

综述

## 基于里德伯原子的通信接收机进展\*

蔡亚芬<sup>1)2)</sup> 孔祥燕<sup>1)2)†</sup>

1) (宁波大学信息科学与工程学院, 宁波 315211)

2) (宁波大学未来无线研究院, 宁波 315211)

(2025 年 10 月 27 日收到; 2026 年 2 月 6 日收到修改稿)

基于里德伯原子的微波电场传感器在过去的 10 年间迅速发展. 里德伯原子电场传感器具有超高灵敏度和自校准能力, 已被证明是微波通信的优秀量子接收系统. 里德伯原子接收机具有以下几个优势: 非金属的原子探头不会干扰待测场, 可以实现非破坏通信; 里德伯原子传感器将高频微波转化为光谱探测, 微波调制直接映射到原子光谱, 因此里德伯原子接收机无需解调电路, 全光学的探测装置使得原子接收机免受电磁干扰; 工作频率的可调节范围大, 通过选择不同的里德伯能级, 载波频率可从 MHz 覆盖到 THz; 原子接收机带宽不受天线尺寸限制, 因此可突破 Chu 极限 (Chu limit); 在工作带宽内测量灵敏度高, 有望提升弱场通信能力. 近年来, 里德伯原子通信接收机引起研究者的强烈关注. 里德伯原子通信接收机有望集成并融合到现有的无线通信系统, 提高无线通信的通信距离. 本文综述基于里德伯原子的通信接收机进展, 详细介绍里德伯原子通信接收机的原理、优势、潜能与实验进展, 并讨论了其未来发展方向与趋势.

**关键词:** 里德伯原子, 电磁诱导透明, 通信接收机**DOI:** 10.7498/aps.75.20251465**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251465

## 1 引言

下一代无线集成通信和传感功能系统需要超高的灵敏度和数据传输速率, 同时支持大规模连接和超低延迟<sup>[1]</sup>. 因此无线接收器应具备宽带调节性和宽带处理能力. 现有的无线通信系统要接收不同频率的宽带射频信号, 可以通过将多个集成电路分支与额外组件结合, 实现宽带可调性和宽带处理能力, 每个分支负责特定的频段<sup>[2]</sup>. 射频系统受到带宽限制, 体积庞大且耗电量大, 同时还面临许多设计挑战<sup>[3-5]</sup>, 尤其是在大规模高频接收器中. 因此里德伯原子接收机作为解决这些射频接受挑战的根本方案而出现.

随着里德伯微波电场传感器不断取得进展<sup>[6-17]</sup>, 逐渐成为量子传感领域中一个独特且发展迅速的

研究分支, 许多研究小组纷纷探索里德伯原子电场传感器的应用<sup>[18-29]</sup>. 其中微波无线通信是里德伯原子微波电场测量的一个重要应用<sup>[30-37]</sup>. 与基于电缆、光缆等链路的通信方式不同, 微波通信不需要铺设额外的通信链路, 即可实现远距离直接通信. 由于微波通信具有容量大、传输质量高和传输距离远的点, 因此在国家通信网络中扮演着重要角色.

随着信息化社会的快速发展, 无线电终端设备越来越小型化, 而天线却不遵从摩尔定律, 传统的通信发射机和接收机在尺寸方面受到明显限制<sup>[38,39]</sup>. 这是因为 Chu 极限 (Chu limit) 限制了尺寸小于电磁波波长的传统天线的性能, 即对于一个特征半径为  $a$  的微小无损共振天线而言, 其工作带宽  $BW \leq f_0(2\pi a/\lambda)^3$ , 其中  $f_0$  为载波频率. 从上述表达式可以看出, 当微小天线的尺寸  $a$  远小于载波波长  $\lambda$  时, 其带宽将受到严重限制, 从而影响通

\* 深地国家科技重大专项 (批准号: 2024ZD1002700) 和科技创新 2030—“量子通信与量子计算机”重大项目 (批准号: 2024ZD0301300) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: kongxiangyan@nbu.edu.cn

信速率<sup>[38,40-42]</sup>. 而基于里德伯原子的微波电场测量方案不依赖于原子对微波场的吸收<sup>[43]</sup>, 而是通过探测待测微波场引起的里德伯能级频移实现电场强度测量. 这种非破坏性测量方法使得里德伯原子电场传感器不受 Chu 极限限制<sup>[41,42]</sup>, 即带宽不受限于天线尺寸<sup>[44]</sup>. 除此之外, 基于里德伯原子的通信接收机可以在非常宽的频率范围 (~MHz—THz) 内工作, 因此单个接收机能实现超宽带信号检测, 这在一些很难改变接收机参数的环境 (例如卫星) 并且空间难以放下多个接收天线时是非常有价值的. 同时, 全光学的里德伯原子微波接收机不仅可以免受电磁干扰的影响, 并且具有良好的可扩展性. 因此, 里德伯原子接收机得到了广泛关注和深入研究.

## 2 基于里德伯原子电场传感器的电场强度、相位与频率测量

### 2.1 电场强度测量

里德伯原子中的外层电子处于大主量子数的高激发态  $|r_1\rangle$ , 如图 1 所示. 实验中利用探测 ( $\Omega_p$ ) 光和耦合 ( $\Omega_c$ ) 光将  $^{87}\text{Rb}$  原子共振激发到里德伯态  $|r_1\rangle$ . 当探测光束 ( $\Omega_p$ ) 与  $|g\rangle \rightarrow |e\rangle$  跃迁共振时, 其透射率会因为原子的共振吸收而降低. 然而当存在与  $|e\rangle \rightarrow |r_1\rangle$  跃迁共振的耦合光场 ( $\Omega_c$ ) 时, 探测光的透射率将得到提高, 这就是电磁诱导透明

(electromagnetically induced transparency, EIT) 现象. 实验中通过扫描激光频率得到的 EIT 光谱如图 1(b) 所示. 与此同时, 当微波共振耦合里德伯跃迁  $|r_1\rangle \rightarrow |r_2\rangle$  时, 将形成缀饰态  $|+\rangle, |-\rangle$ , 如图 1(c) 中虚线所示. 缀饰态的形成导致原子光谱劈裂, 即 Autler-Townes (AT) 劈裂, 劈裂的大小与微波电场强度成正比, 如图 (1) 式所示, 即光谱劈裂大小与电场强度一一对应:

$$E d_{r_1 r_2} = \hbar \Omega_{\text{MW}}. \quad (1)$$

相邻里德伯态  $|r_1\rangle$  与  $|r_2\rangle$  之间的电偶极矩  $d_{r_1 r_2}$  很大, 因此里德伯原子对共振的外电场极其敏感<sup>[45]</sup>.

实验上通过扫描 EIT-AT 光谱, 可以直接测量两个微波缀饰态  $|+\rangle$  与  $|-\rangle$  的频率间隔  $\Omega_{\text{MW}}$ , 再计算出里德伯态  $|r_1\rangle$  与  $|r_2\rangle$  之间的偶极跃迁矩阵元  $d_{r_1 r_2}$ <sup>[46,47]</sup>, 根据 (1) 式即可测量原子处电场强度大小  $E$ . 这一微波电场测量原理建立在基本物理规律和物理常量基础上, 因此是自校准的<sup>[48]</sup>. 里德伯态之间的偶极跃迁矩阵元随主量子数  $n$  呈平方增长, 即

$$d_{r_1 r_2} \propto n^2. \quad (2)$$

而里德伯态  $|r_1\rangle$  与  $|r_2\rangle$  之间的能级差与  $n^{-3}$  成正比, 因为里德伯态的能量与  $n^{-2}$  成正比, 即

$$U_{r_1}, U_{r_2} \propto \frac{1}{n^2}, \Delta U = U_{r_1} - U_{r_2} \propto \frac{1}{n^3}. \quad (3)$$

因此, 实验中可以通过选取不同的里德伯态来测量不同频率的微波电场. 图 2 展示了  $^{87}\text{Rb}$  原子  $n = 10-100$  的里德伯能级分布, 其中横轴是轨道角动量, 纵轴是能量大小, 蓝色实线代表不同的里德伯能级. 由图 2 能级分布可知, 随着主量子数  $n$  增大里德伯能级越密集, 相邻里德伯态之间的能级差越来越小. 从 GHz—THz 都有离散的里德伯跃迁频率, 因此里德伯原子传感器可测微波频率范围较大.

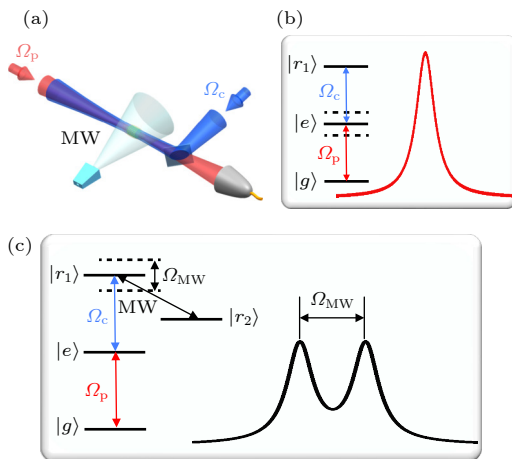


图 1 EIT 及 EIT-AT 能级与光谱图 (a) 里德伯原子微波电场传感器示意图; (b) EIT 能级及光谱图; (c) EIT-AT 能级及光谱图

Fig. 1. EIT and EIT-AT energy levels and spectra: (a) Schematic of Rydberg atomic microwave electric field sensor; (b) EIT energy levels and spectrum; (c) EIT-AT energy levels and spectrum.

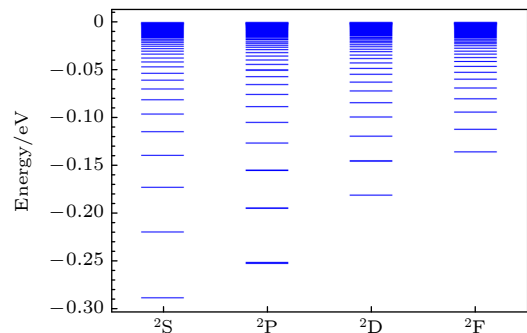


图 2  $^{87}\text{Rb}$  原子的里德伯态能级图

Fig. 2. Energy level diagram of  $^{87}\text{Rb}$  atoms.

## 2.2 相位与频率测量

当微波电场强度较弱时, 微波电场导致的光谱劈裂较小 (小于 EIT 光谱线宽), 则实验上无法直接测量电场强度. 在这种情况下, 只能对有、无微波电场时里德伯原子系统的光谱进行差分测量, 以判断是否存在微波电场. 可溯源测量范围内的最小可测微波电场强度直接取决于里德伯原子的 EIT 线宽. 为了测量微波场的相位与频率信息并提高里德伯原子电场传感器的灵敏度, 山西大学的贾锁堂、肖连团与张临杰团队<sup>[49]</sup>提出了里德伯原子的超外差测量方案. 该方案原理如图 3 所示, 通过引入一束较强的本振微波场 (local oscillation, LO), 与信号微波场 (signal, SIG) 在原子处干涉, 使得原子感受到的微波场强以本振场和信号场的频率差  $\Delta\omega = \omega_{\text{LO}} - \omega_{\text{SIG}}$  进行振荡, 产生的拍频信号将直接映射到原子光谱, 且拍频信号强度与信号场的场强呈线性变化, 因此基于超外差测量方案的测量灵敏度与经典噪声成正比, 即  $S \propto \sigma$ . 利用超外差测量方案, 目前实验上实现的测量灵敏度达到  $S = 12.5 \text{ nV}/(\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2})$ , 相比于非线性测量方案提升了 3 个数量级<sup>[50]</sup>.

这一方案利用本振场与里德伯原子相互作用引起 AT 劈裂, 通过调节本振场的强度, 使得无微波场时的 EIT 双光子共振频率点, 恰好同时位于两个 AT 峰斜率最大处. 在这一条件下, 信号微波场和本振场的干涉将会引起原子处的微波场强发生微小变化, 由于此时处于光谱斜率最大处, 因此即使是微小的场强变化也会引起透射光谱的显著变化.

这一过程中, 两个微波场同时作用于原子时, 原子感受到的总电场强度是 LO 场与 SIG 场的矢量叠加, 如图 3(c) 所示. 可将 LO 场和 SIG 场分别表示为

$$\begin{aligned} |\mathbf{E}_{\text{LO}}| &= E_{\text{LO}} \cos(\omega_{\text{LO}}t + \phi_{\text{LO}}), \\ |\mathbf{E}_{\text{SIG}}| &= E_{\text{SIG}} \cos(\omega_{\text{SIG}}t + \phi_{\text{SIG}}), \end{aligned} \quad (4)$$

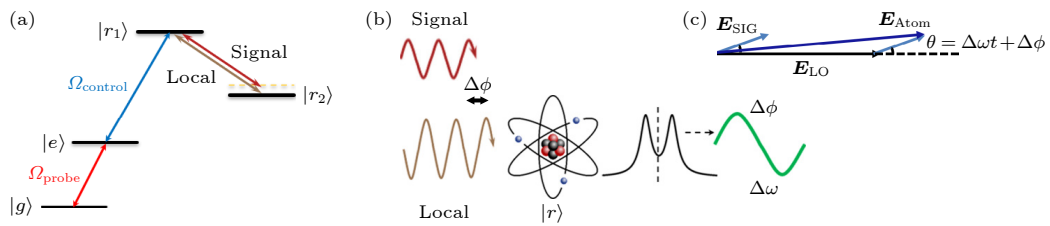


图 3 超外差里德伯原子微波传感器原理图 (a) 超外差电场测量能级图; (b) 超外差电场测量示意图; (c) 两微波场的矢量叠加图

Fig. 3. Principle diagram of the superheterodyne Rydberg atomic receiver: (a) Energy level diagram for superheterodyne sensor; (b) schematic diagram of superheterodyne atomic receiver; (c) vector superposition diagram of local field and signal field.

则原子感受到的合微波电场强度为

$$\begin{aligned} |\mathbf{E}_{\text{Atom}}| &= \cos(\omega_{\text{LO}}t + \phi_{\text{LO}}) \\ &\times \sqrt{E_{\text{LO}}^2 + E_{\text{SIG}}^2 + 2E_{\text{LO}}E_{\text{SIG}} \cos(\Delta\omega t + \Delta\phi)}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $\Delta\omega = \omega_{\text{LO}} - \omega_{\text{SIG}}$  为两微波场的频率差,  $\Delta\phi = \phi_{\text{LO}} - \phi_{\text{SIG}}$  为两微波场的初始相位差. 将 LO 场和 SIG 场的相对相位差用  $\theta = \Delta\omega t + \Delta\phi$  表示, 其由两微波场频率差的时间积累和初始相位差组成. 在弱场条件 ( $E_{\text{LO}} \gg E_{\text{SIG}}$ ) 下, 原子处的合微波电场强度可近似为

$$\begin{aligned} |\mathbf{E}_{\text{Atom}}| &\approx E_{\text{LO}} \cos(\omega_{\text{LO}}t + \phi_{\text{LO}}) \\ &\times \left[ 1 + \frac{E_{\text{SIG}}}{E_{\text{LO}}} \cos(\Delta\omega t + \Delta\phi) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

根据 (6) 式, SIG 场只会引起 AT 劈裂发生微小的变化, 因而 EIT 双光子共振频率处探测光强度随时间的关系可写为  $P(t) = \bar{P}_0 + \kappa E_{\text{SIG}} \cos(\Delta\omega t + \Delta\phi)$ , 其中直流项  $\bar{P}_0$  为只有 LO 场时的探测光强度, 交流项来源于 LO 场和 SIG 场的干涉, 且振荡频率为两个场的拍频  $\Delta\omega$ , 振荡幅度正比于 SIG 场的电场强度. 基于这一方案, 可实现微波场相位及频率测量<sup>[51]</sup>.

## 2.3 里德伯原子电场传感器灵敏度提升的发展历程

2012 年美国俄克拉荷马大学的 Shaffer 小组<sup>[52]</sup>第一次利用基于里德伯原子的电磁诱导透明技术在室温铷原子气室中实现微波电场测量, 测量灵敏度达到  $30 \mu\text{V}/(\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2})$ ; 2017 年 Shaffer 小组采用零差测量方法将里德伯原子电场测量系统的灵敏度提高至  $5 \mu\text{V}/(\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2})$ <sup>[7]</sup>, 随后该小组又通过频率调制光谱的方法将系统灵敏度提高到  $3 \mu\text{V}/(\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2})$ <sup>[15]</sup>. 2020 年山西大学贾锁堂、肖连团与张临杰团队<sup>[49]</sup>提出了基于微波缀饰里德伯光谱的原子超外差接收机. 超外差测量方法可以将微

波电场测量的灵敏度提升至  $55 \text{ nV}/(\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2})$ , 较之前的方案灵敏度提高两个数量级. 同年华南师范大学朱诗亮、颜辉团队<sup>[13]</sup>在冷里德伯原子系统中利用电磁诱导吸收 (electromagnetically induced absorption, EIA) 实现了微波电场测量, 冷里德伯原子的窄线宽 EIA 光谱使得可溯源的最小电场强度可以达到  $\sim 100 \mu\text{V}/\text{cm}$ . 2021 年中国科学院大学钟志萍团队和清华大学谢锋团队<sup>[53]</sup>提出并实验证明了利用辅助微波场能扩大里德伯原子微波电场测量的范围, 将最小可溯源的微波场强从  $\sim \text{mV}/\text{cm}$  优化至  $\sim \mu\text{V}/\text{cm}$ . 2022 年中国科学院精密测量科学与技术创新研究院刘红平小组<sup>[50]</sup>基于超外差测量系统通过优化微波失谐等实验参数, 将超外差接收机的灵敏度进一步提升至  $12.5 \text{ nV}/(\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2})$ . 同年中北大学刘俊团队等<sup>[54]</sup>提出并且实验证实通过微波谐振腔增强的方案可以提高微波电场测量灵敏度, 实验上将微波电场测量灵敏度较没有谐振腔时提高了近 2.9 倍. 2022 年中国科学技术大学史保森、丁冬生团队在里德伯原子系统实现了微波频率梳, 能提供精确的微波频率测量<sup>[55]</sup>, 并且利用多体临界增强计量来测量非平衡里德伯气体中的外部微波电场, 灵敏度达到  $49 \text{ nV}/(\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2})$ <sup>[56]</sup>. 2023 年山西大学贾锁堂、张临杰、肖连团与景明勇团队<sup>[57]</sup>定量研究了原子超外差接收机的灵敏度与原子数的平方根成反比. 2025 年中国科学技术大学丁冬生团队<sup>[58]</sup>利用微波腔增强里德伯原子与微波场的耦合, 加入微波腔后原子电场传感器的灵敏度实现了 18 dB 的增强, 同年山西大学赵建明团队<sup>[59]</sup>利用热共振增强透明现象将里德伯原子微波电场传感器的灵敏度提高至  $28.7 \text{ nV}/(\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2})$ .

里德伯原子电场测量系统的散粒噪声极限灵敏度为  $\sim \text{pV}/(\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2})$ <sup>[60]</sup>. 而量子投影噪声限制的极限灵敏度约为  $E_{\text{QPNL}} = 700 \text{ pV}/(\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2})$ <sup>[49]</sup>. 目前限制量子投影噪声极限灵敏度的关键原因是系统相干时间, 这可以通过冷原子系统提高相干时间, 但是冷原子系统复杂度会大幅增大.

### 3 基于里德伯原子电场传感器的通信接收机

为了实现微波通信, 基带信息会通过调制加载于微波载波, 在无线通信中广泛应用的 3 种调制方式分别是幅度调制 (amplitude modulation, AM)、

频率调制 (frequency modulation, FM) 和相位调制 (phase modulation, PM). 里德伯原子充当微波接收机解调基带信号. 载波电场可写为

$$E_c = E_0 \cos(\omega_0 t), \quad (7)$$

调制电场表示为

$$E_s = E_1 \cos(\omega_1 t). \quad (8)$$

因此经调制后的载波可表达为

$$E_t = E_0 \left[ 1 + \frac{E_1}{E_0} \cos(\omega_1 t) \right] \cos(\omega_0 t), \quad (9)$$

其中  $\omega_0$  是载波频率,  $\omega_1$  是调制频率. 调制载波幅度可以表达为

$$|E_t| \approx E_0 + E_1 \cos(\omega_1 t). \quad (10)$$

在 EIT 读出方案中, 探测光透射为

$$T_{\text{probe}} \propto |E_t| \approx E_0 + E_1 \cos(\omega_1 t). \quad (11)$$

用 EIT 读出的方案测量微波场强度时, 高频载波与里德伯原子能级共振, 微波调制直接映射到原子光谱, 因此里德伯原子接收机无需解调电路. 原子系统滤除载波并直接解调基带信号, 实验通过测量探测光强度以恢复基带信号. 下文将综述近几年国内外诸多团队在基于里德伯原子的通信接收机方面的研究进展, 整体综述架构如图 4 所示.

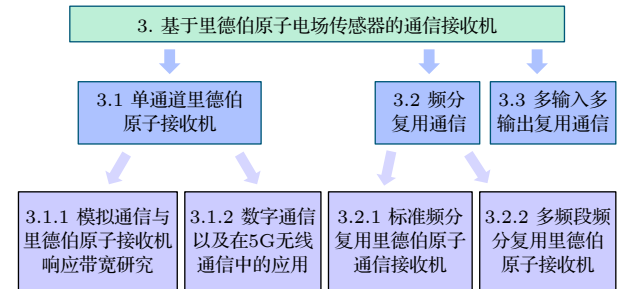


图 4 基于里德伯原子电场传感器的通信接收机进展框图

Fig. 4. A review architecture of Rydberg atom-based receiver.

#### 3.1 单通道里德伯原子接收机

##### 3.1.1 模拟通信与里德伯原子接收机响应带宽研究

2018 年新西兰奥塔哥大学 Deb 和 Kjærgaard<sup>[61]</sup>首次实现了基于里德伯原子的光载无线通信. 经过模拟幅度调制的微波场与里德伯原子相互作用后, 探测光携带信息后无损地通过光纤连接到光电探测器, 随后恢复信号. 实验中展示了超过  $\sim 1 \text{ MHz}$

的信号带宽, 这主要受限于耦合光功率和原子数密度等. 该实验展示的高灵敏、非金属且易扩展的微波通信接收机允许极低的光功率 ( $\sim \mu\text{W}$ ). 这为新兴的无线网络基础设施提供了一个有前途的未来平台. 随后美国国家标准与技术研究院 Holloway 等<sup>[62]</sup> 在同一个原子气室内采用铷原子和铯原子分别实时记录两把吉他演奏的模拟音频信号. 该实验展示了如何用量子系统检测音频信号, 方案中通过幅度调制的方式记录吉他演奏的模拟音频信号, 实验装置如图 5(a) 所示. 两把吉他的音频信号分别加载在不同频率的载波上, 气室内铯里德伯原子和铷里德伯原子会选择性地与被调制的载波相互作用, 通过调制光谱能解码音频信息. 不同强度音频信号调制的原子光谱如图 5(c) 所示. 由于里德伯

原子接收机是非线性系统, 接收到的调幅信号的参数与系统的线性工作区间以及解调工作点之间的不匹配会导致解调信号严重失真. 为了解决这个问题, 重庆大学肖冬萍团队<sup>[63]</sup> 提出了一种基于均方误差和总谐波失真评估确定工作参数, 并展示了优化系统运行参数的策略, 重点关注线性响应特性和线性动态范围.

2019 年, 山西大学激光光谱研究团队的贾锁堂教授和赵建明教授等<sup>[64]</sup> 在铯原子气室内采用幅度调制的方式实现了模拟音频信号的接收. 实验中展示了接收机 30 dB 的大动态范围以及 60 kHz 的基带信号接收线宽. 同时载波频率的范围原则上可以很大, 因为里德伯原子能级间隔能覆盖  $\sim \text{GHz}$ —1 THz. 该工作为基于原子的宽带微波通信接收机

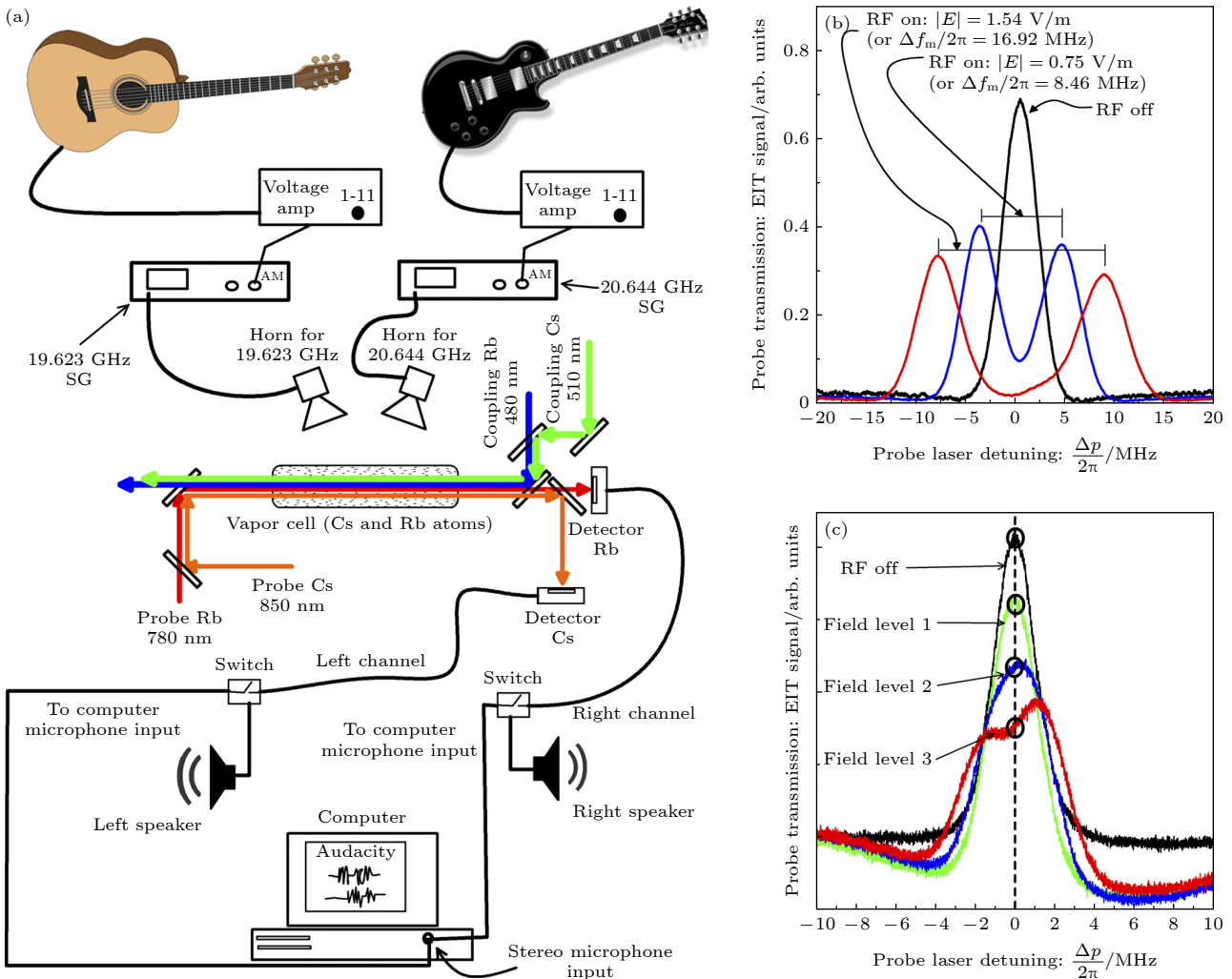


图 5 基于里德伯原子微波电场传感器记录的“量子音乐” (a) 记录吉他输出的里德伯原子电场传感器的装置图; (b) 不同电场强度的 EIT 光谱劈裂; (c) EIT 光谱信号中心的微波电场幅度调制方案<sup>[62]</sup>

Fig. 5. A “real-time” guitar recording using Rydberg atoms and electromagnetically induced transparency: (a) Illustration of a four-level system and experimental setup used to record the output of a guitar; (b) splitting of EIT signal; (c) before splitting of EIT signal (AM modulation scheme at the center of the EIT signal)<sup>[62]</sup>.

的进一步研究奠定了基础. 2024 年, 山西大学赵建明与焦月春团队<sup>[65]</sup>利用 AC 斯塔克效应和弗洛凯态实现了连续频率里德伯原子电场传感器. 实现连续频率和高灵敏度的微波探测将促进里德伯原子接收机在雷达技术和无线通信中的应用. 同年国防科技大学付云起教授团队<sup>[66]</sup>实现了基于里德伯原子接收机的宽带射频通信, 基于 Autler-Townes 分裂和 AC Stark 效应, 在不改变激光仅改变天线馈入的前提下展示了 2—18 GHz 的宽带载波幅度调制.

2021 年美国密歇根大学 Raithel 教授等<sup>[67]</sup>实现了基于幅度调制和频率调制的里德伯原子接收机. 该实验中将音频基带信号调制微波场的幅度和相位, 被调制的微波场被原子探测, 通过探测 EIT 光谱微波场被实时解调. 实验中展示了通过选择不同的里德伯能级实现多频段 AM 和 FM 通信, 原子接收机相较于传统接收机而言无需解调电路, 因此原子接收机具有抗电磁干扰能力.

信道容量是微波通信接收机的关键参数之一, 其被定义为接收机在低误码率下的最大传输速率, 根据香农定理给出的单条信道容量极限为<sup>[68,69]</sup>

$$C = BW \log_2(1 + \text{SNR}) = f_{\text{sym}} \log_2 \left( 1 + \frac{S^2}{N_{f_{\text{sym}}}^2} \right), \quad (12)$$

其中 BW 是信道带宽, SNR 表示接收端信号功率信噪比,  $f_{\text{sym}}$  表示数据传输频率,  $S/N_{f_{\text{sym}}}$  表示探测信号的电压信噪比. 为了提高接收机的信道容量, 需要提高接收机的信道带宽和探测信号信噪比. 其中里德伯原子接收机的信道带宽受限于里德伯原子的响应带宽.

2022 年美国俄克拉荷马大学的 Shaffer 小组<sup>[70]</sup>研究了影响原子响应时间的因素, 原子的响应时间由两部分组成: 一部分是基于原子初始布居分布、自身相干属性所决定的系统平衡时间, 时间尺度约为百纳秒; 另一部分是来自于里德伯原子及其碰撞产生物离开相互作用区域所需的渡越时间, 时间尺度约为几微秒. 同年美国国家标准与技术研究院的 Holloway 团队<sup>[71]</sup>通过减小激发光束腰以降低渡越时间, 从而提升里德伯原子响应带宽, 实验中展示了里德伯原子接收机接收实时彩色模拟电视和视频游戏信号的能力. 2023 年赵建明团队<sup>[72]</sup>研究了影响超外差原子接收机响应带宽的因素, 主要包括激光束腰和拉比频率, 实验中实现了 6.8 MHz 的最大响应带宽, 同时该团队设计了一种多通道激

光激发的方案, 以同时提高响应带宽和保持灵敏度, 该工作有可能扩展里德伯原子在通信中的应用. 同年 Knarr 等<sup>[73]</sup>利用时空复用技术将里德伯原子接收机的带宽提高至超过 100 MHz. 脉冲探测光束可以使原子布居在连续的探测光脉冲之间重置, 同时利用快速 EIT 瞬态采样射频场. 脉冲探测光束的空间和时间复用允许对输入的射频波形进行连续采样, 同时保持高采样率. 这有利于提高里德伯原子接收机的信道容量. 2024 年美国国家标准与技术研究院 Artusio-Glimpse 等<sup>[74]</sup>展示了使用载波锁定的光频梳探测方案可以显著提高里德伯原子接收机探测调制射频信号的带宽到 12 MHz. 实验中观察到的带宽改善可能是里德伯原子与 1  $\mu\text{s}$  重复频率梳齿之间的时间动力学的结果, 并可能与暗态的破坏有关. 这种方法与通过时空复用探测脉冲序列理论上带宽高达 100 MHz 的设想有相似之处. 这种载波锁定的光频梳探测方法使得系统能够校准射频场强度的同时能够实时读取编码在多个 EIT 特征中的调制信号<sup>[75]</sup>. 国内中国科学院大学成华东团队<sup>[76]</sup>通过放大里德伯超外差六波混频过程中强耦合场诱导的边带波实现了灵敏度高达 62 nV/(cm·Hz<sup>1/2</sup>) 且瞬时带宽高达 10.2 MHz 的接收机.

### 3.1.2 数字通信以及在 5G 无线通信中的应用

2018 年美国陆军实验室展示了基于里德伯原子的无线数字通信, 该实验中使用 TTL 信号对微波电场进行开关实现幅度调制, 而数字信号编码于 TTL 信号的相位, 利用这种相位敏感的幅度调制方式实现了 8 态相移键控<sup>[77]</sup>, 如图 6 所示. 该实验测量光子散粒噪声限制的信道容量达到 8.2 Mbit/s. 此外, 该实验室在 0.01—30 MHz 频段使用原子天线的信道容量比同尺寸天线的香农极限提高了 4 个数量级, 逼近原子的量子极限<sup>[78]</sup>. 美国陆军实验室的此项工作有望为美军配备高带宽超高灵敏度的量子接收机, 使其在战场背景噪声干扰下进行高速的频分复用通信, 因而入选了 2018 年美国陆军十大科技进展. 2024 年西北工业大学高永胜团队<sup>[79]</sup>实现了多频段跳频通信里德伯原子接收机, 其载波频率按照预定顺序变化, 并进行实验验证. 此处提出的基于里德伯原子的跳频接收器适用于安全通信、卫星上行链路、量子密码学和高精度科学研究.

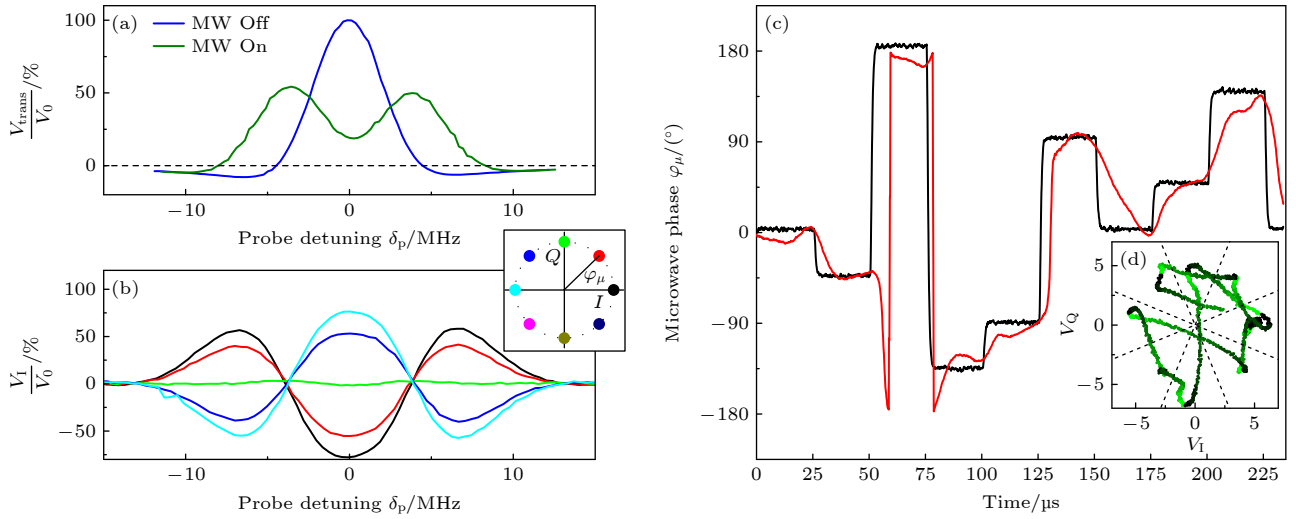


图 6 基于幅度调制的里德伯原子数字通信 (a) 里德伯原子 EIT(蓝色)和 AT(绿色)光谱; (b) 解调传输信号, 线条颜色与插图中对应的幅度调制相位状态相匹配; (c) 相移键控发出(黑色)和接收(红色)的相位; (d) 图(c)中接收的相位(红线条)星座图<sup>[77]</sup>

Fig. 6. Digital communication of Rydberg atoms based on amplitude modulation: (a) EIT (blue) and AT (green) spectra of Rydberg atoms; (b) example demodulated transmission signals with color corresponding to amplitude modulation phases, matching the amplitude modulation phase states shown in the inset; (c) phase shift keying for transmitting (black) and receiving (red) phases; (d) phase constellation of the received phase in (c) (redline)<sup>[77]</sup>.

2019 年美国国家标准与技术研究院 Holloway 等<sup>[80]</sup>利用里德伯原子电场传感器实现了微波电场相位测量,并实现了基于数字相位调制的里德伯原子接收机且实现 IQ 分析功能. 同年中国计量科学研究院宋振飞团队<sup>[81]</sup>研究了基于里德伯原子的通信载波频率在一定范围连续可调,文中展示了载波频率在 10.22 GHz 及 200 MHz 带宽范围内都可实现可靠通信. 2022 年山西大学赵建明团队<sup>[82]</sup>展示了在室温原子气室中通过 AC Stark 效应,用强度较弱的连续频率载波实现了幅度调制接收机,该工作证明在里德伯原子接收机中,载波频率的可连续性. 同年华南师范大学朱诗亮、颜辉团队<sup>[83]</sup>在室温铯原子气室中实现了基于里德伯原子的太赫兹无线通信,并将相位敏感的幅度调制信号和相位敏感的频率调制信号转化为光信号进行探测,使用里德伯原子接收机能实现长距离太赫兹无线通信. 在低频通信方面 2025 年中国科学院大学石猛团队<sup>[84]</sup>在电极板嵌入的原子气室中实现了低频数字通信,载波频率低至 100 kHz,实验验证了二进制相移键控 (binary phase-shift keying, BPSK)、开/关键控 (on-off keying, OOK) 和双频移键控 (2-frequency shift keying, 2FSK) 的调制方案,并采用数字通信方式实现了高保真数字彩色图像传输.

除了在实验室研究基于里德伯原子的通信接收方案外,还有一些面向 5G 无线通信应用的里德

伯原子接收机进展. 2023 年英国伯明翰大学 Menchetti 等<sup>[85]</sup>展示了用里德伯原子接收机探测 5G (载波频率为 3.5 GHz) 载波及数字信号的能力,并展示了与里德伯接收器相对应的等效传统电子接收机,通过测量信噪比比较了电子接收机和里德伯原子接收机的性能. 同年山西大学汪丽蓉团队提出用双音微波场实现幅度调制微波信号的接收,该通信方案有利于实验室外的远距离通信和弱信号感知<sup>[86]</sup>,同时该团队利用这种方法实现了基于里德伯原子的 5G 毫米波无线通信实验<sup>[87]</sup>. 2024 年美国里德伯科技公司 Anderson 等<sup>[88]</sup>报道了基于里德伯原子的量子无线电设备的发展,并展示了在超过一公里的距离上使用里德伯原子无线电进行长距离射频 (radio frequency, RF) 通信. 在无线通信演示中,传输的射频信号跨越 HF (high frequency) 波段到 UHF (ultra high frequency) 波段,距离从几百米到超过一公里,并由量子无线电接收、解调和处理组成. 该实验为里德伯原子接收机与 5G 无线通信系统的结合奠定了基础. 2025 年北京理工大学郑德智和毛天奇团队<sup>[89]</sup>专注里德伯原子接收机与尖端集成传感与通信之间的交叉融合,全面研究了基于里德伯原子接收机的集成传感与通信,包括基本原理、理论建模、硬件概念验证和设想的应用场景,表明其在民用和军用方面的巨大潜力.

同时苏州大学朱成杰团队和国防科技大学

张引发团队<sup>[90]</sup>提出一种新的微波通信方案, 该方案基于反转 Y 型里德伯原子系统的交叉相位调制. 理论分析研究了在室温、相干驱动的五能级反转 Y 型铷原子介质中, 探测光场的色散关系以及微波场引起的交叉相位调制.

### 3.2 频分复用通信

频分复用技术在 5G 宽带通信中发挥至关重要的作用, 用于减轻多路径通信干扰. 频分复用里德伯原子接收机的进步推动了里德伯原子接收机赋能的无线通信. 最先进的频分复用里德伯原子接收机可分为两类, 标准频分复用里德伯原子接收机和多频段频分复用里德伯原子接收机<sup>[31]</sup>.

#### 3.2.1 标准频分复用里德伯原子通信接收机

标准频分复用里德伯原子接收机旨在接收标准频分复用信号, 几个子载波的频率间隔较小, 频差在里德伯原子的响应带宽内, 不超过~MHz, 实

验涉及的原子能级图如图 7 左图所示. 在这种情况下, 一个能级跃迁足以将所有子载波信号下转换为量子态的拉比频率. 构建标准频分复用里德伯原子接收机的挑战是拉比频率的非线性, 这破坏了不同子载波间的正交性, 造成严重的载波间串扰<sup>[31]</sup>.

2020 年, 中国计量科学研究院宋振飞团队<sup>[91]</sup>在里德伯原子接收机系统验证了频分复用通信的可行性. 2023 年华南理工大学李霖团队<sup>[92]</sup>展示了频率间隔为 100 kHz 的 3 个子载波的频分复用通信, 指出了多个子载波之间的串扰. 为了解决子载波之间的串扰问题, 中国科学技术大学丁冬生团队<sup>[93]</sup>训练了深度学习模型直接从接收的探测光功率推断频分复用通信所传输的算符, 该实验中考虑了频率间隔为 2 kHz 的 4 个子载波, 深度学习增强的里德伯原子接收机可以解调频分复用的二进制相移键控符号, 准确率超过 99%, 实验装置及原理如图 8 所示. 2025 年美国里德伯科技公司 Gonçalves 等<sup>[94]</sup>测量表征了里德伯原子的非线性

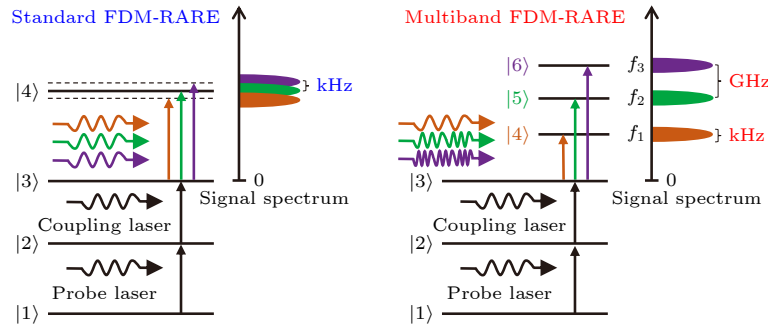


图 7 标准和宽带频分复用里德伯原子接收机能级示意图<sup>[31]</sup>

Fig. 7. Standard and multi-band frequency division multiplexing Rydberg atomic receivers<sup>[31]</sup>.

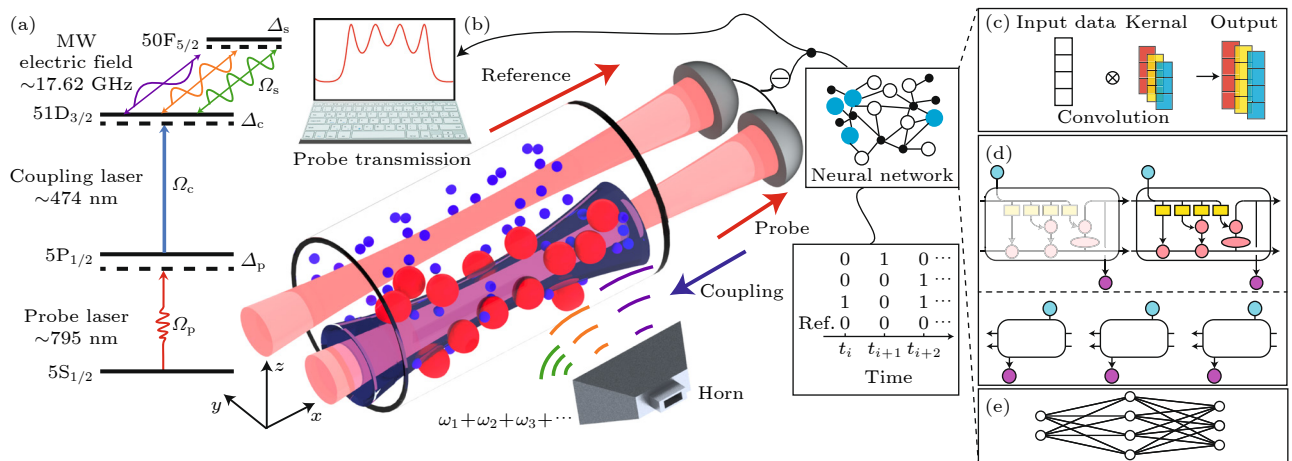


图 8 深度学习增强的多频里德伯原子接收机示意图 (a) 实验能级图; (b) 里德伯原子天线与多频信号相互作用示意图; (c)–(e) 神经网络示意图<sup>[93]</sup>

Fig. 8. Illustration of the setup: (a) Overview of experimental energy diagram; (b) schematic of Rydberg atom-based antenna and mixer interacting with multifrequency signals; (c)–(e) schematics of the neural network<sup>[93]</sup>.

行为和杂散响应. 基于多光子里德伯原子光谱和射频信号外差探测测试里德伯原子接收机在双音信号 (频差为 100 kHz) 接收时的谐波和互调失真效应.

### 3.2.2 多频段频分复用里德伯原子接收机

里德伯原子接收机因为丰富的里德伯能级能够检测很宽频率范围内的微波信号, 因此能够同时传输大量信息并访问更多频谱资源, 这对于无线微波通信至关重要. 然而传统的微波接收系统受到放大器和带通滤波器的限制, 这些放大器和带通滤波器只能在特定频率范围内有效运行, 这限制了微波通信系统的数据传输带宽. 多频段频分复用里德伯原子接收机利用里德伯原子接收机的探测频率范围广可作为集成的全频通信平台.

在这个平台, 信号频率可以分布在不同的频段, 频率的间隔范围从 GHz 到 THz. 在多频段频分复用里德伯原子接收机中, 不同频段的载波耦合不同的里德伯能级对, 如图 7 右图所示<sup>[31]</sup>. 每一个能级对间的电子跃迁将对应频段的载波下转换为基带信号, 从而实现多频段频分复用通信. 2022 年北京量子信息科学研究院杨仁福团队和山西大学何军队<sup>[95]</sup>基于不同里德伯终态实现了两频段载波同时通信, 该实验中展示了模拟音频和数字伪随机二进制序列信号传输. 2023 年美国陆军实验室 Meyer 等<sup>[96]</sup>在里德伯原子接收机系统展示了跨越 1.7—116 GHz 的 5 个射频载波的同时解调与探测. 该实验中展示了通过耦合不同的里德伯能级连续

恢复每个载波的相位和幅度信息, 验证了多频段频分复用里德伯原子接收机的可行性. 同年中国科学院精密测量科技创新研究院刘红平团队<sup>[97]</sup>研究了基于里德伯原子的双频段微波 (1.2 GHz, 32 GHz) 通信中的排斥效应. 实验结果表明两个通道的通信载波之间会不可避免的相互影响, 因此两通道载波无法同时工作在通信最敏感的状态. 2024 年英国杜伦大学 Allinson 等<sup>[98]</sup>采用高角动量里德伯态在里德伯原子接收机中实现了多频段射频场探测, 基于该技术方案能构建新型多频段频分复用里德伯原子接收机.

2024 年中国科学技术大学丁冬生团队<sup>[2]</sup>实现了基于空分复用射频芯片模块的超连续宽带 (0.2—25 GHz) 双波段里德伯原子接收机, 能级图和实验装置如图 9 所示. 这项工作为射频芯片集成的里德伯原子传感器在超宽范围内的多频段微波接收应用奠定了基础.

与传统天线中多个载波频率成分相互正交不同, 原子传感器接收到耦合多个能级的频率信号会同时下转换为基带信号, 导致多用户干扰. 2025 年, 中国科学技术大学龚晨与项国甬合作<sup>[99]</sup>研究了里德伯原子接收机接收耦合两个能级双频信号的特征, 引入了基于接收机特性的联合响应系数, 并分析一个用户对另一个用户的干扰. 同时香港大学黄凯斌团队<sup>[100]</sup>从数学上研究了多频段里德伯原子接收机的底层物理机制, 通过求解多波段射频场激发的里德伯原子量子响应的闭环表达式, 推导了多波段里德伯原子接收机的传递函数.

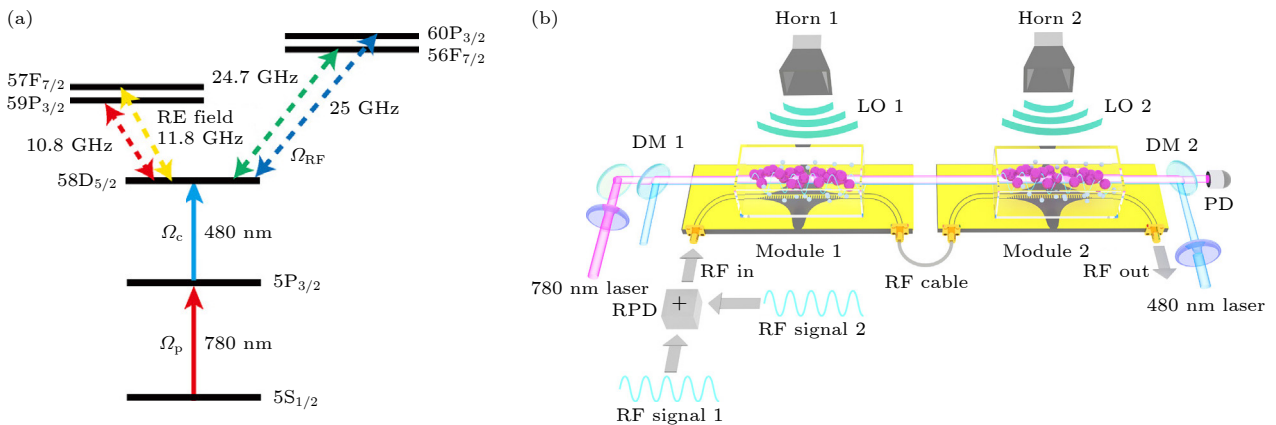


图 9 基于空分复用的超宽带双频里德伯原子接收机射频芯片模块的能级图和实验装置图<sup>[2]</sup> (a) <sup>85</sup>Rb 原子能级图; (b) 多波段微波场接收实验装置

Fig. 9. Experimental energy-level diagram and setup<sup>[2]</sup>: (a) The energy-level diagram of Rb atom (Rubidium 85); (b) the multi-band microwave fields reception experiment setup.

### 3.3 多输入多输出复用通信

作为 5G 及以后的核心技术, 多输入多输出 (multi-input-multi-output, MIMO) 通信通过多样性和复用技术大大提高光谱效率. 最近有研究在自由空间光通信中通过 MIMO 组合使用多样性代码展示了 20 Gbps 1500 m 传输通信<sup>[31]</sup>. 因此, MIMO 的进展激发了原子 MIMO 通信的研究, 关键思想是利用里德伯原子接收机阵列替代传统天线阵列用于信号探测. 基于里德伯原子接收机的 MIMO 通信可以结合里德伯原子接收机的高灵敏度和 MIMO 通信的高光谱效率.

2021 年, 新西兰奥塔哥大学 Otto 等<sup>[101]</sup> 利用原子传感器阵列, 实现了单输入多输出 (single-input-multi-output, SIMO) 的原子接收系统, 如图 10 所示. 该实验中采用 4 个里德伯原子接收机联合恢复来自单天线用户的幅度调制符号, 实验验证了接收信噪比与传统无线通信系统一样与里德伯原子接收机的数量成正比, 该系统中信道容量正比于  $\log_2(1+N \times \text{SNR})$ . 为了进一步获得复用增益, 香港大学黄凯斌团队<sup>[102,103]</sup> 研究了原子 MIMO 系统的多用户信号探测能力, 并且证明原子 MIMO 系统表现出非线性相位反演传输模型. 而非线性特征否定了传统零迫和最小均方误差线性检测方法的有效性, 因此原子 MIMO 通信系统的信号检测具有挑战性. 该团队提出一种算法以低复杂度迭代恢复多用户信号, 证明了原子 MIMO 通信的可行性. 国内外还有其他研究团队也探索了基于里德伯原子接收机的 MIMO 通信的可行性并进行了优势分析与验证<sup>[104-106]</sup>.

## 4 里德伯原子接收机未来发展趋势与展望

综上所述, 基于里德伯原子的通信接收机已取

得一系列显著进展. 研究团队不仅基于里德伯原子接收机系统实现了调幅、调频和调相等多种调制方式的模拟与数字通信, 还提出多种新方案提高里德伯原子接收机的瞬时带宽. 与此同时, 为提高里德伯原子接收机的信道容量, 国内外诸多团队积极探索基于里德伯原子接收机的频分复用通信和 MIMO 通信. 这些研究工作为将来里德伯原子接收机应用于现有的 5G 无线通信系统奠定了重要基础.

与传统的微波天线接收机相比, 里德伯原子接收机具有以下优势: 1) 非金属的原子探头不会干扰待测场, 可以实现非破坏通信; 2) 里德伯原子传感器将高频微波转化为光谱探测, 微波调制直接映射到原子光谱, 因此里德伯原子接收机无需解调电路, 全光学的探测装置使得原子接收机免受电磁干扰且可扩展性更好<sup>[64]</sup>; 3) 工作频率的可调节范围大, 通过选择不同的里德伯能级, 载波频率可从 GHz 覆盖到 THz<sup>[26,71,107,108]</sup>; 4) 原子接收机带宽不受天线尺寸限制, 因此可突破 Chu 极限; 5) 在工作带宽内测量灵敏度高, 有望提升弱场通信能力.

而里德伯原子接收机的不足主要体现在瞬时带宽 ( $\sim 10$  MHz) 不够大, 从而限制了接收机系统的信道容量; 玻璃材质的原子气室会屏蔽低频电场<sup>[108]</sup>, 频率低于  $\sim 1$  kHz 的自由空间电场难以进入气室内与里德伯原子相互作用; 并且现有的里德伯原子接收机系统体积大、成本高, 难以小型化并与现有的 5G 无线通信系统融合.

虽然里德伯原子通信接收机发展迅速, 但其与实际无线通信系统的融合与集成仍处于初步阶段. 还有一些物理层的问题值得深入研究, 以展现里德伯原子通信接收机的优势和应用潜力. 未来里德伯原子接收机的发展方向主要有: 首先在里德伯原子接收机的传输模型中不仅要考虑里德伯原子与微波场的相互作用, 也需要考虑里德伯-里德伯相互

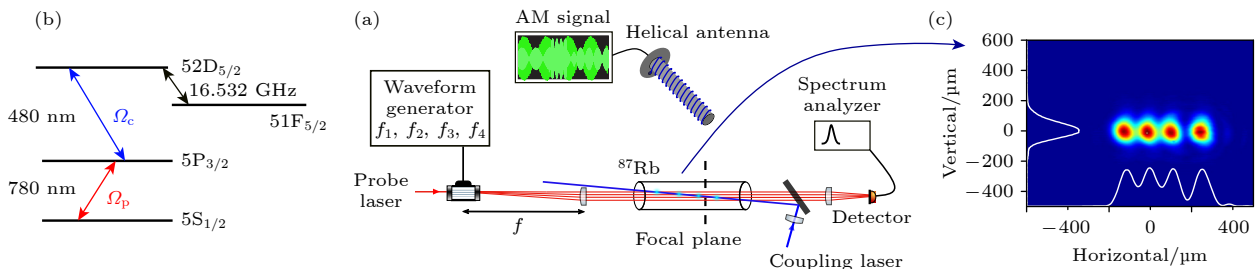


图 10 单输入多输出里德伯原子接收机 (a) 原子接收机实验装置图; (b)  $^{87}\text{Rb}$  原子能级图; (c) 四束探测光的轮廓图<sup>[101]</sup>  
 Fig. 10. Single-input-multi-output Rydberg atomic receiver: (a) Experimental set-up of the Rydberg atomic receiver; (b) four-level energy diagram for atomic  $^{87}\text{Rb}$  system; (c) beam profiles of four probe beams in the focal plane<sup>[101]</sup>.

作用, 这也会影响量子态的动力学<sup>[31]</sup>. 同时在宽带频分复用的电磁环境下里德伯原子系统的主方程很复杂, 难以求解, 未来深度学习模型或许将为理解和优化里德伯原子接收机系统提供有效的解决方案. 全光学的里德伯原子接收机具有很好的可扩展性, 因此 MIMO 里德伯原子接收机系统也是未来发展方向. 最后里德伯原子接收机的芯片化及与现有成熟的无线通信技术与系统融合也是大势所趋.

## 参考文献

- [1] Gong T R, Chandra A, Yuen C, Guan Y L, Dumke R, See C M S, Debbah M, Hanzo L 2025 *IEEE Wireless Commun.* **32** 90
- [2] Zhang L H, Liu B, Liu Z K, Zhang Z Y, Shao S Y, Wang Q F, Ma Y, Han T Y, Guo G C, Ding D S, Shi B S 2024 *Chip* **3** 100089
- [3] You F, He S B, Cao T, Tang X H 2008 *International Conference on Communications, Circuits and Systems Xiamen, China, May 25–27, 2008* p1342
- [4] Xuan X F, Yang F, Liu C X 2019 *Int. J. RF Microw. Comput. Aided Eng.* **29** e21899
- [5] Zheng S Y, Liu Z W, Zhang X Y, Zhou X Y, Chan W S 2018 *IEEE Trans. Ind. Electron.* **65** 4661
- [6] Jia C Y, Chen X H, Cong N, Luo W H, Zhang X N, Yang R F 2024 *Inf. Commun. Technol. Policy* **50** 85 (in Chinese) [贾春阳, 陈雪花, 丛楠, 罗文浩, 张笑楠, 杨仁福 2024 *信息通信技术与政策* **50** 85]
- [7] Kumar S, Fan H, Kübler H, Sheng J T, Shaffer J P 2017 *Sci. Rep.* **7** 42981
- [8] Berweger S, Artusio-Glimpse A B, Rotunno A P, Prajapati N, Christesen J D, Moore K R, Simons M T, Holloway C L 2023 *Phys. Rev. Appl.* **20** 054009
- [9] Hu J L, Li H Q, Song R, Bai J X, Jiao Y C, Zhao J M, Jia S T 2022 *Appl. Phys. Lett.* **121** 014002
- [10] Fan H Q, Kumar S, Sheng J T, Shaffer J P, Holloway C L, Gordon J A 2015 *Phys. Rev. Appl.* **4** 044015
- [11] Prajapati N, Robinson A K, Berweger S, Simons M T, Artusio-Glimpse A B, Holloway C L 2021 *Appl. Phys. Lett.* **119** 214001
- [12] Prajapati N, Berweger S, Rotunno A P, Artusio-Glimpse A B, Schlossberger N, Shylla D, Watterson W J, Simons M T, LaMantia D, Norrgard E B, Eckel S P, Holloway C L 2024 *AVS Quantum Sci.* **6** 034401
- [13] Liao K Y, Tu H T, Yang S Z, Chen C J, Liu X H, Liang J, Zhang X D, Yan H, Zhu S L 2020 *Phys. Rev. A* **101** 053432
- [14] Degen C L, Reinhard F, Cappellaro P 2017 *Rev. Mod. Phys.* **89** 035002
- [15] Kumar S, Fan H, Kübler H, Jahangiri A J, Shaffer J P 2017 *Opt. Express* **25** 8625
- [16] Dixon K, Nickerson K, Booth D W, Shaffer J P 2023 *Phys. Rev. Appl.* **19** 034078
- [17] Prajapati N, Bhusal N, Rotunno A P, Berweger S, Simons M T, Artusio-Glimpse A B, Ju Wang Y, Bottomley E, Fan H, Holloway C L 2023 *J. Appl. Phys.* **134** 023101
- [18] Simons M T, Haddab A H, Gordon J A, Novotny D, Holloway C L 2019 *IEEE Access* **7** 164975
- [19] Mao R Q, Lin Y, Yang K, An Q, Fu Y Q 2023 *Antennas Wirel. Propag. Lett.* **22** 352
- [20] Anderson D A, Sapiro R E, Raithel G 2021 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **69** 2455
- [21] Anderson D A, Raithel G, Simons M, Holloway C L 2017 arXiv: 1712.08717 [physics.atom-ph]
- [22] Holloway C L, Simons M T, Gordon J A, Wilson P F, Cooke C M, Anderson D A, Raithel G 2017 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **59** 717
- [23] Zhang P, Yuan S X, Jing M Y, Yuan J P, Zhang H, Zhang L 2024 *IEEE Photonics J.* **16** 1
- [24] Shi Y S, Ouyang K, Ren W, Li W M, Cao M, Xue Z H, Shi M 2023 *Opt. Express* **31** 18931
- [25] Song Z F, Feng Z G, Liu X M, Li D B, Zhang H, Liu J S, Zhang L J 2017 *Antennas Wirel. Propag. Lett.* **16** 1589
- [26] Wade C G, Šibalić N, De Melo N R, Kondo J M, Adams C S, Weatherill K J 2017 *Nat. Photonics* **11** 40
- [27] Elgee P K, Hill J C, LeBlanc K J E, Ko G D, Kunz P D, Meyer D H, Cox K C 2023 *Appl. Phys. Lett.* **123** 084001
- [28] Fan H Q, Kumar S, Daschner R, Kübler H, Shaffer J P 2014 *Opt. Lett.* **39** 3030
- [29] Meyer D H, Kunz P D, Cox K C 2021 *Phys. Rev. Appl.* **15** 014053
- [30] Artusio-Glimpse A, Simons M T, Prajapati N, Holloway C L 2022 *IEEE Microwave* **23** 44
- [31] Cui M Y, Zeng Q S, Huang K B 2026 *IEEE Commun. Mag.* **64** 146
- [32] Huang W, Liang Z T, Du Y X, Yan H, Zhu S L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 160702 (in Chinese) [黄巍, 梁振涛, 杜炎雄, 颜辉, 朱诗亮 2015 *物理学报* **64** 160702]
- [33] Liu B, Zhang L H, Liu Z K, Deng Z A, Ding D S, Shi B S, Guo G C 2023 *Electromag. Sci.* **1** 0020151
- [34] Schlossberger N, Prajapati N, Berweger S, Rotunno A P, Artusio-Glimpse A B, Simons M T, Sheikh A A, Norrgard E B, Eckel S P, Holloway C L 2024 *Nat. Rev. Phys.* **6** 606
- [35] Wu J Y, Yang J, Gao W C, Zhang Y F 2023 *Infrared Laser Eng.* **52** 20230264 (in Chinese) [吴金云, 杨剑, 高伟超, 张引发 2023 *红外与激光工程* **52** 20230264]
- [36] Yuan J P, Yang W G, Jing M Y, Zhang H, Jiao Y C, Li W B, Zhang L J, Xiao L T, Jia S T 2023 *Rep. Prog. Phys.* **86** 106001
- [37] Cai Y F, Shi S, Zhou Y J, Yu J H, Tian Y L, Li Y T, Zhang K, Du C H, Li W B, Li L 2022 *Front. Phys.* **18** 12302
- [38] Volakis J L 2007 *Antenna Engineering Handbook* (McGraw-Hill Education)
- [39] Stutzman W L, Thiele G A 2012 *Antenna Theory and Design* (Hoboken: Wiley)
- [40] McLean J S 1996 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **44** 672
- [41] Wheeler H A 1947 *Proc. IRE* **35** 1479
- [42] Chu L J 1948 *J. Appl. Phys.* **19** 1163
- [43] Sayrin C, Dotsenko I, Zhou X, Peaudecerf B, Rybarczyk T, Gleyzes S, Rouchon P, Mirrahimi M, Amini H, Brune M, Raimond J M, Haroche S 2011 *Nature* **477** 73
- [44] Backes K M, Elgee P K, LeBlanc K J, Fancher C T, Meyer D H, Kunz P D, Malvania N, Nicolich K L, Hill J C, Marlow B L S, Cox K C 2024 *Appl. Phys. Lett.* **125** 144002
- [45] Gallagher T F 1994 *Rydberg Atoms* (Cambridge: Cambridge University Press)
- [46] Robertson E J, Šibalić N, Potvliege R M, Jones M P A 2021 *Comput. Phys. Commun.* **261** 107814
- [47] Šibalić N, Pritchard J D, Adams C S, Weatherill K J 2017 *Comput. Phys. Commun.* **220** 319
- [48] Holloway C L, Gordon J A, Jefferts S, Schwarzkopf A, Anderson D A, Miller S A, Thaicharoen N, Raithel G 2014 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 6169
- [49] Jing M Y, Hu Y, Ma J, Zhang H, Zhang L J, Xiao L T, Jia S T 2020 *Nat. Phys.* **16** 911
- [50] Cai M H, Xu Z S, You S H, Liu H P 2022 *Photonics* **9** 250

- [51] Simons M T, Haddab A H, Gordon J A, Holloway C L 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 114101
- [52] Sedlacek J A, Schwettmann A, Kübler H, Löw R, Pfau T, Shaffer J P 2012 *Nat. Phys.* **8** 819
- [53] Jia F D, Liu X B, Mei J, Yu Y H, Zhang H Y, Lin Z Q, Dong H Y, Zhang J, Xie F, Zhong Z P 2021 *Phys. Rev. A* **103** 063113
- [54] Li Z H, Hao D S, Yang W H, Liu X, Wen H F, Guo H, Zhang Y J, Tang J, Liu J 2022 *Jpn. J. Appl. Phys.* **61** 096002
- [55] Zhang L H, Liu Z K, Liu B, Zhang Z Y, Guo G C, Ding D S, Shi B S 2022 *Phys. Rev. Appl.* **18** 014033
- [56] Ding D S, Liu Z K, Shi B S, Guo G C, Mølmer K, Adams C S 2022 *Nat. Phys.* **18** 1447
- [57] Zhang P, Jing M Y, Wang Z, Peng Y, Yuan S X, Zhang H, Xiao L T, Jia S T, Zhang L J 2023 *EPJ Quantum Technol.* **10** 39
- [58] Liu B, Zhang L H, Wang Q F, Ma Y, Han T Y, Liu Z K, Zhang Z Y, Shao S Y, Zhang J, Li Q, Chen H C, Han Y L, Ding D S, Shi B S 2025 *Chin. Phys. Lett.* **42** 053201
- [59] Hu J L, Jiao Y C, Yin Y W, Lu C, Bai J X, Jia S T, Li W B, Bai Z Y, Zhao J M 2025 *Phys. Rev. A* **112** L020801
- [60] Fan H Q, Kumar S, Sedlacek J, Kübler H, Karimkashi S, Shaffer J P 2015 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **48** 202001
- [61] Deb A B, Kjærgaard N 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 211106
- [62] Holloway C L, Simons M T, Haddab A H, Williams C J, Holloway M W 2019 *AIP Adv.* **9** 065110
- [63] Wu Y H, Xiao D P, Zhang H Q, Yan S 2025 *Chin. Phys. B* **34** 013201
- [64] Jiao Y C, Han X X, Fan J B, Raithele G, Zhao J M, Jia S T 2019 *Appl. Phys. Express* **12** 126002
- [65] Song D N, Jiao Y C, Hu J L, Yin Y W, Li Z H, He Y H, Bai J X, Zhao J M, Jia S T 2024 *Appl. Phys. Lett.* **125** 194001
- [66] Yang K, Sun Z S, Mao R Q, Lin Y, Liu Y, An Q, Fu Y Q 2022 *Chin. Opt. Lett.* **20** 081203
- [67] Holloway C, Simons M, Haddab A H, Gordon J A, Anderson D A, Raithele G, Voran S 2021 *IEEE Antennas Propag. Mag.* **63** 63
- [68] Shannon C E 1948 *Bell Syst. Techn. J.* **27** 379
- [69] Shannon C E 1949 *Proc. IRE* **37** 10
- [70] Bohaichuk S M, Booth D, Nickerson K, Tai H, Shaffer J P 2022 *Phys. Rev. Appl.* **18** 034030
- [71] Prajapati N, Rotunno A P, Berweger S, Simons M T, Artusio-Glimpse A B, Voran S D, Holloway C L 2022 *AVS Quantum Sci.* **4** 035001
- [72] Hu J L, Jiao Y C, He Y H, Zhang H, Zhang L J, Zhao J M, Jia S T 2023 *EPJ Quantum Technol.* **10** 51
- [73] Knarr S H, Bucklew V G, Langston J, Cox K C, Hill J C, Meyer D H, Drakes J A 2023 *IEEE Trans. Quantum Eng.* **4** 3500108
- [74] Artusio-Glimpse A B, Long D A, Bresler S M, Prajapati N, Shylla D, Rotunno A P, Simons M T, Berweger S, Schlossberger N, LeBrun T W, Holloway C L 2024 arXiv: 2402.17942 [physics.atom-ph]
- [75] Bresler S M, Long D A, Artusio-Glimpse A B, Prajapati N, Shylla D, Rotunno A P, Simons M T, Berweger S, Schlossberger N, LeBrun T W, Holloway C L 2024 *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM) Denver, CO, USA, July 8–12, 2024* p1
- [76] Yang B W, Yan Y H, Li X J, Xiao L, Li X L, Chen L Q, Deng J L, Cheng H D 2024 *Phys. Rev. Appl.* **21** L031003
- [77] Meyer D H, Cox K C, Fatemi F K, Kunz P D 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 211108
- [78] Cox K C, Meyer D H, Fatemi F K, Kunz P D 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 110502
- [79] Wen W, Yan S C, Wang R Q, Li X Y, Tan J J, Pang X Y, Zhai W L, Cui W Z, Gao Y S 2024 *Opt. Express* **32** 42872
- [80] Holloway C L, Simons M T, Gordon J A, Novotny D 2019 *Antennas Wirel. Propag. Lett.* **18** 1853
- [81] Song Z F, Liu H, Liu X, Zhang W, Zou H, Zhang J, Qu J 2019 *Opt. Express* **27** 8848
- [82] Li H Q, Hu J L, Bai J X, Shi M, Jiao Y C, Zhao J M, Jia S T 2022 *Opt. Express* **30** 13522
- [83] Lin Y Y, She Z Y, Chen Z W, Li X Z, Zhang C X, Liao K Y, Zhang X D, Chen J H, Huang W, Yan H, Zhu S L 2025 *Fundament. Res.* **5** 970
- [84] Xie Y P, Lei M W, Zhang J Q, Dong W B, Shi M 2025 *Electronics* **14** 1041
- [85] Menchetti M, Bussey L W, Gilks D, Whitley T, Constantinou C, Bongs K 2023 *J. Appl. Phys.* **133** 014401
- [86] Yuan J P, Jin T, Yan Y, Xiao L T, Jia S T, Wang L R 2024 *EPJ Quantum Technol.* **11** 2
- [87] Yuan J P, Jin T, Xiao L T, Jia S T, Wang L R 2023 *Antennas Wirel. Propag. Lett.* **22** 2580
- [88] Anderson D A, Gonçalves L F, Raithele G, Detlefs J 2024 *IEEE INC-USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium) Florence, Italy, July 14–19, 2024* p249
- [89] Chen M Z, Mao T Q, Zhao Y, Xiao W, Zheng D Z, Wang Z C, Zhang J, Chen S 2025 *IEEE Commun. Mag.* **63** 104
- [90] Shi Y C, Zhu C J, Wu J Y, Yang J, Zhang Y F 2024 *Phys. Rev. A* **110** 033517
- [91] Zou H Y, Song Z F, Mu H H, Feng Z G, Qu J F, Wang Q L 2020 *Appl. Sci.* **10** 1346
- [92] Cai Y F, Shi S, Zhou Y J, Li Y T, Yu J H, Li W B, Li L 2023 *Phys. Rev. Appl.* **19** 044079
- [93] Liu Z K, Zhang L H, Liu B, Zhang Z Y, Guo G C, Ding D S, Shi B S 2022 *Nat. Commun.* **13** 1997
- [94] Gonçalves L F, Zhang T, Raithele G, Anderson D A 2025 arXiv: 2412.16366 [physics.atom-ph]
- [95] Du Y J, Cong N, Wei X G, Zhang X N, Luo W H, He J, Yang R F 2022 *AIP Adv.* **12** 065118
- [96] Meyer D H, Hill J C, Kunz P D, Cox K C 2023 *Phys. Rev. Appl.* **19** 014025
- [97] You S H, Cai M H, Zhang H A, Xu Z S, Liu H P 2023 *Photonics* **10** 328
- [98] Allinson G, Jamieson M J, Mackellar A R, Downes L, Adams C S, Weatherill K J 2024 *Phys. Rev. Res.* **6** 023317
- [99] Wu H, Xie C W, Yao X Y, Wu K D, Wu S C, Ni R, Xiang G Y, Gong C 2025 *Opt. Express* **33** 52886
- [100] Cui M, Zeng Q, Chen M, Wang Z, Mao T, Zheng D, Huang K B 2026 arXiv: 2505.24168 [cs.IT]
- [101] Otto J S, Hunter M K, Kjærgaard N, Deb A B 2021 *J. Appl. Phys.* **129** 154503
- [102] Cui M, Zeng Q, Huang K B 2025 *IEEE J. Select. Areas Commun.* **43** 659
- [103] Cui M Y, Zeng Q S, Huang K B 2025 *ICC 2025 IEEE International Conference on Communications Montreal, QC, Canada, June 8–12, 2025* p4792
- [104] Gong T R, Yuen C, See C M S, Debbah M, Hanzo L 2025 arXiv: 2506.01355 [eess.SP]
- [105] Liu J Y, Ma Y, Tafazolli R 2025 arXiv: 2504.19170 [cs.IT]
- [106] Yuan S S A, Xu X Y I, Yuan J P, Xie G D, Huang C W, Chen X M, Huang Z X, Sha W E I 2025 *Antennas Wirel. Propag. Lett.* **24** 1839
- [107] Meyer D H, Castillo Z A, Cox K C, Kunz P D 2020 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **53** 034001
- [108] Jau Y Y, Carter T 2020 *Phys. Rev. Appl.* **13** 054034

## REVIEW

# Advancements in Rydberg atom-based communication receivers<sup>\*</sup>

CAI Yafen<sup>1)2)</sup> KONG Xiangyan<sup>1)2)†</sup>

1) (*Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China*)

2) (*The Institute for Future Wireless Research (iFWR), Ningbo University, Ningbo 315211, China*)

( Received 27 October 2025; revised manuscript received 6 February 2026 )

## Abstract

Over the past decades, significant progress has been made in Rydberg-atom-based electrometry. Electric field measurement with Rydberg atoms features high sensitivity and self-calibration. It has proven to be an excellent quantum receiver for microwave communications. The Rydberg atomic receiver has several advantages: the non-metallic atomic probe does not interfere with the field to be measured, and non-destructive communication can be achieved. The Rydberg atomic sensor converts high-frequency microwaves into spectral detection; thereby, the microwave electric field modulation is directly mapped to the atomic spectrum. Therefore, the all-optical detection scheme makes the atomic receiver demodulation circuit-free and immune to electromagnetic interference. Moreover, the operational bandwidth of the Rydberg atomic receiver can span from MHz to THz by selecting different Rydberg energy levels. Last but not least, the instantaneous bandwidth of the Rydberg atomic receiver is not limited by the size of the antenna, because the Rydberg atomic receiver breaks a key assumption behind the Chu limit.

Significant advances have been achieved in Rydberg atomic receivers. This paper provides a comprehensive overview of advancement in Rydberg atomic-based communication receivers. The Rydberg atomic-based communication receivers are systematically classified into three main categories: single-channel Rydberg atomic receivers, frequency-division multiplexing (FDM) receivers, and multiple-input multiple-output (MIMO) multiplexing communication receivers. For the single-channel Rydberg atomic receivers, researchers have successfully realized both analog and digital communications by using amplitude modulation, frequency modulation, and phase modulation schemes within Rydberg atomic receiver systems. Meanwhile, the instantaneous bandwidth of the Rydberg atomic receivers and its emerging applications in 5G wireless communication is explored. The shortcoming of Rydberg atomic receivers is mainly reflected in insufficient instantaneous bandwidth ( $\sim 10$  MHz), which limits the channel capacity of the receiver system. To enhance the channel capacity, frequency-division multiplexing (FDM) and multiple-input multiple-output (MIMO) communications based on Rydberg atomic receivers have been investigated and demonstrated. As for frequency-division multiplexing (FDM) based on Rydberg atomic receivers, both standard FDM and multi-band FDM Rydberg atom receiver schemes and progresses are presented. Last but not least, the MIMO-based multiplexing scheme is also introduced to enhance spectral efficiency and system capacity. The above-mentioned achievements have laid the foundation for the future integration of Rydberg atomic receiver technology into existing 5G wireless communication systems.

The future development of Rydberg atomic receivers focus on the following four aspects. First, in the

<sup>\*</sup> Project supported by the National Science and Technology Major Project for Deep Earth Probe and Mineral Resources Exploration (Grant No. 2024ZD1002700) and the Innovation 2030 Program for Quantum Science and Technology (Grant No. 2024ZD0301300).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [kongxiangyan@nbu.edu.cn](mailto:kongxiangyan@nbu.edu.cn)

transmission model of a Rydberg atom receiver, it is necessary to consider not only the interaction between Rydberg atoms and microwave fields but also the Rydberg-Rydberg interaction, which also influences the dynamics of quantum states. Secondly, in the frequency-division multiplexing communication system, the master equation of the Rydberg atom system becomes complex and difficult to solve. In the future, deep learning models may provide effective solutions for understanding and optimizing Rydberg atomic receiver systems. Third, all-optical Rydberg atomic receivers offer excellent scalability; therefore, multiple-input multiple-output (MIMO) Rydberg atom receiver system is promising. Finally, Rydberg atomic communication receivers are expected to be integrated into existing wireless communication systems, improving the communication range of wireless communications.

**Keywords:** Rydberg atom, electromagnetically induced transparency, communication receiver

**DOI:** [10.7498/aps.75.20251465](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251465)

**CSTR:** [32037.14.aps.75.20251465](https://cstr.net/urn:cnki:sic:32037.14.aps.75.20251465)

## 基于里德伯原子的通信接收机进展

蔡亚芬 孔祥燕

### Advancements in Rydberg atom-based communication receivers

CAI Yafen KONG Xiangyan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 090301 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251465

CSTR: 32037.14.aps.75.20251465

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251465>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于里德伯原子的Loran-C信号接收

Reception of Loran-C signals based on Rydberg atoms

物理学报. 2026, 75(3): 090301 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20250900>

#### 基于信道容量准则的里德伯原子接收机参数优化

Parameter optimization of Rydberg atomic receiver based on channel capacity criterion

物理学报. 2025, 74(22): 220701 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250944>

#### 基于里德伯原子电场量子测量方法及激光偏振影响分析

Rydberg atom electric field based quantum measurement method and polarization influence analysis

物理学报. 2025, 74(4): 043201 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241362>

#### 基于电磁诱导透明-奥拓汤斯分裂的 $^{133}\text{Cs}$ 原子里德伯态跃迁频率精密测量

Precision measurement of Rydberg state transition frequency of  $^{133}\text{Cs}$  atom based on EIT-AT splitting

物理学报. 2026, 75(5): 043201 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251614>

#### 基于里德伯原子天线的低频电场波形测量

Measurement of low-frequency electric field waveform by Rydberg atom-based sensor

物理学报. 2024, 73(7): 070201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231778>

#### 射频场缀饰的直流电场Floquet-电磁诱导透明光谱特性研究

Spectral characteristics of Floquet-electromagnetically induced transparency dressed by radio frequency field in a direct current electric field

物理学报. 2025, 74(8): 083201 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250052>