基于里德堡原子的远距离微波接收 *

谢奕鹏 [1)2)]　雷名威 [1)]　石猛 [1)†]

1)（中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京　100094）

2)（中国科学院大学, 星际航行学院, 北京　101408）

里德堡原子因其极大的电偶极矩和极化率，被视为微波电场量子传感中极具潜力的研究路径，在计量基准、无线通信和雷达探测等领域具有广阔的应用前景。然而，基于里德堡原子的高灵敏度微波探测优势与实际工程应用之间长期存在着显著鸿沟，尤其是远距离弱信号接收能力尚未被充分验证。本文研制了基于铯原子阶梯型三能级体系的小型化里德堡原子微波接收样机，将超外差探测技术与微波谐振腔局域场增强技术协同融合，在室外真实环境下成功实现了 20 km 距离的微波信号接收。实验采用 3.785 GHz 的微波链路，发射端与接收端分别位于相距约 20 km 的两个山峰。通过将信号与本振场在原子气室内混频产生中频外差拍频信号，系统在 5 Hz 分辨率带宽下获得了 20 dB 的信噪比，对应微波探测灵敏度为 −134 dBm/Hz。本文工作不仅验证了量子传感器在复杂室外环境中的远距离工作能力，也为基于量子体系的远程通信、雷达探测及频谱监测等技术发展提供了重要的实验基础与参考。

关键词: 里德堡原子, 电磁感应透明, 超外差探测, 微波谐振腔

1　引　　言

里德堡原子作为量子传感领域的重要平台，因其具有极大的电偶极矩和极化率，对外界微波电场表现出极高的灵敏度 [1]。基于里德堡原子的微波电场传感器，凭借其全光学读出和原子尺度的空间分辨率，突破了传统金属天线在近场干扰和测量带宽方面的固有局限 [2]，近年来在微波计量、无线通信、雷达探测及

† 通信作者. E-mail: shimeng@csu.ac.cn　(通信作者)

第一作者. E-mail: xieyipeng24@csu.ac.cn　(第一作者)

* 国家重点研发计划 (批准号: 2024YFB3909500), 国家自然科学基金 (批准号: U2341211,62501568) 以及中国科学院空间应用创新行动培育项目 (批准号: CSU-CXXD-PY-2025-009) 资助的课题.

录用稿件，非最终出版稿

频谱监测等领域展现出广阔的应用前景 [3–6]。里德堡原子接收机的基本架构包括激光系统、原子气室探头以及后端信号采集与处理单元 [7]。然而，目前绝大多数相关实验仍局限于实验室环境，仅有少数研究团队在室外场景中实现了真实微波信号的接收。例如，加州理工大学研究团队利用里德堡原子接收机接收卫星信号，实现了对土壤湿度的遥感测量 [8]；美国里德堡科技公司联合美国陆军实验室演示了超过一公里的远距离射频通信 [9]；国防科技大学研究团队利用小型化多层螺旋谐振器增强的里德堡传感器，成功接收了 13.85 MHz 的短波广播信号 [10]；本团队亦在前期工作中验证了里德堡原子接收机对卫星信号及罗兰 C 长波导航授时信号的室外接收能力 [7,11]。推动里德堡原子传感器走向实际工程应用，亟需实现系统的小型化、集成化与可移动化。目前，国内外多家机构已相继研制出不同技术路线的集成化里德堡接收样机 [9,12,13]。

尽管里德堡原子在理论上具备 pV/cm/$\sqrt{\text{Hz}}$ 量级的微波电场探测灵敏度 [14]，但实验与工程实践中该极限远未达到，与传统微波接收机约 -174 dBm/Hz 的灵敏度水平仍有较大差距，严重制约了其实际应用。为提升灵敏度，国内外研究团队已开展了多种技术探索：波兰团队采用六波混频技术，在 13.9 GHz 处实现了 3.98 nV/cm/$\sqrt{\text{Hz}}$ 的灵敏度 [15]；山西大学团队利用 Sagnac 干涉增强技术，在 7.97 GHz 处获得 10.7 nV/cm/$\sqrt{\text{Hz}}$ 的灵敏度 [16]；中国科学技术大学团队通过多体临界增强技术，在 16.6 GHz 处达到 49 nV/cm/$\sqrt{\text{Hz}}$ 的灵敏度 [17]；国防科技大学团队采用里德堡阵列光束技术，在 8.57 GHz 处实现了 19 nV/cm/$\sqrt{\text{Hz}}$ 的灵敏度 [18]；清华大学团队利用奇异点增强技术，在 2.5 GHz 处获得 22.63 nV/cm/$\sqrt{\text{Hz}}$ 的灵敏度 [19]。上述工作分别从不同物理机制出发提升了里德堡原子的微波电场探测灵敏度，但多数工作仍以实验室近场或直接注入方式为主，针对远场自由空间弱信号接收的腔增强方案仍较少。本文研制了基于里德堡原子的小型化接收样机，创新性地将超外差探测与微波谐振腔增强技术相结合，在室外环境下成功实现了相距约 20 km 的两个山峰之间的微波信号接收。该距离相较于 2023 年美国陆军报道的 1 km 记录 [9]提升了 20 倍，是迄今为止国际上报道的点对点视距地面链路中最远距离的里德堡原子微波接收实验。需要说明的是，该声明不包含卫星信号接收、自由空间光链路以及短波天波传播等非视距或空间链路场景，例如，已有工作通过短波天波传播接收到约 880 km 以外的广播信号 [10]，其链路距离远超本文的 20 km，但属于非视距天波传播，与本文的点对点视距地面链路不具直接可比性。本文将系统阐述该接收机的系统构成、探测原理及微波收发链路的完整设计。

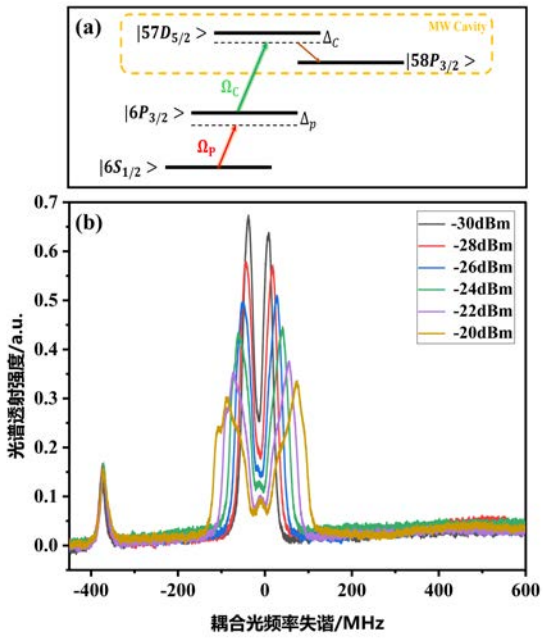


图 1　(a) 里德堡原子能级图;(b) 在向谐振腔施加不同信号源功率微波下的 AT 劈裂图.

Fig. 1. (a) Rydberg energy level diagram; (b) AT splitting spectra under different microwave powers fed into the resonator.

2　探测原理

本文采用铯原子阶梯型三能级体系，通过电磁感应透明（Electromagnetically Induced Transparency, EIT）效应实现微波场的高灵敏探测。如图1(a) 所示，852 nm 探测光将原子从基态 $|6S_{1/2}\rangle$ 激发至中间态 $|6P_{3/2}\rangle$，509 nm 耦合光进一步将原子从 $|6P_{3/2}\rangle$ 激发至里德堡态 $|57D_{5/2}\rangle$。当频率为 ω_{MW} 的微波场共振耦合相邻里德堡态 $|57D_{5/2}\rangle$ 与 $|58P_{3/2}\rangle$ 时，系统形成四能级体系。图1(b) 给出了在微波谐振腔内测量得到的、不同信号源输出功率下的 AT 劈裂谱。在偶极近似和旋转波近似下，该体系的哈密顿量为:

$$H=-\hbar\begin{bmatrix} 0 & \Omega_p/2 & 0 & 0 \\ \Omega_p/2 & \Delta_p & \Omega_c/2 & 0 \\ 0 & \Omega_c/2 & \Delta_p+\Delta_c & \Omega_{\mathrm{MW}}/2 \\ 0 & 0 & \Omega_{\mathrm{MW}}/2 & \Delta_p+\Delta_c+\Delta_{\mathrm{MW}} \end{bmatrix}, \tag{1}$$

其中 Ω_p、Ω_c 和 Ω_{MW} 分别为探测光、耦合光和微波场的拉比频率；Δ_p、Δ_c 和 Δ_{MW} 分别为探测光、耦合光和微波场相对于相应原子跃迁的失谐量；ω_p、ω_c、ω_{MW} 分别为探测光、耦合光和微波场的角频率；ω_{ge}、ω_{er}、$\omega_{rr'}$ 分别为基态到中间态、中间态到里德堡态、相邻里德堡态间的跃迁角频率；$\hbar$ 为约化普朗

录用稿件，非最终出版稿

克常数。在弱探测光近似下（$\Omega_p \ll \Omega_c, \Omega_{\mathrm{MW}}$），探测光透射率为：

$$T(\Delta_p) = \exp\left[-\frac{2\pi N \omega_p |\mathbf{d}_{ge}|^2}{\hbar \epsilon_0 c} \mathrm{Im}(\rho_{ge})\right], \tag{2}$$

其中 N 为原子数密度，$\mathbf{d}_{ge}$ 为基态到中间态的跃迁偶极矩，ρ_{ge} 为原子相干项，ϵ_0 为真空介电常数，c 为真空中光速。在微波场作用下，里德堡态发生 Autler-Townes（AT）分裂，分裂宽度与微波拉比频率 Ω_{MW} 满足：

$$\Delta f_{\mathrm{AT}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\Omega_{\mathrm{MW}}^2 + (\Delta_c - \Delta_{\mathrm{MW}})^2}, \tag{3}$$

当微波场共振时（$\Delta_c = \Delta_{\mathrm{MW}} = 0$），$\Delta f_{\mathrm{AT}} = \Omega_{\mathrm{MW}}/(2\pi)$，而微波拉比频率与微波电场幅度 E_{MW} 成正比：

$$\Omega_{\mathrm{MW}} = \frac{|\mathbf{d}_{rr'}| E_{\mathrm{MW}}}{\hbar}, \tag{4}$$

其中 $\mathbf{d}_{rr'}$ 为相邻里德堡态间的跃迁偶极矩。因此，通过测量 AT 分裂宽度可反推微波电场强度。然而，弱场下两个分裂峰无法分辨，限制了最小可探测场强，可采用里德堡超外差探测方案进一步探测更微弱的信号 [20]。在微波谐振腔中同时馈入弱待测信号（角频率 ω_s，电场幅度 E_s）和强本振微波（角频率 ω_{LO}，电场幅度 E_{LO}），两束微波在里德堡原子中混频产生拍频信号 $\omega_{\mathrm{IF}} = |\omega_s - \omega_{\mathrm{LO}}|$，该拍频信号通过原子相干效应的非线性响应转化为探测光透射率的周期性调制。超外差信号的幅度与信号场和本振场的乘积成正比：

$$I_{\mathrm{IF}} \propto E_s E_{\mathrm{LO}} \cos(\omega_{\mathrm{IF}} t + \phi), \tag{5}$$

其中 ϕ 为信号场与本振场之间的相位差。通过频谱分析仪测量该拍频信号的功率，可精确反推信号场强度。为实现远距离探测，本文采用微波谐振腔进行局域场增强。设外部自由空间电场幅度为 E_{ext}，腔内原子所在位置电场幅度为 E_{in}，场增强因子 F 定义为腔内场与外部场之比 [21]：

$$F = \frac{|E_{\mathrm{in}}|}{|E_{\mathrm{ext}}|}. \tag{6}$$

谐振腔的品质因子 Q 定义为 $Q = \omega_0 U / P_{\mathrm{loss}}$，其中 ω_0 为谐振角频率，U 为腔内储能，P_{loss} 为耗散功率。在谐振条件下，腔内场幅度与输入功率 P_{in} 的关系为：

录用稿件，非最终出版稿

$$|E_{\text{in}}| = \sqrt{\frac{2Q}{\epsilon_0 \omega_0 \Delta V}} \sqrt{P_{\text{in}}}, \tag{7}$$

其中 ΔV 为有效模式体积，定义为腔内电场分布的加权积分：

$$\Delta V = \int_V \Re_E(\mathbf{r}) \frac{\|\mathbf{E}(\mathbf{r})\|^2}{\max\{\|\mathbf{E}(\mathbf{r})\|^2\}} \, \mathrm{d}V, \tag{8}$$

其中 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 为腔内位置 $\mathbf{r}$ 处的电场矢量，V 为腔体体积。外部场 E_{ext} 通过天线增益 G 与接收功率 P_{in} 相关联，由天线理论有 $P_{\text{in}} = |E_{\text{ext}}|^2 G \lambda_0^2/(8\pi\eta_0)$，其中 $\lambda_0 = c/f$ 为自由空间波长，η_0 为自由空间波阻抗。联立式(7)与天线关系式，并利用 $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$、$\lambda_0 = 2\pi c/\omega_0$ 进行化简，定义 $\Lambda = \sqrt{8\pi f^2/(\epsilon_0 c^3 G)}$，最终得到增强因子：

$$F = \Lambda^{-1} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_0 \omega_0}} \sqrt{\frac{Q}{\Delta V}}. \tag{9}$$

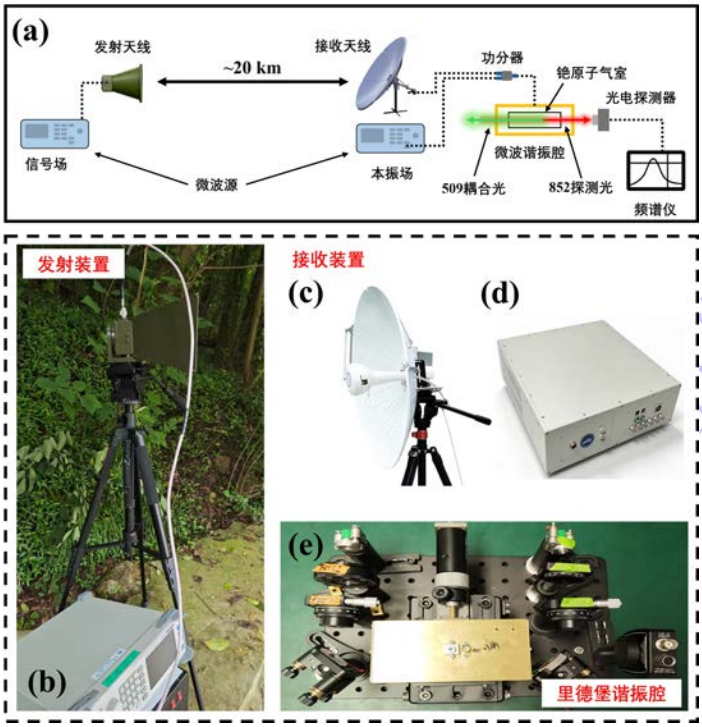


图 2　(a) 完整收发链路；(b) 发射装置；(c) 接收抛物面天线；(d) 里德堡接收样机 (e) 里德堡谐振腔

Fig. 2. (a) Complete transceiver link; (b) Transmitting setup; (c) Receiving setup;(d) Rydberg Receiver; (e) Rydberg resonator.

本文所用谐振腔的电磁仿真与实验标定已在本文团队的另一篇工作中系统开展 [22]。HFSS 全波仿真给出谐振腔在 3.778 GHz 处的无载品质因数 $Q_{\text{th}} = 2407.5$，仿真 $S_{11} = -23.8$ dB，实验中考虑加工公

录用稿件，非最终出版稿

差、铜表面有限电导率、SMA 装配损耗及激光通孔等因素后，实测 $S_{11} = -17$ dB，实验无载品质因数 $Q_{\mathrm{exp}} = 616.2$。取腔体耦合系数 $\eta_c = 0.85$，实验加载品质因数 $Q_{L,\mathrm{exp}} \approx 333.1$。此外，该工作还给出了天线耦合腔相对于直接腔注入配置的电场增强因子 F 约为 22.5 dB。

3 实验系统

本实验的完整系统如图2(a) 所示，由发射端、接收端和信号分析三部分组成。如图2(b) 所示，信号源（Keysight E8257D）产生频率 $f = 3.785$ GHz 的单音微波信号，经功率放大器放大至 $P_t = 26$ dBm 后，通过增益 $G_t = 10$ dBi 的喇叭天线发射。发射地点设于一处山顶，指向接收地点方向。如图2(c) 所示，接收天线为高增益抛物面天线，增益 $G_{r1} = 10$ dBi，口径 0.6 m，精确对准发射方向。接收到的微波信号与本振源（Keysight E8257D，频率设置为 3.78504 GHz，产生 40.4 kHz 的频偏）通过功分器合路后，经同轴电缆（线损 $L_c = 10$ dB）馈入微波谐振腔。需要说明的是，发射端信号源与接收端本振源均为 Keysight E8257D，二者未共用参考时钟，而是各自使用内部参考时钟独立运行；为保证接收频率准确性，实验前对两台 E8257D 进行了充分预热和频率校准，测量过程中通过频谱分析仪实时监测 40.4 kHz 中频信号的频率漂移，并选择频率稳定窗口进行数据采集。如图2(d) 所示为本研究团队研制的里德堡原子微波接收样机，内置探测光与耦合光以及频率锁定模块等，体积为 4U。如图2(e) 所示，微波谐振腔内部封装铯原子蒸气室。探测光和耦合光反向共线穿过原子蒸气室，在谐振腔的波腹位置与原子相互作用。探测光透射信号由光电探测器（APD410A）接收并转换为电信号，输出至频谱分析仪。实验中探测光功率为 100 μW，耦合光功率为 40 mW；探测光和耦合光的 $1/e^2$ 束腰半径分别为 900 μm 和 1 mm。原子气室工作在室外环境温度约 28 °C 下，对应原子数密度约为 6×10^{10} cm^{-3}，实验中测得的 EIT 线宽约为 10 MHz。

4 实验结果

图3(a) 为里德堡超外差接收信号的频谱图，频谱仪中心频率设为 40.4 kHz，对应本振与信号微波的频率差。在分辨率带宽 $\mathrm{RBW}_1 = 5$ Hz 条件下，信号峰幅度高出噪声基底约 20 dB，即 $\mathrm{SNR}_1 = 20$ dB，信号频率稳定在 40.4 kHz。实验过程中在同一接收地点使用传统全向天线标定自由空间路径损耗，结果如图3(b) 所示。根据弗里斯传输公式，空间路径损耗 L_p 为：

$$L_p = P_t + G_t + G_{r0} - P_{r0}, \tag{10}$$

录用稿件，非最终出版稿

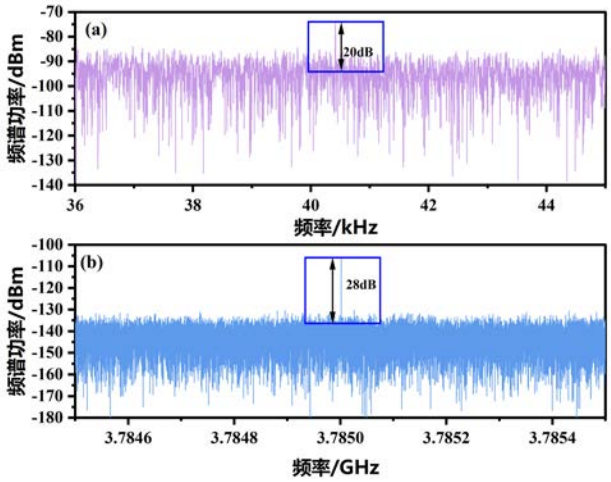


图 3 (a) 里德堡接收信号频谱图（$\mathrm{RBW}_1 = 5$ Hz，外差频率 40.4 kHz）；(b) 传统天线接收频谱图（$\mathrm{RBW}_0 = 100$ Hz）

Fig. 3. (a) Frequency spectrum of the Rydberg-received signal ($\mathrm{RBW}_1 = 5$ Hz, IF=40.4 kHz); (b) Frequency spectrum of the conventional antenna ($\mathrm{RBW}_0 = 100$ Hz).

其中 $P_t = 26$ dBm 为发射功率，$G_t = 10$ dBi 为发射天线增益，$G_{r0} = 0$ dBi 为传统全向接收天线增益（下标 0 代表传统天线系统），$P_{r0} = -107$ dBm 为传统天线接收功率。计算得路径损耗 $L_p = 143$ dB。在里德堡接收机中，考虑同轴电缆线损 $L_c = 10$ dB，实际馈入谐振腔的功率为 $P_{\mathrm{cavity}} = P_{r1} - L_c$，其中 P_{r1} 为里德堡接收天线（增益 $G_{r1} = 10$ dBi，下标 1 代表里德堡系统）接收到的功率，实验测得 $P_{r1} = -107$ dBm，故 $P_{\mathrm{cavity}} = -117$ dBm。里德堡接收机的灵敏度 $P_{\mathrm{sen},1}$ 可由下式计算：

$$P_{\mathrm{sen},1} = P_{\mathrm{cavity}} + G_{r1} - \mathrm{SNR}_1 - 10\log_{10}(\mathrm{RBW}_1), \tag{11}$$

其中 $\mathrm{SNR}_1 = 20$ dB, $\mathrm{RBW}_1 = 5$ Hz。计算得里德堡接收机灵敏度 $P_{\mathrm{sen},1} = -134$ dBm/Hz。通过优化激光线宽、提高光电探测量子效率以及降低原子蒸气室的背景碰撞噪声，有望进一步提升灵敏度。作为对比，使用传统全向天线（增益 $G_{r0} = 0$ dBi）在同一接收位置进行对比实验，结果如图3(b) 所示。需要说明的是，该对比仅为同一接收地点、同一链路条件下的参考标定，而非同等增益或同等口径下的严格灵敏度对比。传统天线系统的灵敏度 $P_{\mathrm{sen},0}$ 同样由式(11)形式的公式计算（此时 G_{r1} 替换为 G_{r0}，SNR_1 替换为 SNR_0，RBW_1 替换为 RBW_0），结合图3(b) 中 $\mathrm{RBW}_0 = 100$ Hz、$\mathrm{SNR}_0 \approx 20$ dB 可得 $P_{\mathrm{sen},0} = -155$ dBm/Hz，优于本工作中的里德堡接收机。若传统天线与里德堡接收机使用相同增益的接收天线，则其灵敏度可进一步改善约 10 dB，即约 -165 dBm/Hz，仍优于本工作中的里德堡接收机。这种性能差距并非源于量子传感

录用稿件，非最终出版稿

表 1　收发链路及接收机性能参数

Table 1. Transceiver link and receiver performance parameters.

参数名称	**符号**	**数值**	**单位**
发射频率	f	3.785	GHz
发射功率	P_t	26	dBm
发射天线增益	G_t	10	dBi
传统接收天线增益	G_{r0}	0	dBi
里德堡接收天线增益	G_{r1}	10	dBi
通信距离	d	≈ 20	km
自由空间路径损耗	L_p	143	dB
同轴电缆线损	L_c	10	dB
里德堡分辨率带宽	RBW_1	5	Hz
里德堡信噪比	SNR_1	20	dB
传统天线灵敏度	$P_{\mathrm{sen},0}$	-155	dBm/Hz
里德堡灵敏度	$P_{\mathrm{sen},1}$	-134	dBm/Hz
谐振腔品质因数	$Q_{L,\mathrm{exp}}$	333.1	–
电场增强因子	F	22.5	dB

原理的先天不足，而是反映了当前技术成熟度上的客观差异。里德堡原子接收机尚处于从原理验证向工程化迈进的发展阶段，其灵敏度指标目前主要受限于光学读出过程中的散粒噪声与激光频率噪声，同时原子气室内壁碰撞弛豫及背景气体导致的退相干效应也显著削弱了里德堡态的有效相干时间，进而降低了超外差混频效率 [20]；此外，微波谐振腔与原子气室的集成方案在阻抗匹配与耦合效率方面仍有较大优化空间，实际作用于原子体系的等效微波功率往往远低于输入端口的标称功率 [21]。这些因素共同导致了当前里德堡接收机在灵敏度上与传统系统存在差距。

传统天线系统的高定向性和高增益依赖于大尺寸的抛物面反射面，而里德堡探头体积仅数厘米，具备显著的体积优势；传统天线在强电磁干扰环境下性能严重退化，而里德堡原子传感器基于全光学读出，本质抗电磁干扰。同时，里德堡传感器可通过选择不同的里德堡态覆盖从 MHz 到 THz 的宽频范围，而传统天线需针对不同频率重新设计。本实验的目的并非证明里德堡传感器优于传统天线，而是验证其在远距离

弱信号探测场景中的可行性，为未来量子传感提供技术储备。本实验成功实现了 20 km 距离的里德堡原子微波信号接收的关键在于超外差探测和谐振腔增强两项技术的协同应用，弥补了远距离传输带来的信号衰减。本研究的主要参数汇总于表1。

5 结论

本文成功实现了基于里德堡原子的 20 km 远距离微波信号接收，系统性地验证了超外差探测与微波谐振腔增强技术的协同效应。本研究建立了完整的里德堡原子微波接收理论模型，完成了从发射端到接收端的完整链路搭建。里德堡接收机灵敏度达 −134 dBm/Hz，20 km 的通信距离是迄今为止报道的点对点视距地面链路中最远距离的里德堡原子微波接收实验。与传统天线系统的对比表明，尽管当前里德堡接收机的灵敏度低于传统高增益天线，但其在体积小型化、抗电磁干扰和频率可重构性等方面具有独特优势。更重要的是，本实验首次在 20 km 尺度上验证了量子传感器在真实室外环境中的工作能力，为未来基于量子体系的远程通信与探测技术提供了关键参考。

参考文献

[1] Sedlacek J A, Schwettmann A, Kuebler H, Loew R, Pfau T, Shaffer J P 2012 *Nat. Phys.* **8** 819

[2] Harrington R 1960 *J. Res. Natl. Bur. Stand. D: Radio Propag.* 1

[3] Robinson A K, Prajapati N, Senic D, Simons M T, Holloway C L 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 114001

[4] Jiao Y C, Han X X, Fan J B, Raithel G, Zhao J M, Jia S T 2019 *Appl. Phys. Express* **12** 126002

[5] Holloway C L, Simons M T, Gordon J A, Novotny D 2019 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **18** 1853

[6] Meyer D H, Cox K C, Fatemi F K, Kunz P D 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 211108

[7] Xie Y P, Lei M W, Shi M 2026 *Acta Phys. Sin.* **75** 030602

[8] Arumugam D, Park J H, Feyissa B, Bush J, Mysore Nagaraja S P 2024 *Sci. Rep.* **14** 18025

[9] Anderson D A, Goncalves L F, Raithel G, Detlefs J 2024 In *2024 IEEE INC-USNC-URSI RADIO SCIENCE MEETING (JOINT WITH AP-S SYMPOSIUM)*, USNC-URSI Radio Science Meeting

录用稿件，非最终出版稿

- Joint with AP-S SYMPOSIUM (Inst Elect & Elect Engineers; Int Union Radio Sci, Italian Natl Comm; Int Union Radio Sci, US Natl Comm; IEEE Antennas & Propagat Soc), p 249. IEEE ITNC-USNC-URSI Radio Science Meeting / IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (AP-S), Florence, ITALY, JUL 14-19, 2024

[10] Lin Y, Zhou A J, Mao R Q, Guo J, Yang K, Fu Y Q 2026 *Acta Phys. Sin.* **75** 090602

[11] Lei M W, Shi M 2026 *IEEE Trans. Quantum Eng.* **7** 1

[12] Bian W, Li Z Q, Liang Q C, Liao K Y, Zhang X D, Yan H 2022 *Navig. Control* **21** 185. (in Chinese) [边武, 李仲启, 梁琼崇, 廖开宇, 张新定, 颜辉 2022 导航与控制 **21** 185]

[13] 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]

[14] Fan H, Kumar S, Sedlacek J, Kuebler H, Karimkashi S, Shaffer J P 2015 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **48** 202001

[15] Borowka S, Pylypenko U, Mazelanik M, Parniak M 2024 *Nat. Photon.* **18** 32

[16] Yan H M, Gao T S, Jing M Y, Yang W G, Zhang H, Liu Z K, Xie J Y, Xiao L T, Jia S T, Zhang L J 2025 *Chin. Phys. Lett.* **42** 120601

[17] Ding D S, Liu Z K, Shi B S, Guo G C, Molmer K, Adams C S 2022 *Nat. Phys.* **18** 1447

[18] Wu B, Mao R Q, Sang D, Sun Z S, Liu Y, Lin Y, An Q, Fu Y Q 2025 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **73** 793

[19] Liang C, Yang C, Huang W, You L 2026 *Phys. Rev. Lett.* **136** 053203

[20] Jing M Y, Hu Y, Ma J, Zhang H, Zhang L J, Xiao L T, Jia S T 2020 *Nat. Phys.* **16** 911+

[21] Sandidge G, Santamaria-Botello G, Bottomley E, Fan H, Popovic Z 2024 *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* **72** 2057

[22] Xie Y P, Chen X B, Lei M W, Shi M 2026. ArXiv:2606.02669v1 [physics.atom-ph]

录用稿件，非最终出版稿

Long-Distance Microwave Reception Based on Rydberg Atoms*

XIE Yipeng[1)2)] LEI Mingwei[1)] SHI Meng[1)†]

1) (*Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*)

2) (*School of Space Exploration, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China*)

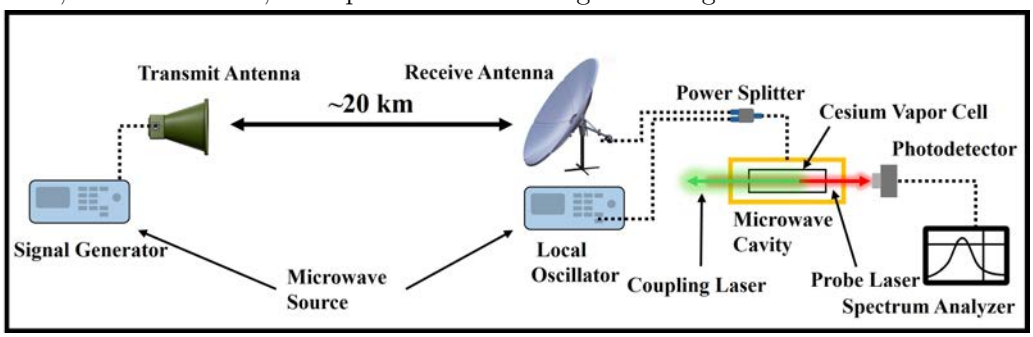
Abstract

Rydberg atoms, distinguished by their exceptionally large electric dipole moments and polarizabilities, have emerged as a compelling platform for microwave electric-field quantum sensing, offering promising prospects in metrology, wireless communication, and radar detection. Nevertheless, a persistent gap separates the high-sensitivity microwave detection capabilities of Rydberg atoms from practical engineering deployment—most notably, the ability to receive weak signals over long distances remains to be fully validated. Here, we develop a miniaturized Rydberg atomic microwave receiving prototype based on a cesium ladder-type three-level system, in which heterodyne detection is synergistically integrated with microwave-resonator local-field enhancement. We successfully demonstrate microwave signal reception over a distance of 20 km in an outdoor, real-world environment. The experiment employs a 3.785 GHz microwave link, with the transmitter and receiver stationed on two hilltops approximately 20 km apart. By mixing the

* Project supported by National Key Research and Development Program of China (Grant No.2024YFB3909500) , the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U2341211,62501568) and the Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences (CSU-CXXD-PY-2025-009).

† Corresponding author. E-mail: shimeng@csu.ac.cn
The First Author. E-mail: xieyipeng24@csu.ac.cn

signal with a local oscillator field inside the atomic vapor cell to generate an intermediate-frequency heterodyne beat signal, the system attains a signal-to-noise ratio of 20 dB at a resolution bandwidth of 5 Hz, corresponding to a microwave detection sensitivity of −134 dBm/Hz. This work not only validates the long-distance operational capability of quantum sensors in complex outdoor environments but also provides an important experimental foundation and reference for developing quantum-based remote communication, radar detection, and spectrum monitoring technologies.



Keywords: Rydberg atoms, EIT, heterodyne detection, microwave cavity

录用稿件，非最终出版稿