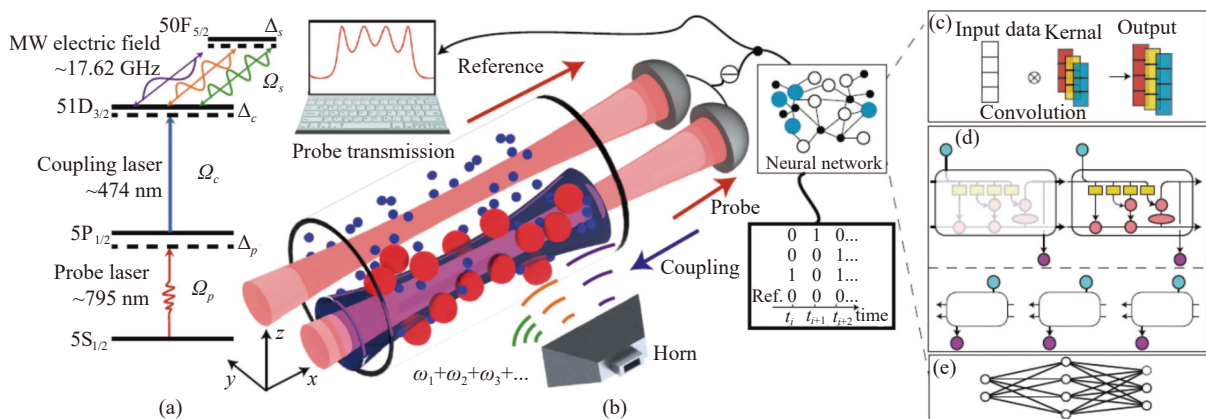


图 21 基于深度学习的里德堡原子多频无线电信号光学测量及通信演示实验设置^[100]

Fig.21 Experimental setup for optical measuring multifrequency radio signals and communication demonstration using deep learning model based on Rydberg atoms^[100]

信号(与耦合光重合)通过差分方式由光电探测器探测,最终形成的探测光输出光谱如左上角插图所示,该光谱信息直接输入到经过良好训练的神经网络中,以恢复出随时间变化的相位信息($\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$)。该神经网络由一维卷积层(图(c))、双向长短期记忆层(图(d))和密集层(图(e))组成。通过强化训练,对于4路FDM信号,信息恢复准确度可达到99.38%,优于Lindblad主方程,如图22所示。

笔者还通过测试证明,深度学习模型除了对噪声的鲁棒性之外,还具有良好的可扩展性。特别是当通过增加频分复用的信道数量或信道间频率间隔来提升数据传输速率时,深度学习模型仍然表现良好,而主方程难以准确地识别和恢复信息,如图23所示。其中图23(a)、(b)、(e)为频分复用信道数量增加到20时(频率间隔为2 kHz)的深度学习模型和Lindblad主方程两种方法的信息恢复保真度对比,可以看到在经过78轮之后,深度学习的保真度达到了100%(如图23(b)所示),优于主方程的20.63%(如图23(e)所示);图23(c)、(d)、(f)为4路频分复用下将频率间隔

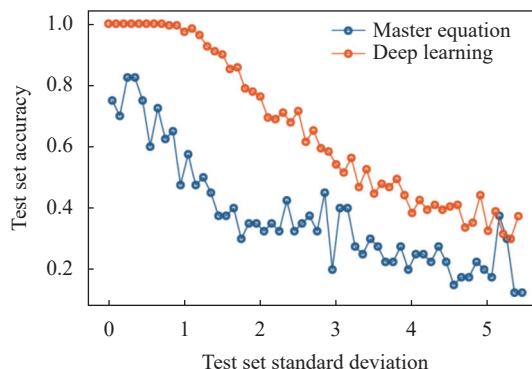


图 22 针对里德堡原子多频无线电信号光学测量,深度学习模型和 Lindblad 主方程在含噪声测试集上的输入输出预测保真度比较^[100]

Fig.22 Comparison of input-output prediction accuracy on noisy test sets between the deep learning model and the Lindblad master equation for optical measurement of multifrequency radio signals based on Rydberg atoms^[100]

增加到 200 kHz 时两种方法的信息恢复保真度对比,可以看到在经过 83 轮之后,深度学习的保真度达到了 98.83%(如图 23(d) 所示),优于主方程的 60.00%(如

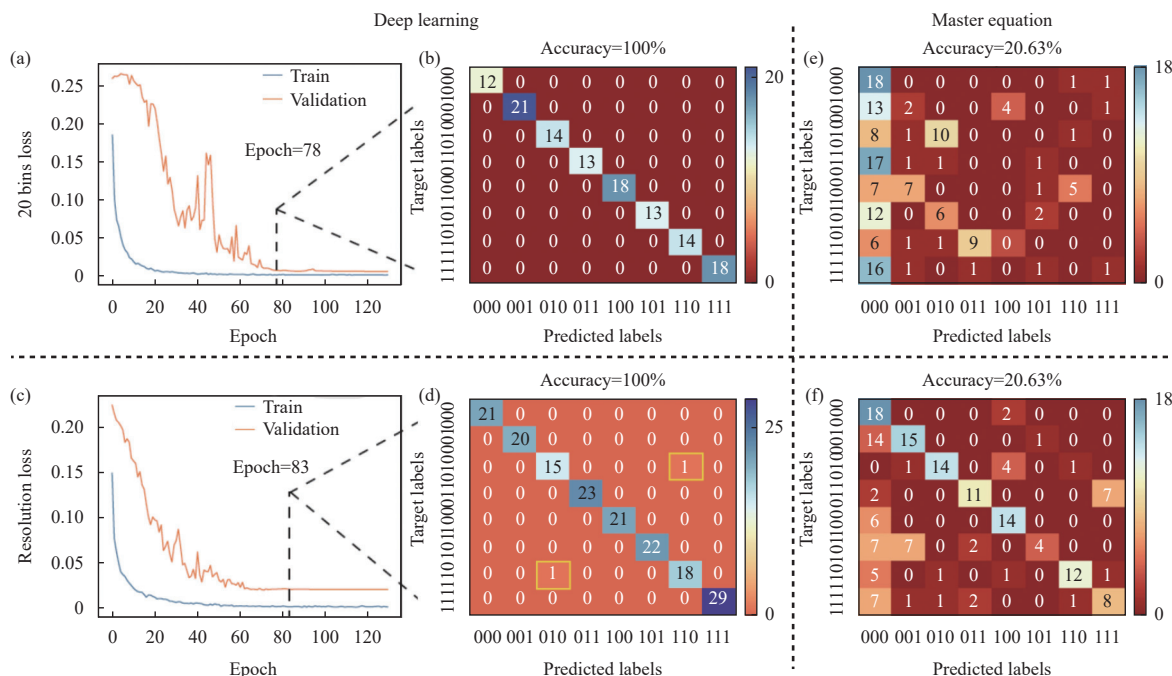


图 23 在增加频分复用的信道数量或信道间频率间隔来提升数据传输速率时,深度学习模型和 Lindblad 主方程两种探测光输出光谱处理方法的信息恢复效果对比^[100]

Fig.23 Comparison of the information recovery effects between the deep learning model and the Lindblad master equation-based probe laser output spectrum processing methods when increasing the number of frequency division multiplexing channels or the frequency interval between channels to improve data transmission rate^[100]

图 23(f) 所示)。

最后, 中国科学技术大学郭光灿等人证实了深度学习模型在用于里德堡原子多频无线电信号光学测量时, 可以充分利用里德堡原子的高灵敏度特性并能显著降低噪声影响, 不需要求解 Linblad 主方程来分析探测光 EIT 输出光谱, 且比主方程方法保真度更高, 接近 100%, 原理上验证了这种基于深度学习增强的里德堡原子接收机允许直接解码频分复用信号。

总之, 对于多频无线电信号的光谱处理方式, 需要根据实际情况进行调整。一种方式是利用多谐波里德堡原子能级结构, 通过在前端精细调整和优化激光和电场的频率和强度等参数, 实现对多频无线电信号的测量^[73, 75, 92]; 另一种方式是在后端, 利用深度学习等光谱分析技术, 将多个光谱的信息进行分离和提取, 从而得到多个频率的光谱信息^[100]。

3 总结与展望

基于里德堡原子的光学测量具有广泛的适用场景和独特的量子优势, 文中首先介绍了不同强度的单频静态无线电信号的光学测量及其光谱处理, 在该场景中, 里德堡原子接收机已经在灵敏度、频谱范围、最小场强等方面大幅超越传统接收机。然后介绍了单频动态无线电信号的光学测量、光谱处理以及通信过程的实现, 在该场景中, 通信的速率、误码率等关键指标, 相较于传统接收机还有待进一步提升。最后介绍了多频无线电信号的光学测量及其光谱处理技术, 在该场景中, 充分展现了里德堡原子天然的超宽带特性, 但由于多波之间相互干扰, 使得光谱识别难度增大, 相关研究还较少, 亟需进一步加深研究。

结合当前国内外研究现状, 为进一步推进实用化, 基于里德堡原子的无线电光学测量技术还需从以下 3 个方面进一步研究和完善:

(1) 结合其他相关技术, 进一步提高里德堡原子对无线电接收的性能指标, 特别是通信速率指标仍然远远落后于成熟的商用天线。比如结合频率梳^[33, 101]提高场强和频率的测量精度; 结合频分复用、空分复用等技术^[73, 92-93]提高通信速率等。

(2) 针对实际应用场景下的复杂电磁环境, 开发适用于里德堡原子无线电光学测量的抗干扰技术。比如针对里德堡原子超宽响应频谱的特点, 开发跳扩

频技术^[102-103]; 基于深度学习^[100]提高光谱特征识别能力; 针对里德堡原子系统的特点, 开展专门的抗干扰波形设计研究等。

(3) 从实用角度开展里德堡原子无线电接收机的小型化、集成化研究。特别是尽管原子泡尺寸与无线电信号波长无关, 但当前的实验系统对于激光系统的要求很高, 需要优化设计。比如开展 480 nm 或 510 nm 激光器的小型化研究^[104-105]推进三光子激发方案的研究^[37, 46, 73], 加强光路光纤化的研究^[94, 106-107]、原子阵列的研究^[108]等。

综上, 基于里德堡原子的无线电光学测量技术具有广阔的发展前景, 在未来的发展中, 笔者课题组需要持续地进行技术创新和优化, 充分发挥里德堡原子的独特量子优势, 不断提高性能指标, 降低成本, 尽早实现应用。

参考文献:

- [1] Krelina M. Quantum technology for military applications [J]. *EPJ Quantum Technology*, 2021, 8(1): 24.
- [2] 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.
- [3] Kanda M. Standard probes for electromagnetic field measurements [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1993, 41: 1349-1364.
- [4] Tishchenko V A, Tokatly V I, Luk'yanov V I. Upgrading radio-frequency electromagnetic field standards. Part 1 [J]. *Measurement Techniques*, 2003, 46(8): 796-801.
- [5] Tishchenko V A, Tokatly V I, Luk'yanov V I. Upgrading radiofrequency electromagnetic field standards. Part 2 [J]. *Measurement Techniques*, 2003, 46(9): 903-911.
- [6] Duvillaret L, Rialland S, Coutaz J. Electro-optic sensors for electric field measurements. I. Theoretical comparison among different modulation techniques [J]. *Journal of the Optical Society of America B Optical Physics*, 2002, 19: 2692-2703.
- [7] Bernier M, Gaborit G, Duvillaret L, et al. Electric field and temperature measurement using ultra wide bandwidth pigtailed electro-optic probes [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(13): 2470.
- [8] Gaeremynck Y, Gaborit G E L, Duvillaret L, et al. Two electric-field components measurement using a 2-port pigtailed electro-optic sensor [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(14):

- 141102.
- [9] Dolmatov T V, Bukin V V, Garnov S V, et al. Ultra-wideband electric field measurement system using cdte-based dielectric fiber tip sensor [J]. *Physics - Doklady*, 2022, 67: 63-66.
- [10] Yang K, David G, Robertson S V, et al. Electrooptic mapping of near-field distributions in integrated microwave circuits [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques*, 1998, 46: 2338-2343.
- [11] Chen J R, Huang X G, Zhu M L, et al. Key metrics analysis of rydberg microwave receivers: 2021 photonics & electromagnetics research symposium (PIERS 2021)[C]/Photonics and Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 2021.
- [12] Chu L J. Physical limitations of omni-directional antennas [J]. *Journal of Applied Physics*, 1948, 19(12): 1163-1175.
- [13] Harrington R F. Effect of antenna size on gain, bandwidth and efficiency [J]. *J Res Natl Bur Stand Sect D*, 1960, 64: 1-12.
- [14] 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 Physics*, 2020, 53: 34001.
- [15] 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: 819-824.
- [16] Gallagher T F. Rydberg Atoms[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [17] 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.
- [18] Fleischhauer M, Imamoglu A, Marangos J P. Electromagnetically induced transparency: Optics in coherent media [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2005, 77: 633-673.
- [19] Bao S, Zhang H, Zhou J, et al. Polarization spectra of Zeeman sublevels in Rydberg electromagnetically induced transparency [J]. *Physical Review A*, 2016, 94(4): 43822.
- [20] Jing M, Hu Y, Ma J, et al. Atomic superheterodyne receiver based on microwave-dressed Rydberg spectroscopy [J]. *Nature Physics*, 2020, 16(9): 911-915.
- [21] 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): 14053.
- [22] 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: 6169-6182.
- [23] Adams C S, Pritchard J D, Shaffer J P. Rydberg atom quantum technologies [J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2020, 53(1): 12002.
- [24] 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.
- [25] Fleischhauer M, Rathe U, Scully M O. Phase-noise squeezing in electromagnetically induced transparency [J]. *Physics Review A*, 1992, 46(9): 5856-5859.
- [26] Müller H, Chiow S, Herrmann S, et al. Atom-interferometry tests of the isotropy of post-newtonian gravity [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100: 31101.
- [27] Higgins B L, Berry D W, Bartlett S D, et al. Demonstrating Heisenberg-limited unambiguous phase estimation without adaptive measurements [J]. *New Journal of Physics*, 2009, 11(7): 73023.
- [28] 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(6): 65015.
- [29] 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): 45030.
- [30] Simons M T, Artusio-glimpse A B, Holloway C L, et al. Continuous radio-frequency electric-field detection through adjacent Rydberg resonance tuning [J]. *Physical Review A*, 2021, 104(3): 32824.
- [31] Anderson D A, Raithel G. Continuous-frequency measurements of high-intensity microwave electric fields with atomic vapor cells. [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(5): 1-5.
- [32] Hu J, Li H, Song R, et al. Continuously tunable radio frequency electrometry with Rydberg atoms [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 121(1): 14002.
- [33] Zhang L, Liu Z, Liu B, et al. Rydberg microwave-frequency-comb spectrometer [J]. *Physical Review Applied*, 2022, 18(1): 14033.
- [34] Liao K, Zhang Z, Tu H, et al. Continuous-frequency microwave heterodyne detection in an atomic vapor cell [J]. *Physical Review Applied*, 2022, 18(5): 54003.
- [35] Liao K, Tu H, Yang S, et al. Microwave electrometry via electromagnetically induced absorption in cold Rydberg atoms [J]. *Physical Review A*, 2020, 101(5): 53432.

- [36] Jia F, Liu X, 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): 63113.
- [37] Thaicharoen N, Moore K R, Anderson D A, et al. Electromagnetically induced transparency, absorption, and microwave-field sensing in a Rb vapor cell with a three-color all-infrared laser system [J]. *Physics Review A*, 2019, 100(6): 63427.
- [38] 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(8): 94101.
- [39] Jiao Y, Hao L, Han X, et al. Atom-based radio-frequency field calibration and polarization measurement using cesium $n D_j$ floquet states [J]. *Physical Review Applied*, 2017, 8(1): 14028.
- [40] 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: 63001.
- [41] 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.
- [42] 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: 44020.
- [43] Robinson A K, Prajapati N, Senic D, et al. Determining the angle-of-arrival of a radio-frequency source with a Rydberg atom-based sensor [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118: 114001.
- [44] 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.
- [45] Kumar S, Fan H, Kübler H, et al. Atom-based sensing of weak radio frequency electric fields using homodyne readout [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 42981.
- [46] Prajapati N, Bhusal N, Rotunno A P, et al. Sensitivity Comparison of Two-photon vs Three-photon Rydberg Electrometry [J]. *arXiv*, 2022: 2211.11848.
- [47] 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): 34401.
- [48] 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.
- [49] Jau Y, Carter T. Vapor-cell-based atomic electrometry for detection frequencies below 1 kHz [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(5): 54034.
- [50] Shaffer J P, Kübler H. A read-out enhancement for microwave electric field sensing with Rydberg atoms [C]//Proceedings of the SPIE, 2018, 10674: 106740C.
- [51] Fan H, Kumar S, Sedlacek J, et al. Atom based RF electric field sensing [J]. *Journal of Physics B Atomic Molecular Physics*, 2015, 48: 202001.
- [52] 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 Physics*, 2016, 49: 104004.
- [53] Kumar S, Fan H, Kübler H, et al. Rydberg-atom based radio-frequency electrometry using frequency modulation spectroscopy in room temperature vapor cells [J]. *Optics Express*, 2017, 25: 8625.
- [54] 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]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121(23): 233106.
- [55] 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.
- [56] Bohachuk S M, Booth D, Nickerson K, et al. Origins of Rydberg-atom electrometer transient response and its impact on radio-frequency pulse sensing [J]. *Physical Review Applied*, 2022, 18(3): 34030.
- [57] Liu B, Zhang L, Liu Z, et al. Highly sensitive measurement of a megahertz rf electric field with a Rydberg-atom sensor [J]. *Physical Review Applied*, 2022, 18(1): 14045.
- [58] Zou H, Song Z, Mu H, et al. Atomic receiver by utilizing multiple radio-frequency coupling at Rydberg states of rubidium [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(4): 1346.
- [59] Jiao Y, Han X, Fan J, et al. Atom-based receiver for amplitude-modulated baseband signals in high-frequency radio

- communication [J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(12): 126002.
- [60] 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: 2455-2462.
- [61] Meyer D H, Cox K C, Fatemi F K, et al. Digital communication with Rydberg atoms and amplitude-modulated microwave fields [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(21): 211108.
- [62] Fancher C T, Scherer D R, John M C S, et al. Rydberg atom electric field sensors for communications and sensing [J]. *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, 2021, 2(2): 1-13.
- [63] Anderson D A, Sapiro R E, Raithel G. Rydberg atoms for radio-frequency communications and sensing: Atomic receivers for pulsed RF field and phase detection [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2020, 35(4): 48-56.
- [64] Song Z, Liu H, Liu X, et al. Rydberg-atom-based digital communication using a continuously tunable radio-frequency carrier [J]. *Optics Express*, 2019, 27: 8848.
- [65] Prajapati N, Rotunno A P, Berweger S, et al. TV and video game streaming with a quantum receiver: A study on a Rydberg atom-based receiver's bandwidth and reception clarity [J]. *AVS Quantum Science*, 2022, 4(3): 35001.
- [66] 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: 11027.
- [67] 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.
- [68] Fan H Q, Kumar S, Daschner R, et al. Subwavelength microwave electric-field imaging using Rydberg atoms inside atomic vapor cells [J]. *Optics Letters*, 2014, 39: 3030.
- [69] Kitching J, Knappe S, Donley E A. Atomic sensors – A review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(9): 1749-1758.
- [70] Simons M T, Artusio-glimpse A B, Robinson A K, et al. Rydberg atom-based sensors for radio-frequency electric field metrology, sensing, and communications [J]. *Measurement: Sensors*, 2021, 18: 100273.
- [71] Fahey D P, Noel M W. Excitation of Rydberg states in rubidium with near infrared diode lasers [J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 17002-17012.
- [72] Johnson L A M, Majeed H O, Varcoe B T H. A three-step laser stabilization scheme for excitation to Rydberg levels in ⁸⁵Rb [J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2012, 106(2): 257-260.
- [73] You S, Cai M, Zhang H, et al. Exclusive effect in Rydberg atom-based multi-band microwave communication [J]. *Photonics*, 2023, 10(3): 328.
- [74] 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(2): 24104.
- [75] 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.
- [76] Brekke E G. Stimulated emission studies of ultracold Rydberg atoms[D]. US: The University of Wisconsin - Madison, 2009.
- [77] Meyer D H. Magnetic & Electric field sensing and applications based on coherent effects in neutral atoms[D]. US: University of Maryland, College Park, 2018.
- [78] Sedlacek J A, Kim E, Rittenhouse S T, et al. Electric field cancellation on quartz by Rb adsorbate-induced negative electron affinity [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(13): 133201.
- [79] Becerra F E, Willis R T, Rolston S L, et al. Two-photon dichroic atomic vapor laser lock using electromagnetically induced transparency and absorption [J]. *Journal of the Optical Society of America B Optical Physics*, 2009, 26(7): 1315.
- [80] 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.
- [81] Anderson D A, Miller S A, Raithel G, et al. Optical measurements of strong microwave fields with Rydberg atoms in a vapor cell [J]. *Physical Review Applied*, 2016, 5: 34003.
- [82] Paradis E, Raithel G, Anderson D A. Atomic measurements of high-intensity VHF-band radio-frequency fields with a Rydberg vapor-cell detector [J]. *Physics Review A*, 2019, 100(1): 13420.
- [83] Shi J, Zhang F, De B, et al. Photonic-assisted single system for microwave frequency and phase noise measurement [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(9): 92501.
- [84] Hao J, Jia F, Cui Y, et al. Microwave electrometry with

- Rydberg atoms in a vapor cell using microwave amplitude modulation [J]. *arXiv*, 2023: 2304.09316.
- [85] Ding D, Liu Z, Shi B, et al. Enhanced metrology at the critical point of a many-body Rydberg atomic system [J]. *Nature Physics*, 2022, 18(12): 1447-1452.
- [86] Berman P R, Malinovsky V S. Principles of laser spectroscopy and quantum optics[M]. US: Princeton University Press, 2011.
- [87] Benford J, Swegle J A, Schamiloglu E. High Power microwaves[M]. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [88] Hill D A, Kanda M, Larsen E B, et al. Generating standard reference electromagnetic fields in the NIST anechoic chamber, 0.2 to 40 GHz[R]. NIST Technical Note, 1990.
- [89] Matloubi K. Instrumentation and measurement technology conference: 1993. IMTC/93. conference record[C]//Piscataway, 1993.
- [90] Whitley R M, Stroud C R. Double optical resonance [J]. *Physical Review A*, 1976, 14: 1498-1513.
- [91] Miller S A, Anderson D A, Raithel G. Radio-frequency-modulated Rydberg states in a vapor cell [J]. *New Journal of Physics*, 2016, 18(5): 53017.
- [92] Hill J C, Kunz P D, Cox K C, et al. Simultaneous multiband demodulation using a Rydberg atomic sensor [J]. *Physical Review Applied*, 2023, 19(1): 14025.
- [93] Knarr S H, Bucklew V G, Langston J, et al. Spatiotemporal multiplexed Rydberg receiver [J]. *arXiv*, 2023: 2302.07316.
- [94] Deb A B, Kjærgaard N. Radio-over-fiber using an optical antenna based on Rydberg states of atoms [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(21): 211106.
- [95] 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(1): 14401.
- [96] Lin Y, She Z, Chen Z, et al. Terahertz receiver based on room-temperature Rydberg-atoms[EB/OL]. (2022-05-23)[2023-04-23]. <https://arxiv.org/abs/2205.11021>.
- [97] Li S, Yuan J, Wang L. Improvement of microwave electric field measurement sensitivity via Multi-carrier modulation in rydberg atoms [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(22): 8110.
- [98] 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.
- [99] 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.
- [100] Liu Z, Zhang L, Liu B, et al. Deep learning enhanced Rydberg multifrequency microwave recognition [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 1997.
- [101] Nickerson K, Booth D W, Shaffer J P, et al. Rydberg-atom-based electrometry using a self-heterodyne frequency-comb readout and preparation scheme [J]. *Physical Review Applied*, 2023, 19(3): 34078.
- [102] Baxter W, Aboutanios E, Hassanien A. Joint radar and communications for frequency-hopped MIMO systems [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2022, 70: 729-742.
- [103] Azim A W, Bazzi A, Shubair R, et al. Dual-mode chirp spread spectrum modulation [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(9): 1995-1999.
- [104] Musideke M, Jianquan Y, Peng W. Laser diode-end-pumped Nd: YAG/LBO laser operating at 946 nm/473 nm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 11(42): 2931-2934. (in Chinese)
- [105] Wei H, Xiang Z, Baiqin Z. Design of miniaturized transmitting-receiving system for laser detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 9(46): 0906008. (in Chinese)
- [106] Holloway C L, Simons M T, Kautz M, et al. Development and applications of a fiber-coupled atom-based electric field probe: 2018 international symposium on electromagnetic compatibility (EMC EUROPE)[C]//IEEE, 2018.
- [107] 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: 6456.
- [108] Otto J S, Hunter M K, Kjærgaard N, et al. Data capacity scaling of a distributed Rydberg atomic receiver array [J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 129: 154503.

Rydberg atomic radio-optical measurement and spectrum processing techniques (*invited*)

Wu Jinyun, Yang Jian*, Gao Weichao*, Zhang Yinfan*

(College of Information and Communication, National University of Defense Technology, Wuhan 430033, China)

Abstract:

Significance Rydberg atoms are highly excited atoms with large electric dipole moments. The energy difference between adjacent levels can cover an ultra-wide frequency spectrum range from DC to THz, making it possible to achieve high-sensitivity and ultra-wideband reception of electromagnetic fields. Radio-optical measurements based on Rydberg atoms are achieved by precisely controlling two laser beams, the probe laser and the control laser, to transform ground state alkali metal atoms into Rydberg atoms and induce Electromagnetic Induced Transparency (EIT) in the transmitted spectrum of the probe laser. Under the interaction of the input radio signal, Autler-Townes (AT) splitting occurs in the transparent EIT spectrum, completing the conversion of radio signals to optical signals (Fig.2-3), thereby extracting information such as frequency, amplitude, and phase of the radio signal. This technology has attracted great attention in electronic information fields such as electric field metrology, electromagnetic spectrum detection, communication, and radar in recent years. The physical implementation of this technology is simple and does not require strict physical conditions as usual quantum technologies such as single-photon sources or ultra-cold and superconducting conditions. It can be achieved at room temperature without being limited by the level of production technology. It is considered one of the fastest applicable quantum technologies with its high stability, accuracy, and repeatability that could partially replace existing radio reception technologies in the near future.

Progress In the past decade, researchers have made significant progress in the study of radio-optical measurement techniques based on Rydberg atoms, from precise measurements of single-frequency static radio signals in electric field metrology applications to real-time reception of single-frequency dynamic radio signals in communication applications, and to spectrum detection and communication reception of complex multi-frequency radio signals. The key to this technology is how to quickly and accurately extract information about the radio signal from the output EIT spectrum of the atomic system. Different types of radio signals, such as static, dynamic, single-frequency, and multi-frequency radio signals, require different information extraction and spectral processing methods, as well as different experimental designs and implementations. For single-frequency static radio signals, researchers have already used Rydberg atoms in experiments to measure field strengths in the 0-320 GHz frequency range with a maximum coverage range of $780 \text{ pV} \cdot \text{cm}^{-1}$ to $50 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$. By using heterodyne technology (Fig.8) and critical phenomena in many-body Rydberg atomic system, the current sensitivity can reach as low as $49 \text{ nV} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$. Unlike measuring single-frequency static radio signals, for single-frequency dynamic radio signals, Rydberg atom systems are required to track and respond to rapidly changing radio signals in real-time and quickly read EIT spectral changes at the end point. Its primary application scenario is the communication reception. Since 2018, a large number of verification experiments on wireless communication reception principle have been carried out based on Rydberg atoms. This technology can directly convert intermediate frequency or

baseband signals on the carrier into optical signals for direct demodulation. Verified communication methods include amplitude modulation (AM), frequency modulation (FM), and phase modulation (PM). When the input wireless signal becomes complex, especially for multi-frequency wireless signal input, the output EIT spectrum of the probe laser will become complicated. It will be a big challenge to quickly and effectively read and distinguish information from different frequency wireless signals. Currently, a small amount of research is focused on verifying dynamic multi-frequency wireless signals for communication reception, including using multi-harmonic Rydberg atomic level structures to finely adjust and optimize system parameters at the front end or using post-processing techniques such as deep learning at the back end to achieve recognition and reading of multiple frequency information. People have experimentally achieved simultaneous reception of five completely different frequency signals within a spectrum range of over 100 GHz (Fig.18) or 20 similar frequency signals within a range of 100 kHz (Fig.23).

Conclusions and Prospects Through continuous research over the past 10 years, it has been experimentally verified that radio-optical measurements based on Rydberg atoms have unique quantum advantages in spectrum range, sensitivity, minimum field strength, signal demodulation mechanism, and other aspects. This technology has demonstrated promising prospects in applications such as electric field metrology, electromagnetic spectrum detection, communication, radar, and more. In order to further develop this technology to fully leverage the unique quantum advantages of Rydberg atoms and achieve practical applications as soon as possible, researchers need to deepen their research on the comprehensive performance improvement, anti-interference ability enhancement, miniaturization integration and simultaneously reduce the costs of radio-optical measurements based on Rydberg atoms.

Key words: Rydberg atoms; electromagnetically induced transparency; radio; optical measurement; spectrum processing

Funding projects: Chinese Postdoctoral Science Foundation (2021MD703982, 2022T150784); Research Plan of College of Information and Communication, National University of Defense Technology (ZZKY-2022-03-001, YJKT-RC-2112)