

面向 6G 无线通信的里德堡原子天线：技术架构与应用前瞻

王莹^{1,2}, 郭余庆^{1,2}, 郭旭枫^{1,2}, 张平^{1,2}

(1. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876; 2. 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室, 北京 100876)

摘要: 里德堡原子天线凭借碱金属原子 (如铷和铯) 的高能级激发态 (即里德堡态) 对电磁波的高灵敏度响应特性, 能够实现对特定频率窄带电磁波振幅、频率和相位的精确测量。与传统天线相比, 里德堡原子天线展现出了诸多适用于下一代 6G 无线通信系统的良好特性, 包括超宽带调谐特性、窄带响应特性、无热噪声特性和极高的灵敏度。首先, 通过阐释里德堡原子的量子模型, 揭示了里德堡原子天线的工作机理。随后, 对其噪声来源进行系统分析, 凸显出相较传统导体天线的显著低噪声优势。在此基础上, 总结了该天线在无线通信与感知领域的应用与研究进展, 并基于其低噪声和高灵敏度特性提出了未来的应用前景。

关键词: 里德堡原子; 原子天线; 量子传感; 噪声功率

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2025124

Rydberg atomic antennas for 6G wireless communications: technical architecture and application prospects

WANG Ying^{1,2}, GUO Yuqing^{1,2}, GUO Xufeng^{1,2}, ZHANG Ping^{1,2}

1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Rydberg atomic antennas can achieve ultra-precise measurement of the amplitude, frequency, and phase of narrowband electromagnetic (EM) waves with specific frequencies by utilizing the extremely sensitive EM response of the highly excited states, namely the Rydberg states, of alkali metal atoms (e.g., rubidium and cesium). Compared with traditional antennas, the Rydberg atomic antenna exhibits favorable engineering benefits toward 6G wireless communications systems, such as ultra-wideband detuning characteristics, narrowband filtering characteristics, thermal-noise-free characteristics, and extremely high sensitivity. Firstly, the quantum model of Rydberg atoms was elucidated to reveal the operating mechanism of Rydberg atomic antennas. Next, the noise sources were systematically analyzed, underscoring a markedly lower noise figure compared with conventional conductive antennas. Building on these findings, the antenna's applications and research progress in wireless communications and sensing were summarized, and future prospects were proposed that capitalize on its low-noise and high-sensitivity characteristics.

Keywords: Rydberg atom, atomic antenna, quantum sensing, noise power

0 引言

为了满足日益增长的无线通信服务需求, 特别是超低时延、超高数据传输速率和极低误码率的技

术指标, 2023 年 6 月, ITU 发布了 6G 的愿景、时间表、技术趋势和框架, 正式启动 6G 标准化进程。IMT-2030 (6G) 已提出部分 6G 无线通信系统的关键

收稿日期: 2025-03-05; 修回日期: 2025-06-26

通信作者: 王莹, wangying@bupt.edu.cn

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目 (No.QY24195)

Foundation Item: Beijing Natural Science Foundation (No.QY24195)

绩效指标, 预计 6G 将实现数据传输速率从 Gbit/s 级提高至 Tbit/s 级、时延从毫秒级降低至亚毫秒级、可靠性从 99.999% 提升至 99.999 99% 以及连接密度增加 10 倍^[1]。现有的 5G 传统射频 (RF, radio frequency) 接收机在应对 6G 愿景中对空口传输技术的频谱效率、能量效率、覆盖范围和接收灵敏度的颠覆性指标需求时, 已遇到诸多挑战^[2]。

从根本上来说, 噪声是限制无线通信系统信息传输速率的根本原因^[3]。对于传统无线接收机而言, 其噪声源涵盖外部电磁干扰、天线热噪声、射频电路引起的非线性失真以及模数转换器 (ADC, analog-digital converter) 引起的量化误差^[4]。一方面, 得益于近年来电路技术的不断进步, 射频电路引起的非线性失真和 ADC 引起的量化误差足以忽略^[5-6]。另一方面, 在不存在小区间干扰的情况下, 来自宇宙背景辐射和大气层辐射的天空噪声功率也远小于天线热噪声功率^[7]。因此, 天线热噪声通常被认为是现有无线接收机的主要噪声源^[8]。天线热噪声源自电子的随机热运动, 其功率谱密度为 $N_0 = kT$, 其中 k 表示玻尔兹曼常数, T 表示等效噪声温度, 其通常不低于室温 290 开尔文 (K)^[9]。因为电子的随机热运动无法人为干预, 所以天线热噪声是限制传统无线接收机性能的重要瓶颈。

得益于量子传感技术的进步, 利用里德堡原子作为接收天线的里德堡原子天线技术近年来受到了学术界和工业界的广泛关注^[10-13]。里德堡原子通常是铯和铷等碱金属原子^[14], 其特征在于拥有一个几乎电离的高度激发电子, 具有类似氢原子的特性^[15]。根据卢瑟福-玻尔模型, 高度激发电子和原子核一起构成了具有很大电偶极矩的对入射电磁波极为敏感的系统^[16-18], 这种对电磁波的敏感特性是里德堡原子接收机性能增益的核心来源。具体来讲, 里德堡原子对特定频率的窄带电磁波表现出了极为灵敏的响应特性^[16-18]。这种对特定频率的窄带敏感特性基于电磁波的波粒二象性和能量守恒定律, 即入射电磁波对应的光子能量必须与特定能级跃迁的能量差相匹配^[16-18]。由于里德堡原子接收机的物理机制是特定频率的入射窄带电磁波诱导的能级跃迁, 而电子的随机热运动只会改变原子和电子的位置却不会改变其能级, 因此里德堡原子天线的主要噪声源并非电子的随机热运动产生的热噪声, 具有突破现有接收机噪声功率下限的潜力^[19-21]。通

过使用里德堡原子天线技术, 无线通信系统可以在不增加发射功率的情况下, 通过显著降低接收机噪声功率以提升信噪比 (理想情况下可提升约 30~40 dB^[22]), 从而大幅提升无线通信系统的信息传输速率和微弱信号检测能力。

里德堡原子天线技术的另一项显著优势是能够突破天线的体积限制实现超宽带调谐^[23-24]。对传统天线而言, 当天线的长度与所发射或接收的电磁波的波长相当时, 对应电磁波才能在天线上产生有效振荡, 进而激发电流输入射频电路。因此, 传统天线受限于其几何尺寸, 只能工作于较窄的频率范围而无法工作于超宽带的频率范围。相比之下, 里德堡原子天线不需要更改任何硬件, 只需要激发碱金属原子到不同的激发态, 即可在短波 (如 9.81 MHz^[25]) 到甚高频 (如 223.7 MHz^[26]) 到 4G 频段 (2.06 GHz^[27]) 到毫米波 (29.5 GHz^[28]) 到亚太赫兹 (如 104.77 GHz^[29]) 甚至太赫兹 (如 338.75 GHz^[30]) 的极宽频率范围内的大量离散频点上进行调谐。也就是说, 里德堡原子天线能够灵活地满足超宽带调谐的需求, 而这是传统天线无法实现的。在接收机硬件难以调整 (如航天设备^[10])、低频通信和感知^[31]、超宽带通信^[13] 等应用场景下, 里德堡原子天线能够以较小的硬件空间进行灵活的通信频率适配。需要强调的是, 若不采取额外的带宽增强手段, 里德堡原子天线在每个离散频点上只能接收以该离散频率为中心的窄带信号。例如, 若不采取额外的带宽增强手段, 里德堡原子天线在 2.904 GHz 的离散频点附近, 只能对带宽不到 200 kHz 的窄带信号展现出高灵敏度的响应^[32]。现有文献中有关里德堡原子天线的带宽扩展方法将会在第 5 节详细阐述, 在此不再赘述。

需要强调的是, 本文中展示的有关里德堡原子天线动力学的图形, 都是通过数值求解文献^[33]中含有林德布拉德算符的刘维尔-冯·诺依曼方程得到的, 这使本文的图片具有极为严格的数学和物理理论基础。

1 里德堡原子天线工作原理

如图 1 所示, 里德堡原子天线的组成包括充满碱金属原子蒸气的蒸气室、探测激光、耦合激光、激光接收器, 以及可选的本振 (LO, local oscillator) 信号发生器 (将在第 1.3 节中详细介绍)。当

探测激光和耦合激光均关闭时, 碱金属原子处于基态, 用狄拉克符号 $|1\rangle$ 表示^[16]。探测激光将碱金属原子从基态激发到介于基态和里德堡态之间的过渡态(如主量子数 $n = 20$ 的激发态^[13]), 用狄拉克符号 $|2\rangle$ 表示。耦合激光将碱金属原子从过渡态激发到一个里德堡态(如主量子数 $n = 52$ 的激发态^[34], 不同里德堡态能够接收射频信号的频点各不相同), 用狄拉克符号 $|3\rangle$ 表示。待探测的特定频率的入射电磁波能够将碱金属原子从里德堡态 $|3\rangle$ 激发到一个更高的里德堡态 $|4\rangle$ 。假设 $|1\rangle$ 、 $|2\rangle$ 、 $|3\rangle$ 和 $|4\rangle$ 对应能级的能量(单位为 J)分别为 E_1 、 E_2 、 E_3 和 E_4 。根据光的波粒二象性和能量守恒定律^[35], 探测激光(单色)的频率 f_p (单位为 Hz)满足 $f_p \approx \frac{E_2 - E_1}{h}$, 其中 $h \approx 6.63 \times 10^{-34}$ J/Hz 为普朗克常量。耦合激光(单色)的频率 f_c 满足 $f_c \approx \frac{E_3 - E_2}{h}$ 。待探测窄带射频电磁波的频率 $f_{RF} \approx \frac{E_4 - E_3}{h}$ 。探测激光和耦合激光的频率都可以使用基于庞德-德雷弗-霍尔技术的超稳腔维持稳定^[36]。此外, 探测激光的功率通常远小于耦合激光的功率(如 50 mW 的耦合激光与 360 μ W 的探测激光^[37]), 从而使碱金属原子处于基态的概率接近于 1^[35]。激光接收器用于接收探测激光穿过蒸气室被原子吸收之后的光束, 其接收到的光功率为 $P_0 = P_I T$, 其中 P_I 为探测激光的发射功率, $T \in (0, 1)$ 为探测激光穿过原子团的透射系数。根据比尔-兰伯特定律^[38], 探测激光穿过原子团的透射系数由 $T = \exp[-k_p L \text{Im}(\chi)]$ 给出, 其中 k_p 为探测激光的波数, L 为探测激光穿过原子团的长度(若探测激光传播方向与蒸气室径向

平行, 则等于蒸气室的长度), χ 为原子团对探测激光的磁化率^[35]。当携带信号的入射窄带电磁波的振幅和频率发生改变时, 原子团对探测激光的磁化率 χ 也会随之改变, 进而影响探测激光穿过原子团的透射系数和接收光功率^[29]。因此, 入射电磁波携带的信息可以被加载到探测激光在透射蒸气室之后的强度变化上, 这样的磁化率-光强响应关系是里德堡原子天线工作的核心机制。

本文按照探测方式的不同, 将里德堡原子天线详细划分为以下 5 种类型。

1.1 分光探测型里德堡原子天线

分光探测型里德堡原子天线(曾被用作电场强度精密测量装置^[23,28-29,39])基于电磁诱导透明(EIT, electromagnetic induced transparency)和奥特莱-汤斯分光(ATS, Autler-Townes splitting) 2 种量子光学现象探测入射电磁波的振幅^[16-18]。具体来说, 当探测激光处于共振状态, 也就是将探测激光锁频, 使其相对于能级跃迁频率的偏移为 0, 即 $\Delta_p = f_p - \frac{E_2 - E_1}{h} = 0$, 且不存在待探测电磁波时, 通过改变耦合激光的频率偏移 $\Delta_c = f_c - \frac{E_3 - E_2}{h}$, 可以在 $\Delta_c = 0$ 处观测到探测激光的透射峰, 即 EIT 现象, 如图 2 所示。当存在待探测射频信号 $E_{RF} \cos(2\pi f_{RF} t + \varphi)$ 时, EIT 现象会演变为 ATS 现象。在这种情况下, 通过扫描耦合激光的频率偏移 Δ_c 可以观察到探测激光的 2 个透射峰, 其对应的耦合激光频率偏移分别位于

$$\Delta_c = \frac{\pm \sqrt{\Omega_{RF}^2 + \Delta_{RF}^2} - \Delta_{RF}}{2} \quad (1)$$

其中, Ω_{RF} 为待探测射频信号的拉比频率, 其计算

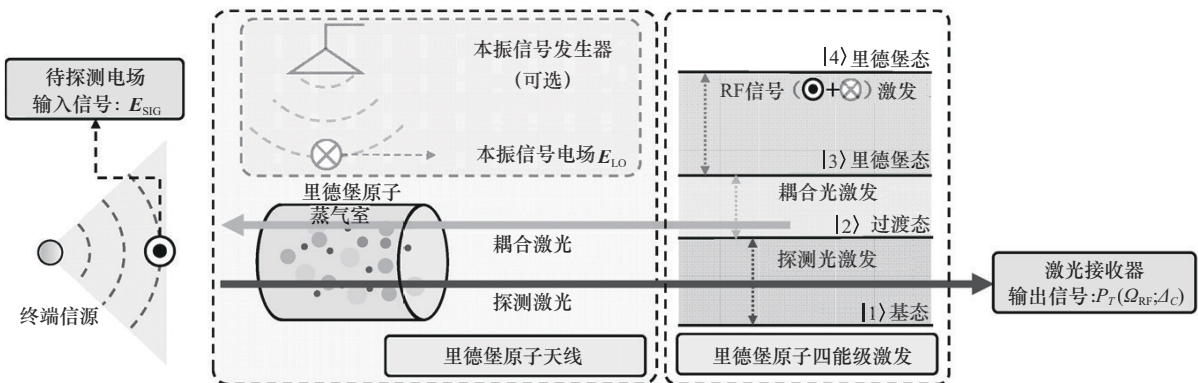


图 1 里德堡原子天线的硬件构成与能级跃迁原理

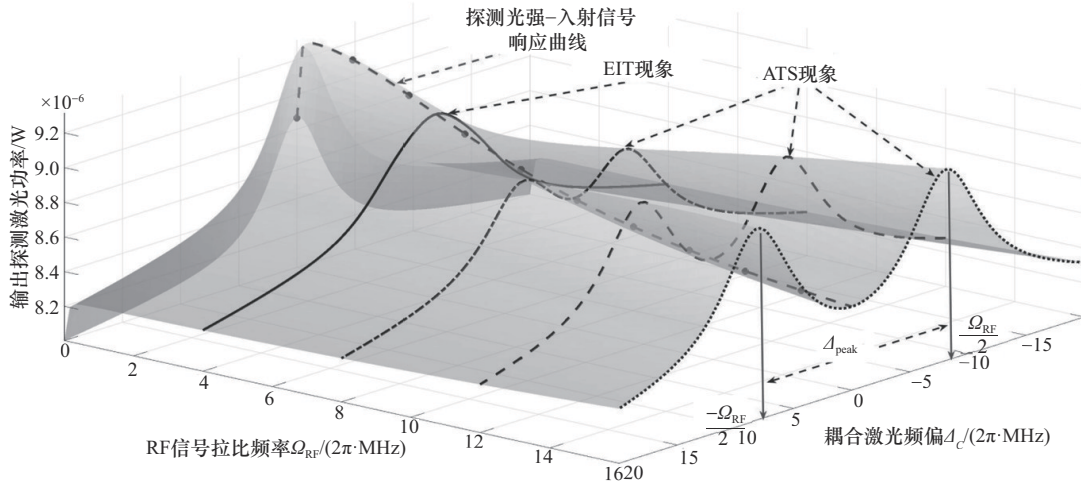


图2 里德堡原子天线核心机制:对EIT和ATS现象的有效利用

方式为 $\Omega_{RF} = \frac{|E_{RF}| \mu_{RF}}{\hbar}$ 。其中 μ_{RF} 为 $|3\rangle \leftrightarrow |4\rangle$ 能级跃迁对应的原子偶极矩^[29]。入射电磁波的频率偏移 $\Delta_{RF} = f_{RF} - \frac{E_4 - E_3}{h}$ 。当 $\Delta_{RF} = 0$ 时, 探测激光的 2 个透射峰对应的耦合激光频率偏移分别位于 $\Delta_c = \pm \frac{\Omega_{RF}}{2}$, 如图 2 所示, 此时 2 个透射峰之间的频率间隔为 $\Delta_{\text{peak}} = \Omega_{RF} \propto |E_{RF}|$ 。注意到 Ω_{RF} 和 $|E_{RF}|$ 之间存在线性正比关系, 因此这种情况下待探测信号电场振幅等效于分光间隔。当 $\Delta_{RF} \neq 0$ 时, 探测激光 2 个透射峰之间的耦合激光频率间隔为

$$\Delta_{\text{peak}} = \sqrt{\Omega_{RF}^2 + \Delta_{RF}^2} \quad (2)$$

也就是说, 图 2 中 2 个透射峰之间的频率间隔包含了待探测信号的电场振幅和频率失谐信息。

通过扫描耦合激光的频率并求出探测激光 2 个透射峰之间的频率间隔 Δ_{peak} , 即可用于接收幅度调制和频率调制信号。这种根据透射峰频率间隔推断入射信号振幅和频率的里德堡原子天线^[16-18]称为分光探测型里德堡原子天线。然而, 分光探测型里德堡原子天线有以下几项重要局限。首先, 分光探测型里德堡原子天线无法直接探测信号的相位, 其接收信号 Δ_{peak} 是实信号而非由同相分量-正交分量(即 I-Q 分量)组合而成的复信号, 所以发射信号和接收信号之间的互信息是复信号情况下的二分之一^[17]。尽管有文献提出通过部署本地振荡器使本振信号与入射信号相互干涉可以在算法层面辅助推断入射信号的相位^[16], 但从信息论的角度来看, 这种手段并没有突破互信

息减半的限制^[17]。其次, 分光探测型里德堡原子天线的分辨率依赖于探测 Δ_{peak} 时光谱的扫频分辨率, 会导致扫频持续时间过长, 从而限制实际通信(感知)系统中能够传输(探测)的符号速率。并且在光场噪声和光子散粒噪声的影响下, 从光谱中恢复透射峰频率间隔的过程会引入较大的测量误差, 如图 3 所示。特别是文献[40]通过实验测得, 从有噪光谱中恢复透射峰频率间隔的误差大约有 15%, 这说明通过测量透射峰频率间隔来得到入射信号幅度的方法并不实用。此外, 当使用的基带信号波形不为正弦波时, 光谱谱线的形状会受到非线性扭曲^[33], 这进一步限制了分光探测型里德堡原子天线的精确度。

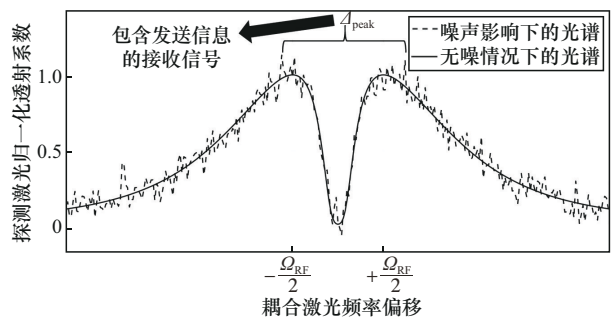


图3 从有噪光谱中计算频率间隔时会引入较大误差

1.2 直接探测型里德堡原子天线

直接探测型里德堡原子天线能够克服分光探测型里德堡原子天线依赖激光扫频的缺点。具体来讲, 直接探测型里德堡原子天线固定探测激光和耦合激光的频率, 利用探测激光的透射系数随入射电场振幅的非线性变化, 从接收激光功率推

断待探测信号的振幅。例如,文献[41]将探测激光和耦合激光的频率锁定在能级跃迁对应的频率差上,即 $\Delta_p = \Delta_c = 0$,不需要扫频即可根据探测激光的透射系数与入射电场振幅之间的非线性变化关系获取振幅信息。文献[42]研究了入射信号频率偏移对直接探测型里德堡原子天线的天线增益的影响,并提出了适当利用探测激光和耦合激光失谐以弥补入射信号失谐对天线增益的负面影响。文献[43]通过分析刘维尔-冯·诺依曼方程的近似解析解,进一步给出了能够使直接探测型里德堡原子天线达到最大天线增益的探测激光和耦合激光的频率偏移。然而,直接探测型里德堡原子天线仍然只能探测入射信号的幅度而无法探测其相位,所以其信道容量在相同信噪比下仍然仅为I-Q接收机信道容量的一半^[17]。

1.3 超外差型里德堡原子天线

为了克服分光探测型和直接探测型里德堡原子天线无法探测入射信号相位的重大缺点,超外差型里德堡原子天线于近年被提出^[44-46]。超外差型里德堡原子天线通过部署与入射信号频率差为 Δf 的本振信号 $E_{LO} \cos[2\pi(f_{RF} + \Delta f)t]$,将里德堡原子作为混频器^[47],以原子能级跃迁的本振频率特性,在原子层面将接收信号下变频到 Δf 的频率上。具体来说,当本振信号与入射信号极化方向相同时,蒸气室内的信号为两者的叠加,其表达式为

$$E_{RF} \cos(2\pi f_{RF} t + \varphi) + E_{LO} \cos[2\pi(f_{RF} + \Delta f)t] \quad (3)$$

根据和角公式和辅助角公式,当 $\Delta f \ll f_{RF}$ 时,叠加信号的表达式可以进一步化为

$$\cos(2\pi f_{RF} t + \varphi') \cdot \sqrt{E_{RF}^2 + E_{LO}^2 + 2E_{RF}E_{LO} \cos(2\pi \Delta f t - \varphi)} \quad (4)$$

这意味着

$$\Omega_{RF} \propto \sqrt{E_{RF}^2 + E_{LO}^2 + 2E_{RF}E_{LO} \cos(2\pi \Delta f t - \varphi)} \quad (5)$$

因此,当耦合光锁频(通常锁频为共振状态 $\Delta_c = 0$)时,接收光强的瞬时值会随着下变频得到的“中频信号” $E_{RF} \cos(2\pi \Delta f t - \varphi)$ 在线性动态范围^[38](LDR, linear dynamic range)内产生近似线性变化。对接收光强以 Δf 为中心频点在基带信号的带宽内窄带滤波,并将结果输入模拟锁相环或数字I-Q解调器,就能够以相同的振幅和相位重构原始信号。

当发送的基带信号 E_{RF} 变化缓慢、带宽很小时,超外差型里德堡原子天线具有优良的线性响应特性和较大的线性动态范围^[47],可以近乎完美地恢复射频信号的振幅和相位。然而,如同射频混频器一样,当发送的基带信号带宽较大时,会产生三阶互调和增益压缩现象,扭曲带宽较大的基带信号波形。超外差型里德堡原子天线的三阶互调截点、1 dB压缩点和线性动态范围的具体计算和分析在文献[38]中有详细讨论,在此不再赘述。

1.4 零差型里德堡原子天线

零差型里德堡原子天线是指本振信号与入射信号无频差,即 $\Delta f = 0$ 的特殊超外差型里德堡原子天线^[10,48-49]。此时,可以通过文献[35]中提出的组合优化技巧进一步增加探测灵敏度。然而,考虑到无线通信系统中的用户或无线感知中的探测目标均会以一定的速度相对基站或探测站移动,进而导致多普勒频移,入射信号与本振信号频率严格重合的情况在实际无线通信场景中并不常见^[50]。表1中详细列举了分光探测型、直接探测型、超外差型和零差型里德堡原子天线的特征指标差异和代表工作。

1.5 交流斯塔克型里德堡原子天线

分光探测型、直接探测型、超外差型和零差型里德堡原子天线都可以探测mV/m量级及更微弱的电场,但条件是待探测信号的频率必须接近 $\frac{E_4 - E_3}{h}$,即只能探测较窄频带范围内的信号。例如,文献[51]利用对应频率为12.52 GHz的能级跃迁探测幅度调制(AM, amplitude modulation)信号时,只有在信号频点与 $|3\rangle$ 和 $|4\rangle$ 能级本征频率的频差不大于10 MHz的情况下才能获得大于10 dB的信噪比。当待探测信号的频率与能级跃迁对应频率相差较远时,可以利用交流斯塔克效应探测电场强度^[39]。然而,只有幅度很大的电场(至少V/m量级^[11])才足以引发可被观测的交流斯塔克效应,只适合较高信噪比条件下的无线通信或感知。其优势在于,有拓宽里德堡原子天线工作频段的潜力,以充分利用无线通信或感知中的频谱资源。除了交流斯塔克效应之外,目前已有一些文献提出了扩展里德堡原子天线瞬时带宽的其他方法。这些方法将会在第5节详细阐述,在此不再赘述。

表1 4种里德堡原子天线的特征指标差异

天线类型	是否需要本振	本振频率是否严格等于入射频率	是否能探测相位	是否需要扫频	代表工作
分光探测型	否	—	否	是	文献[16]
直接探测型	否	—	否	否	文献[41]
超外差型	是	否	是	否	文献[45]
零差型	是	是	是	否	文献[48]

2 里德堡原子天线噪声分析

接收天线的噪声可以分为外部干扰和内部噪声。外部干扰包括天空噪声（来自大气层和宇宙的辐射^[52-53]）和小区间干扰^[54]。里德堡原子天线并不能抵抗外部干扰，就外部干扰而言其噪声与传统天线一致。因此，以下只讨论里德堡原子天线的内部噪声，即在接收信号过程中引入的噪声。里德堡原子天线的内部噪声有3个主要来源：原子数量随机涨落引起的原子散粒噪声、激光功率随机波动引起的光场噪声和激光接收器内部噪声^[11]。表2列举了里德堡原子天线的噪声来源。

表2 里德堡原子天线的噪声来源

噪声类别	具体来源	影响能否有效抑制
外部干扰	天空噪声 ^[52-53]	否
	小区间干扰 ^[54]	能
原子散粒噪声	原子数量随机涨落 ^[55]	否
光场噪声	激光功率随机波动 ^[48]	能
激光接收器内部噪声	热噪声 ^[9]	能
	1/f噪声 ^[56]	能
	光子散粒噪声 ^[56]	否

2.1 原子散粒噪声

如第1节所述，探测激光穿过蒸气室中原子团的透射系数 $T = \exp[-k_p L \text{Im}(\chi)]$ ，其中 χ 是原子团对探测激光的磁化率。原子团的磁化率 χ 与原子团中里德堡原子的平均密度 N_a （单位为 m^{-3} ）成正比^[33]。然而，存在于不同能级上的原子数相对于由刘维尔-冯·诺依曼方程^[33]确定的精确量子概率分布存在随机涨落，使原子团中处于里德堡态的原子数量存在随机波动。原子数量随机波动引入的噪声被称为原子散粒噪声^[7]、量子散粒噪声（QSN, quantum shot noise）^[19]或量子投影噪声（QPN, quantum projection noise）^[55]，通常建模为具有特

定功率谱密度的窄带白噪声^[11]。给定蒸气室的体积和探测激光穿过蒸气室的长度时，原子散粒噪声

的功率谱密度正比于 $\frac{h^2}{\mu_{\text{RF}}^2 \tau N_a}$ ^[7,19,55]，其中 τ 为里德堡

态的弛豫时间（如文献[19]报告的10~20 μs ）。里德堡原子的平均密度 N_a 与原子蒸气的气压有关，气压与温度的具体关系在文献[33]中有详细介绍。从

$\frac{h^2}{\mu_{\text{RF}}^2 \tau N_a}$ 可以看出，通过使用偶极矩 μ_{RF} 更大（即主量子数更大）的里德堡态（即主量子数更大的 $|3\rangle$ 和 $|4\rangle$ ）或增加里德堡原子的平均密度 N_a ，可以降低原子散粒噪声的噪声功率。需要注意的是，增加里德堡原子平均密度 N_a 的同时也会导致原子之间相互撞击的频率增加进而缩短弛豫时间^[35]，因此原子散粒噪声的抑制需要更加综合、精细的优化方式。

2.2 光场噪声

如第1节所述，激光接收器接收到的光功率 $P_O = P_I T$ ，其中 P_I 为探测激光的发射功率。然而，即便里德堡原子蒸气对探测激光的吸收系数完全不变，从蒸气室射出的探测激光的功率也并不是恒定的，而会受到激光器发射功率变化（如受到温度影响）和光路中光学组件的微小振动等因素影响^[11]。幸运的是，光场噪声可以利用光学干涉仪极大地抑制。例如，在文献[48]中，作者使用马赫-曾德尔干涉仪（MZI, Mach-Zehnder interferometer）结合零差检测技术，几乎消除了激光功率波动对里德堡原子天线的影

2.2 光场噪声

响。因此，光场噪声对里德堡原子天线的影

2.3 激光接收器内部噪声

激光接收器内部噪声主要来自激光接收器的第一级，即光电二极管的噪声^[56]，包括光子散粒噪声 w_s 、1/f噪声 $w_{1/f}$ 和热噪声 w_t 。在激光接收器内部噪声的影响下，经光电二极管转换后实际输入电路的光电流振幅正比于 $\eta P_O + w_s + w_{1/f} + w_t$ ，其中 η

为光电二极管的量子效率(如文献[56]中的65%)。光子散粒噪声 w_s 源自光电转换过程中载流子浓度围绕平均值发生的随机涨落,属于窄带白噪声。光子散粒噪声引起的光电流的功率谱密度正比于 $\frac{\eta P_O}{hf_p}$ 。1/f噪声来源于光电二极管表面的不均匀特性或杂质,在光电转换电流流过表面微粒时发生微火花放电^[7]。已有研究表明,通过改进工艺可以将1/f噪声抑制到低于200 Hz的频率^[56]。热噪声 w_t 的功率谱密度为 kT ,与激光功率无关,因此通过增加激光功率 P_O 可以消除热噪声对激光接收信噪比的影响^[11]。此外,当激光功率 P_O 足够大时,激光接收器施加的噪声功率由功率谱密度正比于 $\frac{\eta P_O}{hf_p}$ 的光子散粒噪声 w_s 主导^[56]。例如,文献[56]通过理论计算得出其实验中的光子散粒噪声功率为-76.5 dBm,与排除掉1/f噪声后的实测噪声功率几乎一致。此外,从文献[56]中给出的光子散粒噪声的功率谱密度可以看出,光子散粒噪声的功率与激光发射功率成正比。也就是说,通过增加激光功率难以显著抑制光子散粒噪声的影响。需要强调的是,尽管光子散粒噪声是限制文献[56]中采用方法的灵敏度的最重要因素,但光子散粒噪声并不源自里德堡原子本身的特性,所以并非不可有效抑制。例如,文献[57]采用一种非经典光子关联技术来显著降低光强测量中的光子散粒噪声。具体而言,文献[57]利用强泵浦光和弱探测光在铷原子蒸气中产生四波混频,从而使探测光和共轭光之间产生了量子关联,即它们的光强之差的噪声低于单光束的光子散粒噪声,并通过实验结果表明,利用该方法进行光强测量的噪声功率比用单光束进行光强测量的噪声功率降低了约5 dB。若将文献[57]采用的光子散粒噪声抑制方法和文献[36]使用的光学干涉仪和零差检测技术结合并应用到里德堡原子天线中,有望进一步降低接收机的总体噪声功率。

2.4 与传统天线的噪声功率对比

目前,无线通信领域的最新研究表明,在典型场景下,里德堡原子天线相对于传统RF天线具有巨大的信噪比增益。具体来讲,由文献[20]的仿真结果表明,在亚太赫兹频段,里德堡原子天线的噪声功率(10^{-17} 数量级)比现有传统天线在该频段的噪声功率(10^{-14} 数量级)低3个数量级。此外,

文献[19]理论分析认为,在只考虑原子散粒噪声的情况下,里德堡原子天线的噪声功率比热噪声功率低2~3个数量级。然而,目前实验室条件下里德堡原子天线的噪声功率严重受限于光电转换过程中的光子散粒噪声^[56]。若能够利用新型激光技术抑制激光系统中的光场噪声,则里德堡原子天线的噪声功率有望低于传统天线的噪声功率^[58]。此外,已有一些研究提出了使用共振腔增强待探测信号与里德堡原子之间相互作用的方案,从而进一步提高里德堡原子天线的信噪比。文献[59]提出了将充满碱金属原子的蒸气室放入谐振波导腔中来增强里德堡原子与电场的相互作用,并通过实验测得本文方案能够使里德堡原子天线的噪声系数在10.22 GHz下从42.44 dB优化到19.23 dB。文献[60]提出了一种基于印制电路板的可调谐共振器来增强里德堡原子与电场的相互作用,并通过实验测得本文方案能够使里德堡原子天线的噪声系数在文中提及的VHF频段内降低35 dB。这些研究进展表明里德堡原子天线的信噪比有显著的潜在提升空间。

3 里德堡原子天线在无线通信中的应用

本节阐述里德堡原子天线在无线通信中应用的部分重要工作,这些工作按照幅度调制(AM, amplitude modulation)信号^[61]、频率调制(FM, frequency modulation)信号^[37]和正交幅度调制(QAM, quadrature amplitude modulation)信号^[49]这3种不同的调制方式分为以下三类。

3.1 接收幅度调制信号

近年来,已有大量研究在实验室条件下实现了里德堡原子天线对幅度调制信号的接收。文献[61]利用直接探测型里德堡原子天线,在没有本振信号的情况下,实现了对码元速率500 kbit/s的开关键控(OOK, on-off keying)信号的无差错解调。文献[37]利用相同的物理机制,在没有本振信号的情况下实现了对调制深度为25%的模拟AM信号的接收。文献[62]进一步研究了在相同物理机制下,采用基带方波、正弦波和三角波3种基带信号波形的幅度调制信号在经过里德堡原子天线后的失真程度,认为基带方波的失真程度最低而基带三角波的失真程度最高。文献[63]使用基于隐马尔可夫模型的迭代译码算法,进一步改善了里德堡原子天线接收OOK信号的解调误码率。文献[64]使用里德堡

原子天线接收了经过基带频分复用（频率间隔为 20 kHz）的三路幅度调制信号，成功重建了发送端发送的彩色图片。文献[65]使用里德堡原子天线成功接收了经过频分复用（频率间隔为 50 kHz）的两路幅度调制信号。文献[12,51,66]分别以不同的调制方式实现了仅用一个里德堡原子蒸气室同时接收多个频率上的幅度调制信号。

3.2 接收频率调制信号

如第 1 节所述，当 $\Delta_{\text{RF}} \neq 0$ 时，欧特莱-汤斯分光现象中 2 个透射峰之间的频率间隔 $\Delta_{\text{peak}} = \sqrt{\Omega_{\text{RF}}^2 + \Delta_{\text{RF}}^2}$ 。在固定入射信号幅度时，接收激光功率也会随 Δ_{RF} 的变化而变化。因此，直接探测型里德堡原子天线也可以用于接收频率调制信号。文献[37]利用直接探测型里德堡原子天线实现了对载波频率 29.568 GHz 和最大频偏 30 MHz 的 FM 模拟音频信号的接收。文献[65]使用里德堡原子天线成功接收了经过频分复用（频率间隔为 50 kHz）的两路频率调制信号。文献[12]在蒸气室中同时充入铯原子和铷原子，在一个蒸气室中采用 2 种不同元素的碱金属原子同时接收 19.626 GHz 和 20.644 GHz 的 2 个频率上分别发送左声道和右声道 FM 模拟音频信号，实现了 FM 立体声信号的接收。

3.3 接收正交幅度调制信号

通过添加本振信号，让本振信号和待探测信号在蒸气室中相互干涉，里德堡原子天线得以探测入射信号的相位进而接收正交幅度调制信号，包括 LTE 标准中采用的正交多载波频分复用（OFDM, orthogoanl frequency division multiplexing）信号^[67]。文献[68]通过部署 $\Delta f = 500$ kHz 的本振信号，将里德堡原子作为混频器，使用超外差型里德堡原子天线实现了二进制相移键控（BPSK, binary phase shift keying）和四进制相移键控（QPSK, quadrature phase shift keying）信号的无差错解调。文献[48]部署了零差本振信号，使用零差型里德堡原子天线实现了载波频率 17.041 5 GHz 和符号速率 1 MB 的八进制相移键控（8PSK, eight-phase shift keying）信号的无差错解调。文献[69]使用超外差型里德堡原子天线成功接收了经过频分复用（频率间隔为 100 kHz）的三路 8PSK 信号，并通过实验验证了在不同发射功率、接收装置和调制阶数下，正交幅度调制信号比纯幅度调制信号具有更低的误符号率。文献[70]部署了 $\Delta f = 1$ MHz 的本振信号，更进一步

实现了对载波频率 19.626 GHz、符号速率 100 KB 的 16QAM、32QAM 甚至 64QAM 信号误码率小于 5% 的解调，其中 64QAM 信号的眼图仅有 2.2% 的均方误差。文献[16]提出了一种使用分光探测型里德堡原子天线阵列接收多用户正交幅度调制信号的理论方案。

表 3 总结了里德堡原子天线在无线通信中的部分应用。

表 3 里德堡原子天线在无线通信中的部分应用

调制方式	信号路数	天线类型	参考文献
幅度调制	单路	直接探测型	文献[12,37,61-63]
	多路	直接探测型	文献[12,49,51,64-66]
频率调制	单路	直接探测型	文献[37]
	多路	直接探测型	文献[12,65]
正交幅度调制	单路	超外差型	文献[68,70]
	多路	超外差型	文献[69]
	单路	零差型	文献[48]
	多路	分光探测型	文献[16]

4 里德堡原子天线在无线感知中的应用

表 4 列举了里德堡原子天线在无线感知中的部分应用。这些应用主要涵盖以下 3 个范围，分别为波达角（AoA, angle of arrival）探测、极化方向探测和频率探测。

4.1 波达角探测

目前，部署多个里德堡原子天线组成阵列以实现 AoA 探测已在实验室条件下实现。例如，文献[71-73]利用 2 个超外差型里德堡原子天线组成的阵列，分别在 2.63 GHz、15.29 GHz 和 19.18 GHz 的载频上实现了准确的单目标 AoA 探测，其中用于混频的本振信号均由喇叭天线产生。在文献[74]中，作者进一步提出了用多个超外差型里德堡原子天线组成阵列以实现多目标 AoA 探测的理论方法。然而，这些方法没有考虑到实际系统中本振信号在里德堡原子天线阵列不同位置处信号强度的不同导致每个里德堡原子天线的信噪比不同。也就是说，从统计均方误差的角度来看，这些工作只能得到波达角的最大似然估计结果而不能得到综合考虑每个里德堡原子阵元不同信噪比的最大后验估计结果，其估计精度具有从统计信号处理算法方面进一步优化的潜力。

表4 里德堡原子天线在无线感知中的部分应用

应用场景	天线类型	方案特点	参考文献
波达角探测	超外差型	2个天线, 单目标 AoA 探测	文献[71-73]
	超外差型	多个天线, 多目标 AoA 探测	文献[74]
极化方向探测	直接探测型	一维极化方向	文献[75-76]
	超外差型	一维极化方向	文献[77]
	直接探测型	两路独立测量	文献[78]
	超外差型	3个本振信号, 探测三维极化方向	文献[79]
频率探测	超外差型	使用频率梳本振信号	文献[80]
	超外差型	基于中国剩余定理的估计算法	文献[81]

4.2 极化方向探测

在里德堡原子天线中, 探测激光和耦合激光以相同极化方向和相反传播方向穿过充满碱金属原子的蒸气室, 以使尽可能多的碱金属原子被激发到里德堡态^[29]。当入射信号的极化方向与激光的极化方向垂直时, 入射信号不会引起ATS而只有EIT的透射峰^[75]。当入射信号的极化方向与激光的极化方向平行时, 入射信号会引起ATS而不存在EIT的透射峰^[75]。若入射信号的极化方向与激光的极化方向既不平行也不垂直, ATS的2个透射峰和电磁诱导透明的单个透射峰会同时存在。利用这个现象, 已有一些工作在实验室条件下实现了里德堡原子天线探测入射信号的极化方向。文献[75-76]使用直接探测型里德堡原子天线, 以较高的分辨率实现了入射信号的一维极化方向探测。文献[77]使用超外差型里德堡原子天线替代直接探测型里德堡原子天线, 外加强本振信号进一步提升了一维极化方向探测的精度。文献[78]提出了一种双光路结构以实现两路信号极化方向的同时测量。文献[79]进一步研究了三维极化问题, 通过部署3个极化方向相互正交的本振信号, 采用超外差型里德堡原子天线, 以0.094 rad的分辨率实现了三维极化方向探测。

4.3 频率探测

文献[80]提出了一种基于光学频率梳(OFC, optical frequency comb)的方法, 在实验室条件下实现了利用里德堡原子天线探测入射信号的频率。具体而言, 该方法将超外差型里德堡原子天线的单频本振信号替换成含有大量离散频率分量的频率梳本振信号, 通过各种离散频率与入射信号的混频结果, 在125 MHz的频率范围内成功估计了入射信号的频率。文献[81]对该方法进行了进一步的改进,

并提出了基于改进版中国剩余定理的快速频率估计算法, 以更低的计算复杂度获得了更精确的估计结果, 并给出了里德堡原子天线用于频率探测的极限范围。

5 里德堡原子天线的未来研究方向

本节讨论里德堡原子天线赋能未来6G无线通信和系统方面部分重要的研究方向。

5.1 里德堡原子天线赋能的星地通信

为了在全球空天地海多域内实现真正意义上的泛在无线通信, 在6G愿景中, 迫切需要开发可以大规模支持广泛区域接入的无线空口新技术。里德堡原子天线恰恰由于其极高的接收信号信噪比增益(典型场景、同条件下对比传统天线最高可达20~30 dB), 使其天然适合作为跨大气层、广范围覆盖的物理层支柱技术。具体来讲, 传统的高轨、中轨以及低轨星地链路均存在严重的路径衰落和大气衰减, 特别是在发射功率受限于用户设备性能的用户-卫星上行链路中, 对星载接收机的接收灵敏度有比地面通信设备更高的要求。若将里德堡原子天线部署到卫星上用于接收用户的上行信号, 则可能显著增强星载接收机的接收灵敏度, 实现不需要中转地面站即可使卫星与用户小型终端进行直连的美好愿景。然而, 受卫星载荷的体积限制, 里德堡原子天线在卫星上的实际部署需要将蒸气室、激光系统和温控系统在卫星上进行小型化集成。目前, 文献[30]已经成功将里德堡原子天线的所有子系统集成到了一台长80 cm、宽63.5 cm、高100 cm, 以及整机质量约130 kg的可搬运设备中, 如文献[30]中的图12所示。该设备使用体积小和不易跳模的分布布拉格反馈半导体激光器产生852 nm探测激光,

使用体积小、结构简单和成本低的光纤激光器产生 509 nm 耦合激光, 采用光路较为简单的调制转移稳频技术^[82]和电磁诱导透明光谱稳频技术^[83]分别对 852 nm 探测激光和 509 nm 耦合激光进行稳频(不同于文献[36]中采用的光路较为复杂的超稳腔稳频技术), 并将激光器、稳频光路、分光光路及光谱探测光路放置在一个集成式光路上可以实现小型化设计。尽管文献[30]已经采取了多种工程技术将里德堡原子天线系统的体积尽量地缩小, 但长 80 cm、宽 63.5 cm 和高 100 cm 尺寸的设备仅能部署于载荷尺寸为米数量级的大型通信卫星上, 而无法部署于小型卫星(载荷尺寸为分米数量级)和立方星(载荷尺寸为厘米数量级)上。此外, 考虑到真空环境下散热困难, 星载设备散热需求也需要额外的散热系统, 这会进一步提升整机的体积和质量。截至 2025 年 6 月, 尚未有将里德堡原子天线在卫星上进行实际部署的文献公开发表。尽管里德堡原子天线在卫星上的部署较为困难, 但已有一些工作使用里德堡原子天线接收微弱的卫星-用户下行信号, 以增强星载接收机的接收灵敏度。例如, 文献[84]通过给地面上的里德堡原子天线部署抛物反射面, 将接收卫星信号的灵敏度提高了 40 dB。文献[85]利用一个额外的更高能级实现了在地面上对 2 个不同频率的卫星信号的同时接收。这些研究进展说明使用地球上的里德堡原子天线接收卫星-用户下行信号比将里德堡原子天线部署在卫星上接收用户-卫星上行信号利用现有工程技术更容易实现。

5.2 里德堡原子天线的灵敏度增强技术

根据理论分析, 里德堡原子天线对热噪声的免疫使其展现出的极高的理论信噪比增益, 这意味着里德堡原子天线在无线感知场景下有潜力使能更高精度的目标定位、追踪和识别。然而, 目前实际系统中里德堡原子天线的灵敏度远远没有达到理论分析给出的上限, 仍存在显著的潜在提升空间。目前, 已有多种用于增强里德堡原子天线灵敏度的技术路线被提出。文献[56]使用泵浦技术, 使处于同一轨道的 2 种超精细基态的铷原子都能够参与反应, 通过增大参加反应的原子数量来增加灵敏度。除泵浦技术之外, 谐振腔技术也被广泛应用于里德堡原子天线的灵敏度增强, 如文献[86]中使用的极化选择性谐振腔、文献[87]中使用的法布里-珀罗谐振腔、文献[88]中使用的机械调谐宽带谐振腔、

文献[89]中使用的圆极化有向谐振腔、文献[90]中使用的基于变容二极管的谐振腔等。此外, 文献[91]提出了一种将探测激光分成多个功率相同的波束穿透蒸气室, 利用空间分集思想增强里德堡原子天线灵敏度的技术。除以上基于硬件的灵敏度增强技术之外, 也有一些从软件方面增强信号恢复灵敏度的信号处理技术被提出, 如文献[92]中提出的基于深度学习的里德堡原子天线射频信号分类算法。另外, 也有一些工作从参数优化的角度增强里德堡原子天线的灵敏度, 如文献[36]和文献[43]针对探测激光和耦合激光的强度及频率失谐等参数对里德堡原子天线的信噪比进行了详细的分析, 并得出了在特定条件下最优化灵敏度的参数设置。在里德堡原子天线的实际部署中, 需要综合利用上述硬件设计、参数选取和算法优化这 3 个方面的技术, 对里德堡原子天线的灵敏度进行系统性的提升。

5.3 基于里德堡原子天线的小型低频接收设备

由于里德堡原子天线接收的是处于粒子状态的电磁波而不是处于波动状态的电磁波, 其接收电磁波的过程并不需要电磁波在接收天线上产生有效振荡, 也就是说蒸气室尺寸大小并不需要和载波波长处于近似同一数量级。考虑到里德堡原子的不同能级之间跃迁的本征频率低至直流到 MHz 频段(波长数米到数百千米), 里德堡原子天线能够接收这些频段内处于粒子状态的电磁波, 使在远小于波长的尺寸下实现原先需要大型接收天线和阵列的无线接收设备成为可能。目前, 已有一些工作通过实验验证了利用小尺寸里德堡原子天线接收低频无线信号的可行性。例如, 文献[25]利用微型谐振腔增强的超外差型里德堡原子天线, 使用尺寸仅为 0.004 3 倍波长 \times 0.003 5 倍波长 \times 0.007 倍波长的小型蒸气室, 对 9.365~10.223 MHz 的短波频段电磁波实现了高灵敏度(1.71 微伏每米每根号赫兹)探测, 并成功解调了传输 880 km 的幅度调制信号。文献[26]采用微带线的谐振腔增强的超外差型里德堡原子天线, 配备尺寸仅为 0.107 倍波长 \times 0.035 倍波长 \times 0.009 倍波长的小型蒸气室, 对 210~308.6 MHz 的甚高频电磁波实现了高灵敏度(179.37 纳伏每厘米每根号赫兹)探测。此外, 因为里德堡原子天线的碱金属处于气态而非固态, 属于介质而非导体, 所以即便 2 个里德堡原子天线的距离小于半波长, 也不会彼此产生感应电流导致天线耦合效应^[93]。这意味着利用里德堡

原子天线可以构成单元间距远小于半波长、整体体积较小的低频电磁波全息接收阵列,在不影响天线效率和隔离度的情况下显著减小短波和甚高频频段的接收天线阵列的体积。

5.4 里德堡原子天线的瞬时带宽扩展技术

尽管里德堡原子天线能够在短波到太赫兹的极宽频率范围内的大量离散频点上进行调谐,但在每个离散频点上的瞬时带宽并不是很大。例如,文献[32]的实验表明,若不采取额外的带宽扩展手段,里德堡原子天线在2.904 GHz的离散频点附近,保持灵敏度近似不变的瞬时带宽仅为160 kHz(对应相对带宽约0.000 05)。文献[69]利用里德堡原子天线接收QPSK信号的实验表明,利用里德堡原子天线在19.626 GHz的离散频点探测AM信号时,只有在QPSK信号带宽不大于1 MHz(对应相对带宽约0.000 05)的情况下才能使接收端眼图的误差不大于10%。以上2项实验表明在不采取额外带宽扩展手段的情况下,里德堡原子天线的瞬时相对带宽仅有0.000 05左右。为了提升里德堡原子天线的瞬时带宽,目前已有一些工作提出了部分可行的技术路线。例如,文献[14]提出了一种里德堡原子空时复用技术,其核心思想在于,通过巧妙地调整探测激光的空间分布和时间分布,使里德堡原子能够在电磁诱导透明效应建立和关闭的快速瞬态过程中,对射频电场进行多次重复采样。尽管文献[14]提出的技术可以将里德堡原子天线在18.14 GHz离散频点附近的瞬时带宽扩展到100 MHz以上,但其灵敏度较低,仅适用于探测瞬时幅度很高的冲激信号而不适合探测连续波信号。文献[32]提出了一种利用外加强磁场(磁场强度高达T/m量级)来扩展带宽的方法,其核心思路是利用精巧设计的反亥姆霍兹线圈产生梯度磁场,诱导里德堡原子发生塞曼分裂,使里德堡原子天线的瞬时带宽随梯度磁场强度线性增长。文献[32]的实验结果表明,其提出的方法可以将超外差型里德堡原子天线在2.904 GHz离散频点附近的瞬时带宽从160 kHz扩展到3.2 MHz,且灵敏度保持不变,能够有效探测连续波信号。文献[94]提出了一种利用六波混频来扩展带宽的方法,其核心思路是部署多束具有特定频率失谐的探测激光和耦合激光产生六波混频,生成一对边带波,并利用强耦合场对其中一个边带波进行放大。文献[94]的实验表明,利用其提出的方法可以将里德堡原子天线

在16.030 4 GHz离散频点附近的瞬时带宽从数百kHz扩展到10.2 MHz,且保持较高的灵敏度。总体而言,扩展里德堡原子天线的瞬时带宽是使用里德堡原子进行高速通信和精准感知的基础,尽管以上工作提出的方法能够在特定条件下扩展里德堡原子天线的瞬时带宽,但它们的实施条件较为苛刻,工程实现难度较高,故有待进一步改进和优化。

5.5 实际无线信道特性对里德堡原子天线的实际影响

现有使用里德堡原子天线接收射频信号的工作大多是在墙面和地面铺满吸收波材料的实验室条件下进行的,即从信号源到蒸气室存在一条视距传播路径,而几乎不存在无线信号的散射。然而,在实际无线通信环境中,由不同散射体散射的信号在蒸气室内相加,会对里德堡原子天线造成多径时延扩展、蒸气室内干涉、极化方向失配等重要影响。

1) 多径时延扩展。因为不同散射路径的路程各不相同,所以不同散射体散射的信号不同时到达接收端,这会导致信号的多径时延扩展。如果采用正交多载波频分复用方式^[67],每个OFDM添加的循环前缀^[95]时长(如3GPP TS 38.211标准^[96]中规定周期为66.7 μs的OFDM符号需添加4.69 μs的循环前缀)通常大于多径时延扩展,从而规避符号间干扰。即便在较为少见的多径时延比循环前缀更长的散射环境下^[97],也可以利用文献[98]提出的信号处理方法规避符号间干扰。如果不采用正交多载波频分复用方式,则需要在里德堡原子天线接收信号处理部分添加如文献[99]所述的信道均衡模块。

2) 蒸气室内干涉。从不同方向入射蒸气室的信号会在蒸气室内部产生干涉,使蒸气室内部各处的电场振幅不是常数。文献[33]中的微元法表明,当蒸气室内部各处的电场振幅不同时,探测激光穿透蒸气室的吸收系数受到蒸气室内部在光路上各处的磁化率的定积分影响,使整体吸收系数偏离按照蒸气室中心处电场振幅计算吸收系数的理论值。蒸气室内电场振幅不恒定对探测激光光谱的定量影响在文献[33]中有深入分析,此处不再赘述。

3) 极化方向失配。在多径传播环境中,不同散射体散射的信号极化方向各不相同^[100]。文献[75]指出,当入射信号的极化方向与两束探测激光的极化方向不同时,探测激光的透射系数将会与极化方向重合的情况相比有较大偏离。当有多束极化方向不同的射频信号入射时,如文献[75]中的图2(b)所

示, 探测激光的透射系数显示出电磁诱导透明效应和欧特莱-唐恩斯分光效应叠加作用的效果。然而, 目前尚未有工作指出多路极化方向不同的射频信号入射时探测激光透射系数的精确闭式表达式, 故极化方向失配对里德堡原子天线的影晌尚不明确。

未来, 需要针对多径时延扩展、蒸气室内干涉和极化方向失配这 3 个实际无线信道特性对里德堡原子天线的影晌, 研究对应的解决方法, 为里德堡原子天线在无线通信系统中的实际部署提供支撑。

5.6 里德堡原子天线与现有通信系统的集成方式

由于里德堡原子天线系统中包括金属铷 (批量采购价超过 500 元/克)、金属铯 (批量采购价超过 650 元/克)、光纤激光器 (单价超 10 000 元/台) 等高成本组件, 故里德堡原子天线的成本远高于导体天线。此外, 由于光纤激光器 (功率高达数十瓦甚至上百瓦) 的存在, 里德堡原子天线的功耗至少也是百瓦的量级。鉴于里德堡原子天线的较高成本、较大功耗和极大体积 (米级尺寸), 在用户设备处配备里德堡原子天线是不现实的, 而只能在基站处集成里德堡原子天线。里德堡原子天线与基站的可能集成方式主要分为 2 种模式, 分别为独立接收集成模式和混合接收集成模式。在独立接收模式下, 里德堡原子天线作为基站配备的唯一一种接收天线, 替代传统导体天线接收射频信号, 而导体天线在基站仅仅用作发射信号 (由于原子从高能级向低能级跃迁的随机性, 里德堡原子天线无法用于发射信号)。然而, 里德堡原子天线的有限瞬时带宽会使基站能够接收的信号频率范围由数十个离散和宽度较窄的频段组成, 中间存在大量的频谱空洞 (无法接收的信号频率范围), 无法满足基站宽带接收的可靠性指标。为此, 混合接收集成模式具有更强的工程可行性。混合接收集成模式是指在不削减现有基站收发系统的情况下, 额外集成里德堡原子天线专门用于微弱上行信号接收。具体而言, 若用户上行信号较强, 基站使用导体天线接收信号便可获得满足通信传输速率的信噪比, 而不需要使用里德堡原子天线进行信号接收。若用户上行信号较弱, 基站发送指令让用户切换至里德堡原子天线能够进行高灵敏度接收的某个离散频点上发送上行信号, 同时调用里德堡原子天线对该用户发送的上行微弱信号进行接收, 利用里德堡原子天线的低噪声功率特性改善上行信号信噪比。这种方式仅需通过对通信协议

进行较小的改动并结合精巧设计的无线资源管理及分配算法, 根据具体应用场景的需求, 灵活调度里德堡原子天线和导体天线用于不同强度的信号接收, 总体升级和改造的成本较小。

6 结束语

里德堡原子天线作为无线通信和感知领域的一项新兴技术, 凭借其独特的窄带响应、无热噪声以及宽带调谐等优良特性, 展现出了非凡的应用潜力。与传统天线相比, 里德堡原子天线不仅实现了对特定频率窄带电磁波振幅、频率和相位的精确测量, 更在根本上改变了天线的性能边界, 引领着天线技术向更高精度、更低噪声、更宽频带和更自由调谐的方向发展。首先, 本文深入探讨了里德堡原子的基本性质, 以及分光探测型、直接探测型、超外差型和零差型 4 种里德堡原子天线的工作原理, 并阐述了交流斯塔克型里德堡原子电场测量方案不适合用于无线通信系统的原因。随后, 本文详细分析了里德堡原子天线的全部噪声来源并阐述了其潜在的低噪声特性。然后, 本文系统地阐述了近年来里德堡原子天线在无线通信和感知领域的重要应用的研究进展。最后, 本文展望了里德堡原子天线赋能未来 6G 无线通信系统的可能研究方向。

参考文献:

- [1] IMT vision-framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond: ITU-R M.2083[S]. ITU-R, 2015.
- [2] ZHANG P, YANG H, FENG Z Y, et al. Toward intelligent and efficient 6G networks: JCSC enabled on-purpose machine communications[J]. IEEE Wireless Communications, 2023, 30(1): 150-157.
- [3] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(3): 379-423.
- [4] IVRLAČ M T, NOSSEK J A. Toward a circuit theory of communication[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2010, 57(7): 1663-1683.
- [5] HAN X D, WANG Q J, LI Z L, et al. A 0.3-28-GHz frequency range, 1.2-dB noise figure, cascode distributed LNA with wide temperature range for satellite communications[J]. IEEE Microwave and Wireless Technology Letters, 2025, 35(1): 79-82.
- [6] CAO Y F, ZHANG M L, ZHU Y, et al. A 12-GS/s 12-b $4 \times$ time-interleaved ADC using input-independent timing skew calibration with global dither injection and linearized input buffer[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2024, 59(12): 4211-4224.
- [7] 夏凌昊, 肖俊祥, 董岫, 等. 里德堡原子雷达接收灵敏度极限[J]. 微波学报, 2024, 40(2): 1-7.
- [8] XIA L H, XIAO J X, DONG S, et al. Receiving sensitivity limit of Rydberg atom radar[J]. Journal of Microwaves, 2024, 40(2): 1-7.
- [9] D'AMICO A A, SANGUINETTI L. Holographic MIMO communica-

- tions: what is the benefit of closely spaced antennas?[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(10): 13826-13840.
- [9] RICE S O. Mathematical analysis of random noise[J]. *Bell System Technical Journal*, 1944, 23(3): 282-332.
- [10] 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.
- [11] 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: 3501313.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] KNARR S H, BUCKLEW V G, LANGSTON J, et al. Spatiotemporal multiplexed Rydberg receiver[J]. *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, 2023, 4: 3500108.
- [15] NEZ F, PLIMMER M D, BOURZEIX S, et al. Determination of the Rydberg constant by direct frequency measurement[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1995, 44(2): 568-571.
- [16] CUI M Y, ZENG Q S, HUANG K B. Towards atomic MIMO receivers[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2025, 43(3): 659-673.
- [17] CUI M Y, ZENG Q S, HUANG K B. MIMO precoding for Rydberg atomic receivers[J]. *arXiv Preprint*, arXiv: 2408.14366, 2024.
- [18] CUI M Y, ZENG Q S, HUANG K B. Rydberg atomic receiver: next frontier of wireless communications[J]. *arXiv Preprint*, arXiv: 2412.12485, 2024.
- [19] BUSSEY L W, BURTON F A, BONGS K, et al. Quantum shot noise limit in a Rydberg RF receiver compared to thermal noise limit in a conventional receiver[J]. *IEEE Sensors Letters*, 2022, 6(9): 3502204.
- [20] ZHOU Y C, PENG R J, ZHANG J B, et al. Theoretical investigation on the mechanism and law of broadband terahertz wave detection using Rydberg quantum state[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(3): 5931808.
- [21] LIU B, ZHANG L H, LIU Z K, et al. Electric field measurement and application based on Rydberg atoms[J]. *Electromagnetic Science*, 2023, 1(2): 0020151.
- [22] GONG T R, SUN J M, YUEN C, et al. Rydberg atomic quantum receivers for classical wireless communications and sensing: their models and performance[J]. *arXiv Preprint*, arXiv: 2412.05554, 2024.
- [23] SCHLOSSBERGER N, PRAJAPATI N, BERWEGER S, et al. Rydberg states of alkali atoms in atomic vapour as SI-traceable field probes and communications receivers[J]. *Nature Reviews Physics*, 2024, 6(10): 606-620.
- [24] 边武, 郑顺元, 李仲启, 等. 可搬运原子微波电场测量仪[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(11): 1106022.
- BIAN W, ZHENG S Y, LI Z Q, et al. A transportable Rydberg atomic microwave electrometry[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(11): 1106022.
- [25] MAO R Q, LIN Y, ZHOU A J, et al. Shortwave ultrahigh-sensitivity Rydberg atomic electric field sensing based on a subminiature resonator[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(11): 8165-8172.
- [26] LI Y X, LIN Y, DING Z K, et al. A compact tunable enhancement resonator for Rydberg atomic receiver[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2025, 24(4): 808-812.
- [27] DING Z K, LIU Y, YANG K, et al. Directional magnetoelectric dipole resonator for Rydberg atomic sensors using characteristic mode analysis[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2025, 24(1): 247-251.
- [28] HOLLOWAY C L, SIMONS M T, GORDON J A, et al. Atom-based RF electric field metrology: from self-calibrated measurements to sub-wavelength and near-field imaging[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2017, 59(2): 717-728.
- [29] HOLLOWAY C L, GORDON J A, JEFFERTS S, et al. Broadband Rydberg atom-based electric-field probe for SI-traceable, self-calibrated measurements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(12): 6169-6182.
- [30] 陈志文, 余圳跃, 廖开宇, 等. 基于Rydberg原子天线的太赫兹测量[J]. *物理学报*, 2021, 70(6): 7-17.
- CHEN Z W, SHE Z Y, LIAO K Y, et al. Terahertz measurement based on Rydberg atomic antenna[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(6): 7-17.
- [31] 杜艺杰, 吕子瑶, 胡伟东, 等. 基于原子天线的低频电场量子精密测量和应用[J]. *量子电子学报*, 2024, 41(5): 701-712.
- DU Y J, LYU Z Y, HU W D, et al. Atomic-antenna-based quantum precision measurement of low-frequency electric fields and applications[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2024, 41(5): 701-712.
- [32] WANG Q M, AN Q, FU Y Q. Instantaneous bandwidth expansion of a gradient magnetic field enhanced Rydberg atomic receiver[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, PP(99): 1.
- [33] ROTUNNO A P, HOLLOWAY C L, PRAJAPATI N, et al. Investigating electromagnetically induced transparency spectral lineshape distortion due to non-uniform fields in Rydberg-atom electrometry[J]. *Journal of Applied Physics*, 2023, 134(8): 084401.
- [34] XU B K, ZHANG J Y, CHEN Z T, et al. Channel estimation for Rydberg atomic receivers[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2025, PP(99): 1-5.
- [35] FOOT C. *Atomic physics*[M]. Oxford: Oxford University Press, 2005.
- [36] CAI M H, XU Z S, YOU S H, et al. Sensitivity improvement and determination of Rydberg atom-based microwave sensor[J]. *Photonics*, 2022, 9(4): 250.
- [37] ANDERSON D A, SAPIRO R E, RAITHEL G. An atomic receiver for AM and FM radio communication[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(5): 2455-2462.
- [38] WU F C, AN Q, SUN Z S, et al. Linear dynamic range of a Rydberg-atom microwave superheterodyne receiver[J]. *Physical Review A*, 2023, 107(4): 043108.
- [39] 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.
- [40] ANDERSON D A, SCHWARZKOPF A, MILLER S A, et al. Two-photon microwave transitions and strong-field effects in a room-temperature Rydberg-atom gas[J]. *Physical Review A*, 2014, 90(4): 043419.
- [41] SEDLACEK J A, SCHWETTMANN A, KÜBLER H, et al. Microwave electrometry with Rydberg atoms in a vapour cell using bright atomic resonances[J]. *Nature Physics*, 2012, 8(11): 819-824.
- [42] BUSSEY L W, WINTERBURN A, MENCHETTI M, et al. Rydberg

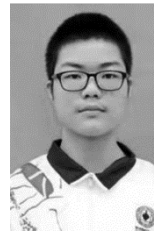
- RF receiver operation to track RF signal fading and frequency drift[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(24): 7813-7820.
- [43] WU S C, GONG C, LI S B, et al. Rydberg atomic sensor sensitivity optimization using detuned microwave field[C]//*Proceedings of the 2022 31st Wireless and Optical Communications Conference (WOCC)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 181-186.
- [44] WANG Z, JING M Y, ZHANG P, et al. Noise analysis of the atomic superheterodyne receiver based on flat-top laser beams[J]. *Optics Express*, 2023, 31(12): 19909-19917.
- [45] JING M Y, HU Y, MA J, et al. Atomic superheterodyne receiver based on microwave-dressed Rydberg spectroscopy[J]. *Nature Physics*, 2020, 16(9): 911-915.
- [46] YANG K, LIN Y, DING Z K, et al. Local oscillator port-integrated resonators for sensitivity enhancement of VHF band Rydberg atomic heterodyne receivers[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2025, PP(99): 1-10.
- [47] SIMONS M T, HADDAB A H, GORDON J A, et al. A Rydberg atom-based mixer: measuring the phase of a radio frequency wave[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(11): 114101.
- [48] KUMAR S, FAN H Q, KÜBLER H, et al. Atom-based sensing of weak radio frequency electric fields using homodyne readout[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 42981.
- [49] 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.
- [50] LIU A, HUANG Z, LI M, et al. A survey on fundamental limits of integrated sensing and communication[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 24(2): 994-1034.
- [51] DU Y J, CONG N, WEI X G, et al. Realization of multiband communications using different Rydberg final states[J]. *AIP Advances*, 2022, 12(6): 065118.
- [52] ROGERS A E E, BOWMAN J D. Absolute calibration of a wideband antenna and spectrometer for accurate sky noise temperature measurements[J]. *Radio Science*, 2012, 47(6): 1-9.
- [53] GANS M J. Channel capacity between antenna arrays-part I: sky noise dominates[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2006, 54(9): 1586-1592.
- [54] SHAO W D, ZHANG S, ZHANG X S, et al. Suppressing interference and power allocation over the multi-cell MIMO-NOMA networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(8): 1397-1400.
- [55] KITCHING J, KNAPPE S, DONLEY E A. Atomic sensors-a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(9): 1749-1758.
- [56] 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.
- [57] PRAJAPATI N, NIU Z Q, NOVIKOVA I. Quantum-enhanced two-photon spectroscopy using two-mode squeezed light[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(8): 1800-1803.
- [58] GONG T R, CHANDRA A, YUEN C, et al. Rydberg atomic quantum receivers for classical wireless communication and sensing[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2025, PP(99): 1-11.
- [59] SANDIDGE G, SANTAMARIA-BOTELLO G, BOTTOMLEY E, et al. Resonant structures for sensitivity enhancement of Rydberg-atom microwave receivers[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2024, 72(4): 2057-2066.
- [60] YANG K, CHEN X Z, MAO R Q, et al. PCB-based electrically tunable resonator for VHF band Rydberg atomic enhancement sensing[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(7): 6060-6068.
- [61] SONG Z F, LIU H P, LIU X C, et al. Rydberg-atom-based digital communication using a continuously tunable radio-frequency carrier[J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 8848-8857.
- [62] YUAN J P, JIN T, XIAO L T, et al. A Rydberg atom-based receiver with amplitude modulation technique for the fifth-generation millimeter-wave wireless communication[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(10): 2580-2584.
- [63] WU H, YAO X Y, XIE C W, et al. On-off keying signal detection based on hidden Markov model for Rydberg atomic sensor[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2025, PP(99): 1.
- [64] ZHANG P, YUAN S X, JING M Y, et al. Image transmission utilizing amplitude modulation in Rydberg atomic antenna[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2024, 16(2): 3000307.
- [65] ZOU H Y, SONG Z F, MU H H, et al. Atomic receiver by utilizing multiple radio-frequency coupling at Rydberg states of rubidium[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(4): 1346.
- [66] MEYER D H, HILL J C, KUNZ P D, et al. Simultaneous multiband demodulation using a Rydberg atomic sensor[J]. *Physical Review Applied*, 2023, 19: 014025.
- [67] CIMINI L. Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1985, 33(7): 665-675.
- [68] 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.
- [69] CAI Y F, SHI S, ZHOU Y J, et al. High-sensitivity Rydberg-atom-based phase-modulation receiver for frequency-division-multiplexing communication[J]. *Physical Review Applied*, 2023, 19(4): 044079.
- [70] 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.
- [71] MAO R Q, LIN Y, FU Y Q, et al. Digital beamforming and receiving array research based on Rydberg field probes[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(2): 2025-2029.
- [72] YAN S C, LI X Y, PANG X Y, et al. Measurement of Doppler frequency shift and angle of arrival with Rydberg atom-based sensors[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 1505409.
- [73] 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(11): 114001.
- [74] GONG T R, YUEN C, See C M S, et al. Rydberg atomic quantum receivers for multi-target DOA estimation[J]. *arXiv Preprint, arXiv: 2501.02820*, 2025.
- [75] 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(6): 063001.
- [76] JIAO Y C, HAO L P, HAN X X, et al. Atom-based radio-frequency field calibration and polarization measurement using cesium nD, floquet states[J]. *Physical Review Applied*, 2017, 8: 014028.
- [77] WANG Y H, JIA F D, HAO J H, et al. Precise measurement of microwave polarization using a Rydberg atom-based mixer[J]. *Optics Ex-*

- press, 2023, 31(6): 10449-10457.
- [78] BERWEGER S, ARTUSIO-GLIMPSE A B, PRAJAPATI N, et al. Independent Rydberg atom sensing using a dual-ladder scheme[J]. Applied Physics Letters, 2024, 124(18): 184001.
- [79] ELGEE P K, COX K C, HILL J C, et al. Complete three-dimensional vector polarimetry with a Rydberg-atom rf electrometer[J]. Physical Review Applied, 2024, 22(6): 064012.
- [80] ZHANG L H, LIU Z K, LIU B, et al. Rydberg microwave-frequency-comb spectrometer[J]. Physical Review Applied, 2022, 18(1): 014033.
- [81] CHEN G Y, WANG C, YANG B, et al. Instantaneous frequency estimation of radio frequency signal based on Rydberg atomic receiver[J]. IEEE Photonics Journal, 2024, 16(2): 3100212.
- [82] SHANG H S, ZHANG T Y, MIAO J X, et al. Laser with 10^{-13} short-term instability for compact optically pumped cesium beam atomic clock[J]. Optics Express, 2020, 28(5): 6868-6880.
- [83] ABEL R P, MOHAPATRA A K, BASON M G, et al. Laser frequency stabilization to excited state transitions using electromagnetically induced transparency in a cascade system[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(7): 071107.
- [84] RAN R B, LIU Y, DING Z K, et al. A Rydberg atomic sensor combined with parabolic reflector for satellite application[C]/Proceedings of the 2024 IEEE 12th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-2.
- [85] ELGEE P K, HILL J C, LEBLANC K J, et al. Satellite radio detection via dual-microwave Rydberg spectroscopy[C]/Proceedings of the 2024 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-2.
- [86] ANDERSON D A, PARADIS E G, RAITHEL G. A vapor-cell atomic sensor for radio-frequency field detection using a polarization-selective field enhancement resonator[J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(7): 073501.
- [87] WU B, LIAO D W, SANG D, et al. Enhancing sensitivity of an atomic microwave receiver via a Fabry-Perot cavity[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2025, 73(2): 863-872.
- [88] WAN Z Q, LIN Y, YANG K, et al. Mechanically tunable broadband electric field enhancement resonator for quantum microwave measurements[J]. IEEE Electron Device Letters, 2024, 45(11): 2237-2240.
- [89] YANG K, DING Z K, FU Y Q. Circularly polarized directional resonator for Rydberg atomic enhancement sensing[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(12): 4258-4262.
- [90] WAN Z Q, LIN Y, CHEN X Z, et al. Design of varactor diode-based frequency-tunable electric field local enhancement resonator for quantum microwave measurements[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(12): 4099-4103.
- [91] WU B, MAO R Q, SANG D, et al. Enhancing sensitivity of atomic microwave receivers based on optimal laser arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2025, 73(2): 793-806.
- [92] GOKHALE P, CARNAHAN C, CLARK W, et al. Deep learning for low-latency, quantum-ready RF sensing[C]/Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1324-1335.
- [93] YUAN S S A, XU X Y I, YUAN J P, et al. Electromagnetic modeling and capacity analysis of Rydberg atom-based MIMO system[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2025, PP(99): 1-5.
- [94] YANG B W, YAN Y H, LI X J, et al. Highly sensitive microwave electrometry with enhanced instantaneous bandwidth[J]. Physical Review Applied, 2024, 21(3): L031003.
- [95] MUQUET B, WANG Z D, GIANNAKIS G B, et al. Cyclic prefixing or zero padding for wireless multicarrier transmissions? [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(12): 2136-2148.
- [96] 3GPP. Physical channels and modulation: TS 38.211 v16.2.0[S]. 2023.
- [97] CHEN S P, ZHU C T. ICI and ISI analysis and mitigation for OFDM systems with insufficient cyclic prefix in time-varying channels[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 78-83.
- [98] TANG A M, ZHAO Q M, WANG X D, et al. ISI-resistant reference signal design and processing for OFDM integrated communications and long-range radar sensing[J]. IEEE Communications Letters, 2024, 28(6): 1322-1326.
- [99] QURESHI S U H. Adaptive equalization[J]. Proceedings of the IEEE, 1985, 73(9): 1349-1387.
- [100] HE J, WANG Y J, SHU T, et al. Polarization, angle, and delay estimation for tri-polarized systems in multipath environments[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(8): 5828-5841.

[作者简介]



王莹 (1976-), 女, 陕西西安人, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线资源管理与优化、6G关键技术、天地一体化网络技术等。



郭余庆 (2002-), 男, 湖南益阳人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为面向6G的新型空口传输技术。



郭旭汎 (1999-), 男, 河南三门峡人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为面向6G的新型空口传输技术。



张平 (1959-), 男, 陕西汉中, 博士, 中国工程院院士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为先进移动通信系统等。