

基于原子天线的混沌信号传输

赵晨含¹⁾²⁾ 苏楠¹⁾ 刘瑶¹⁾ 何军^{1)3)†} 詹德芳¹⁾²⁾ 刘智慧¹⁾ 王军民¹⁾³⁾

1) (山西大学光电研究所, 光量子技术与器件全国重点实验室, 太原 030006)

2) (山西大学物理电子工程学院, 太原 030006)

3) (山西大学, 极端光学协同创新中心, 太原 030006)

(2025年4月25日收到; 2025年5月23日收到修改稿)

本文通过构建里德伯原子天线演示了复杂信号的多路并行传输. 利用 852, 509 nm 波长的激光进行双光子级联激发制备铯 (^{133}Cs) 原子里德伯态, 利用差分探测技术消除激光共模噪声, 获得高信噪比的电磁感应透明 (EIT) 光谱. 实验将复杂混沌信号分解为三维独立电场信号, 演示了三路信号的时间分离传输和多载波并行传输. 我们定量评估了传输信号与参考信号的关联特性, 相关结果证实光学原子天线可以实现复杂信号的波形重构.

关键词: 里德伯原子天线, 电磁感应透明, 三维混沌信号, 信号传输**PACS:** 05.45.Gg, 32.80.Rm, 42.50.-p, 42.50.Ex**DOI:** 10.7498/aps.74.20250554**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250554

1 引言

量子测量与原子传感技术通过光学调控手段制备物理量敏感的量子态, 借助单光子计数测量、正交分量测量以及量子层析等测量方法实现传感信息的有效提取. 量子测量和原子传感的融合可以突破经典测量极限, 开展低于标准量子极限的物理量测量, 其展现出的高精度、高灵敏度、直接量子溯源等优势, 在时间、频率、磁场、电场等物理量的传感测量中广泛应用. 基于里德伯原子的量子光谱技术作为新一代弱电磁信号测量的前沿技术, 已完成实验室验证阶段, 正逐步拓展至基础物理探索、量子计量、生物医学及航空航天探测等领域.

高激发态里德伯原子具有寿命长、电偶极矩大、极化率高等特点^[1,2]. 长的原子相干寿命有利于获得高精度原子光谱; 大的原子跃迁偶极矩有利于共振跃迁电磁场的高灵敏测量; 高的电极化率有利

于非共振电磁场的极化测量^[3]. 光学泵浦可以实现里德伯原子量子态的高效制备, 在此基础上发展的电磁感应透明光谱 (EIT)^[4]、光抽运光谱^[5]、相干布居俘获光谱^[6]、Floquet 调制光谱^[7] 等光谱技术, 进一步拓展了基于里德伯原子天线的电磁场光学测量方法.

里德伯原子电磁场测量技术近年来发展迅速. 2012年, 美国俄克拉荷马大学 Shaffer 团队^[8] 基于里德伯原子的电磁感应透明-Autler-Townes (EIT-AT) 分裂, 在热原子蒸汽池中实现微波电场测量, 测得灵敏度为 $30 \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{1/2}$, 场强为 $8 \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$. 2017年, Shaffer 团队^[9] 利用马赫-曾德尔干涉仪和外差检测技术抑制测量噪声, 使实验获得的灵敏度提升至 $5 \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{1/2}$, 该实验建立了微波场拉比频率与 AT 分裂的线性关系, 为场强量子标定提供理论依据. 2020年, 山西大学贾锁堂、肖连团、张临杰团队^[10] 提出基于里德伯原子的超外差微波测量技术, 将极限灵敏度推至 $55 \text{nV}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{1/2}$. 2022年,

† 通信作者. E-mail: hejun@sxu.edu.cn

中国科学技术大学史保森、丁冬生团队^[11]利用强关联系统的相变测量微波电磁场, 实验灵敏度达到 $49 \text{ nV}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{1/2}$. 近年来, 里德伯原子天线研究发展了强度调制、相位调制^[12,13]、频率调制^[14]以及腔增强光谱^[15]等光谱技术, 除了场强测量外, 已经实现了电磁波的频率、极化、相位、强度等参数测量^[16], 这些工作共同推进了里德伯原子天线的进步.

无线电通信通常采用 kHz—GHz 频段的电磁场作为载波, 通过载波调幅 (AM)、调频 (FM)、调相 (PM) 或正交调制实现信号的调制和解调. 里德伯原子天线可以实现 kHz—GHz 频段的电磁场测量或传感, 同时也具备对复杂调制信号的接受和解调能力. 2018 年, 新西兰奥塔哥大学 Kjærgaard 团队^[17]基于里德伯原子天线将自由空间射频载波基带信息编码到探测光, 实现了基带信号的光电转换; 同年, 美国马里兰大学联合多家单位^[18]演示了基于里德伯原子天线的微波数字通信. 2019 年, 山西大学赵建明研究团队^[19]利用 AM 调制光谱技术提升了通信可靠性, 信号保真度超 95%; 与此同时, 中国计量科学研究院宋振飞团队^[20]搭建里德伯原子微波电场通信测量平台, 展示了伪随机二进制序列 (PRBS) 信号的数字通信, 传输速率达到了 500 kbit/s. 2020 年, 美国 Rydberg Technologies Inc. 公司^[14]基于里德伯原子天线的 AM 和 FM 调制技术, 演示了音频信号的接收以及覆盖 C 波段到 Q 波段的电磁波通信技术. 2021 年, 美国 NIST 的 Holloway 团队^[21]基于里德伯原子天线的相位调制展示了多种类型的信号接收, 实现了高容量正交振幅调制 (QAM) 信号传输容错控制.

里德伯原子天线技术通信载波覆盖 kHz—THz, 支持 AM, FM, QAM 等多制式信号, 在数字通信、多信道处理和高阶调制信号接收方面展现出

应用潜力. 2018 年, 美国马里兰大学联合陆军研究实验室^[18]基于幅度调制 (AM) 光谱技术成功地实现了微波数字通信系统的原子态信息承载; 通过创新性引入快速相位调制方法, 进一步验证了八进制相移键控 (8-PSK) 调制方案的有效性. 同年, 美国 NIST Holloway 团队^[21]系统地开展了相位调制通信研究, 利用矢量信号分析仪成功接收 BPSK, QPSK 及 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM 多制式信号. 实验数据显示, 在符号速率 100 kSym/s 条件下, 系统误码率低于 5%; 当放宽误差容限至 10% 时, 符号速率可提升至 1 MSym/s, 展现出优异的信号解析能力. 里德伯原子接收天线凭借 kHz—THz 频段电磁场的接受和探测能力, 为时分复用、频分复用等并行通信提供了技术方案. 通过引入频分复用技术与动态相位调制, 里德伯原子天线的信号容量与抗干扰能力得到提升.

本文利用里德伯原子构建原子天线. 基于微波电场混沌信号的传输, 我们设计实验方案, 将复杂混沌信号分解为三维独立电场信号, 分别演示三路信号的时间分离传输和载波分离并行传输. 经过对传输信号与参考信号相关性参数的定量测量表明, 基于光学原子天线可以实现复杂信号的波形重构. 表 1 为本实验与国内外相关工作对比表.

2 实验原理

我们选择铯 (^{133}Cs) 原子构建光学原子天线, 原子基态 $|1\rangle$ 、中间态 $|2\rangle$ 和里德伯态 $|3\rangle$ 分别对应 $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2} \rightarrow 65S_{1/2}$ 跃迁能级, 如图 1 所示. 实验采用 852 nm 探测激光驱动 $|1\rangle, |2\rangle$ 跃迁, 509 nm 耦合光驱动 $|2\rangle, |3\rangle$ 跃迁, Δ_p, Δ_c 分别为对应原子跃迁能级的激光频率失谐量. 阶梯型的双光子共振跃迁会通过 EIT 效应实现窄线宽光谱^[24].

表 1 国内外信号传输相关工作对比表

Table 1. Comparison table of signal transmission-related work at home and abroad.

时间	研究团队	信号类型	保真度
2018年	新西兰奥塔哥大学Kjærgaard团队 ^[17]	基带信号单通道传输	较高
2019年	山西大学赵建明团队 ^[19]	数字信号单通道传输	超95%
2019年	中国计量科学研究院宋振飞团队 ^[20]	数字信号单通道传输	接近100%
2020年	美国Rydberg Technologies Inc.公司 ^[14]	音频信号单通道传输	较高
2021年	美国NIST的Holloway团队 ^[21]	数字信号单通道传输	超95%
2022年	北京量子信息科学研究院杨仁福团队 ^[22]	模拟信号、数字信号双通道传输	较高
2024年	西北工业大学高永胜团队 ^[23]	数字信号单通道传输	超90%
2025年	本实验	模拟信号三通道同时传输	超90%

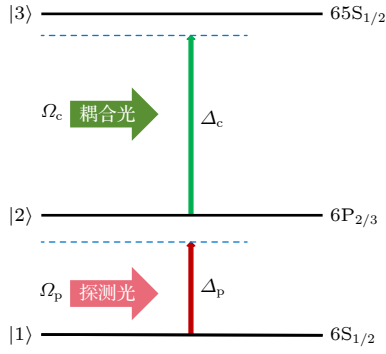


图 1 铯原子里德伯跃迁能级图

Fig. 1. Rydberg transition energy level diagram of the caesium atom.

在三能级 EIT 的基础上, 引入微波场耦合临近的里德伯态, 强耦合条件下会产生 EIT-AT 分裂, 即 EIT 单峰透射光谱分裂为两个. 在弱电场条件下, 微波场耦合会导致原子能级移动, 这种失谐导致的 EIT 透射强度近线性依赖微波电场强度, 基于该效应可以开展对微波或者低频电场的波形、幅度、频率等参数的测量.

我们通过微波电场的幅度调制加载 Lorenz 混沌信号, 演示复杂信号的多路并行传输. Lorenz 系统是最早被发现的混沌系统之一, 最初用于描述大气对流中的简化模型, 其数学表达式为^[25]

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \sigma(y - x), \\ \frac{dy}{dt} = x(Ra - z) - y, \\ \frac{dz}{dt} = xy - \beta z, \end{cases} \quad (1)$$

其中 σ 为普朗特数, 其控制热对流强度; Ra 为瑞利数, 其决定系统分岔行为; β 为几何参数.

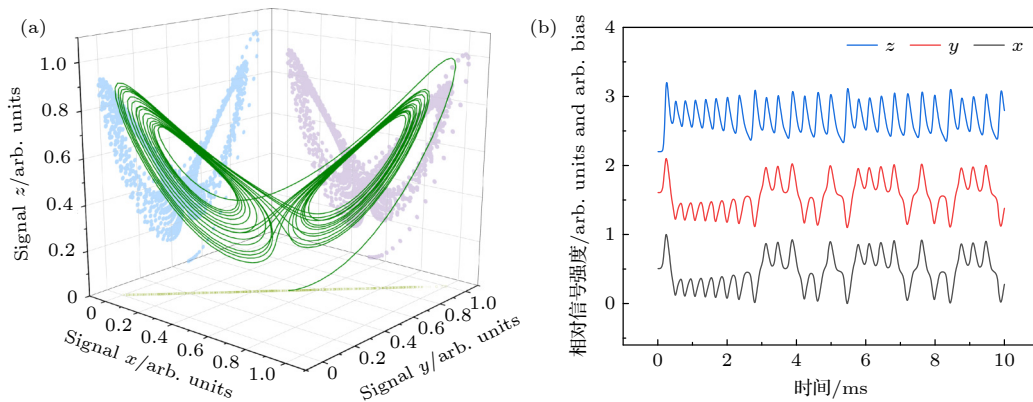

 图 2 数值模拟生成混沌系统 (a) 三维图像; (b) x, y, z 三维度时域信号

 Fig. 2. Numerical simulation of chaotic systems: (a) Three-dimensional images; (b) $x, y,$ and z three-dimensional time-domain signals.

实验中, 利用 Matlab 软件生成混沌系统图像, 如图 2(a) 所示; 分解混沌信号生成 x, y, z 三个维度的时域电信号, 如图 2(b) 所示. 时域电信号与里德伯原子的相互作用会产生斯塔克效应, 该效应通过原子跃迁频率失谐将电场幅值的变化转化为 EIT 光谱探测光的强度变化, 通过 852 nm 探测光信号可以直接测量, 后续将光电转换信号输入频谱分析仪或示波器进行数据采集, 实现时域波形的识别与传输.

3 实验装置

实验装置如图 3 所示. 852 nm 探测光由半导体激光器产生, 激光频率共振铯原子 D2 线 $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}$ 跃迁, 509 nm 耦合光由光纤激光器产生, 激光频率共振 $6P_{3/2} \rightarrow 65S_{1/2}$ 里德伯态跃迁^[26,27]. 852 nm 激光和 509 nm 激光经玻片和偏振分光棱镜 (PBS) 系统分束, 852 nm 输出光束分别为 B1, B2 和 B3, 509 nm 输出光束为 B4 和 B5. B1 光用于搭建饱和吸收光谱, 锁定 852 nm 激光铯原子 $6S_{1/2} (F=4) \rightarrow 6P_{3/2} (F=5)$ 在 D2 共振跃迁线上; B2 探测光与 B4 耦合光在原子气室中共线反向传输, 搭建参考 EIT 光谱用于锁定 509 nm 激光. 同样, B3 光束与 B5 光束在带电极的原子气室内反向共线传输, 搭建 EIT 用于实现里德伯原子天线. 混沌电场信号由任意波形发生器双通道输出, 一路接入示波器作为参考信号, 另一路加载于原子气室电极产生待测场. 输出 852 nm 探测光进入光电探测器, 经光电转换后与参考信号在示波器同步采集.

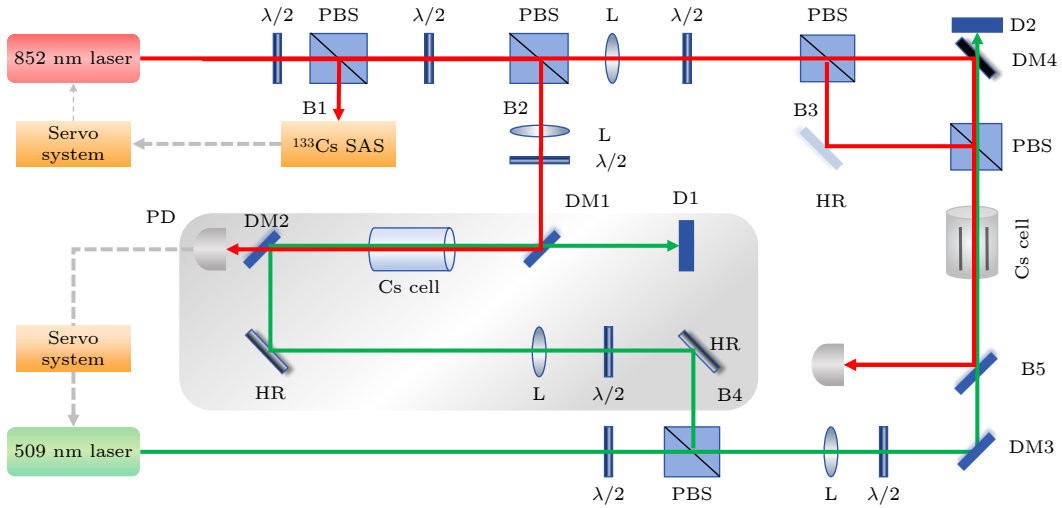


图 3 铯原子光谱实验装置图, 其中, $\lambda/2$ 是半波片; PBS 是偏振分光棱镜; L 是透镜; DM1 和 DM4 分别是 852 nm 高反射率 (HR) 和 509 nm 高透射率 (HT) 双色镜; DM2 和 DM3 分别是 852 nm 高透射率 (HT) 和 509 nm 高反射率 (HR) 双色镜; PD 是光电探测器; SAS 是饱和吸收光谱; D 是激光收集器

Fig. 3. Diagram of the caesium atomic spectroscopy experimental apparatus, where $\lambda/2$ is a half-wave plate; PBS is a polarising beamsplitter prism; L is a lens; DM1 and DM4 are dichroic mirrors with high reflectivity (HR) at 852 nm and high transmittance (HT) at 509 nm, respectively; DM2 and DM3 are dichroic mirrors with high transmittance (HT) at 852 nm and high reflectivity (HR) at 509 nm, respectively; PD is a photodetector; SAS is the saturation absorption spectrum; D is the laser collector.

4 结果与分析

实验获得的典型 EIT 信号如图 4 所示, 其中, 852 nm 探测光锁频于 $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F=5)$ 跃迁线, 509 nm 耦合光在 $6P_{3/2}(F=5) \rightarrow 6S_{1/2}$ 跃迁线附近扫描, 探测光功率为 23 μW , 耦合光的功率为 200 mW.

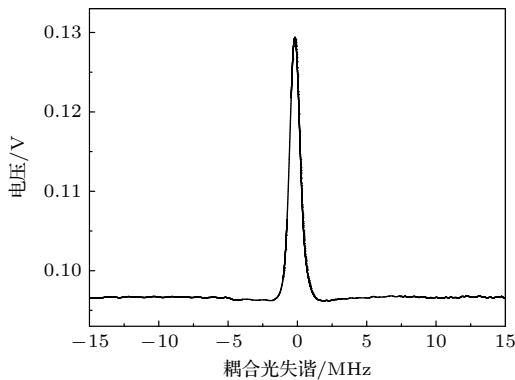


图 4 实验测量的铯里德伯原子 EIT 信号

Fig. 4. Experimentally measured CIT signal for caesium Rydberg atom.

混沌信号传输和接收过程如下: 1) 利用饱和和吸收谱实现 852 nm 激光频率锁定, 利用 EIT 光谱实现 509 nm 激光频率锁定, 引入差分探测抑制 852 nm 探测光的共模噪声; 2) 利用任意函数发生器生成含时混沌电信号; 3) 含时混沌电信号分别

通过 3 kHz, 5 kHz, 4 kHz 载波 (x, y, z 方向) 实现信号发射; 4) kHz 信号通过在原子气室内部集成电极引入时变电场; 5) 利用 EIT 光谱实现电信号的光学测量, 输出 852 nm 探测光进入光电探测器, 经光电转换后与参考信号在示波器同步采集.

图 5 所示为混沌模型三路信号时域波形的测量. EIT 光谱的响应时间在 μs 量级, 对于 kHz 频率的电信号可以实时测量. 在图 5 中, 上方红色信号为测量信号, 下方黑色信号为参考信号, 二者在时间序列上波形轮廓吻合较好. 时间分离的单路信号通过时间同步进行混沌图形的重构, 图 6(a) 和图 6(b) 分别为参考与测量混沌图形的重构, 信号在 xy, xz, yz 三平面上的线性投影表明相似度较好, 合成的混沌图形的重构也基本一致.

我们引入相关系数来定量评价三个维度的传输效果. 相关系数用于衡量两个变量之间线性相关程度, 是作为评估保真度的一个重要指标, 其值介于 -1 和 1 之间, 数值越接近 1, 说明两信号之间的线性关系越强. 本文用 Pearson 相关系数来表征统计指标, 计算给出的三个维度时序信号相关系数分别为 0.99726, 0.99657, 0.98475. 上述参数表明参考信号和测量信号在三个维度上都呈现出高度相关性和高保真度. 为了更直观地呈现这种关系, 我们给出了参考信号与测量信号的相关性热图, 如图 7 所示, 热图颜色的深浅反映了相关性的高低程

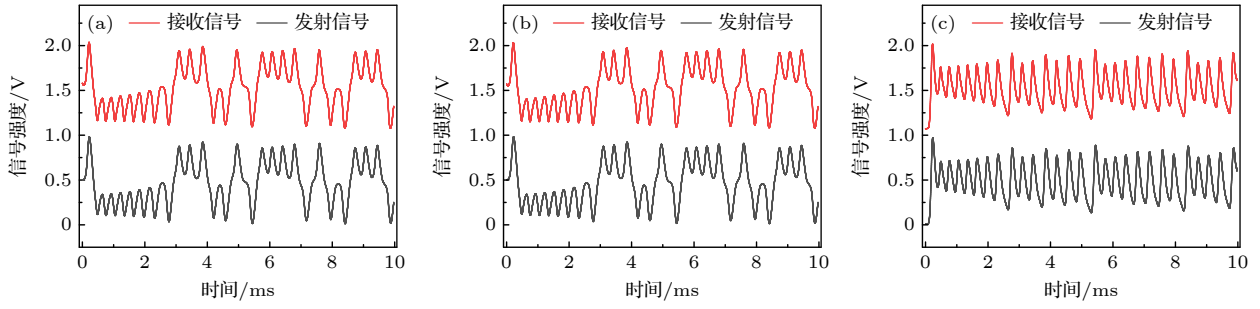


图 5 参考波形和测量波形 (a) x 方向; (b) y 方向; (c) z 方向

Fig. 5. Reference waveform and measured waveforms: (a) x -direction; (b) y -direction; (c) z -direction.

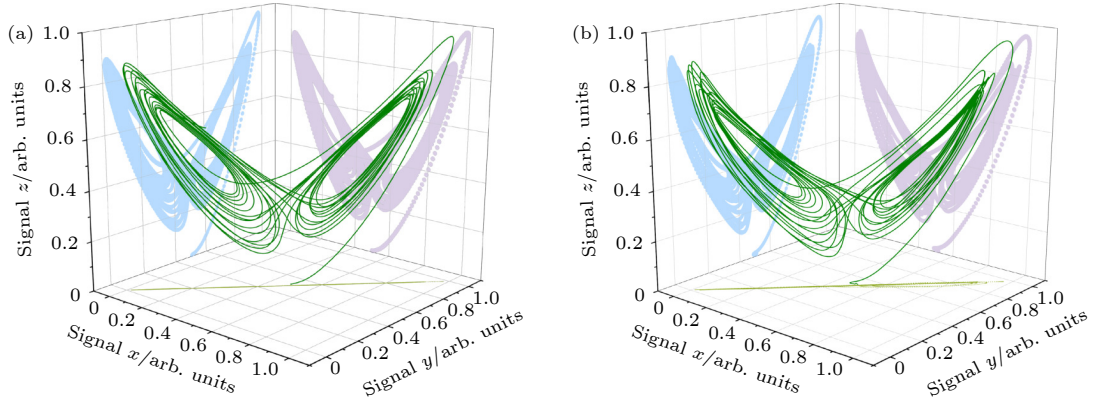


图 6 (a) 参考波形三维图像; (b) 识别波形三维图像

Fig. 6. (a) Reference waveform three-dimensional image; (b) identified waveform three-dimensional image.

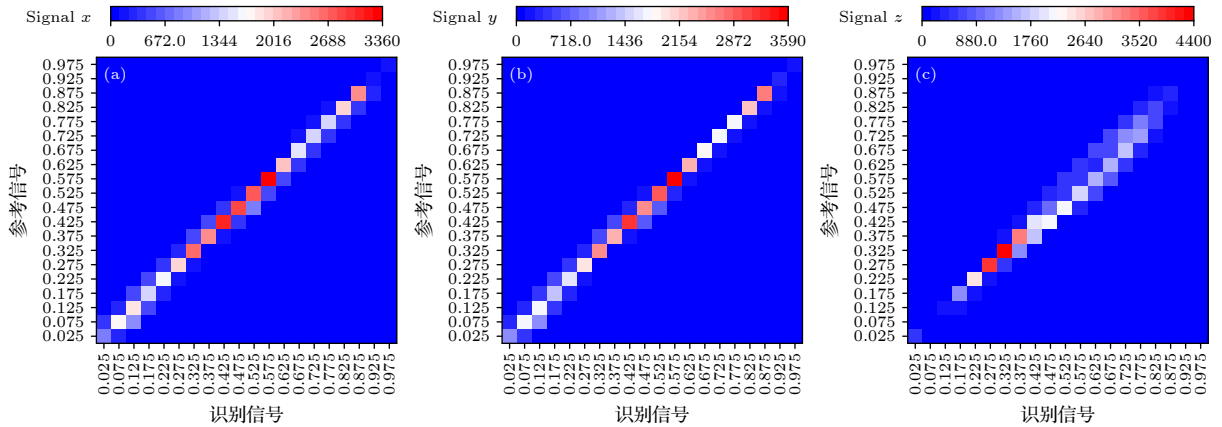


图 7 识别信号与参考信号的相关性热图 (a) x 方向; (b) y 方向; (c) z 方向

Fig. 7. Heat map of the correlation between the signal and the reference signal: (a) x -direction; (b) y -direction; (c) z -direction.

度. 可以看出, 整个热图呈现出高的相关性.

我们进一步利用差异系数衡量两信号数据之间的离散程度, 同时差异系数也可以衡量信号传输的保真度. 三个维度计算给出差异系数的平均数分别为 0.04322, 0.04449, 0.04626, 均小于 0.05, 因此本实验信号传输的保真度大于 95%. 这一结果进一步证实了在三维混沌信号的传输过程中的波形变化或环境干扰较小. 对上述定量参数的评估从多个维

度验证了里德伯原子天线在复杂信号传输过程中具有较高的保真度.

上述工作将复杂混沌信号分解为三维独立电场信号, 分别演示三路信号的时间分离传输. 我们进一步验证三路信号的并行传输. 混沌信号三维分解后, 分别通过强度调制加载在 3 kHz, 5 kHz, 4 kHz 的载波 (x, y, z 方向) 上并行传输, 在接收端通过多路锁相同时解调输出. 图 8 为并行传输的三

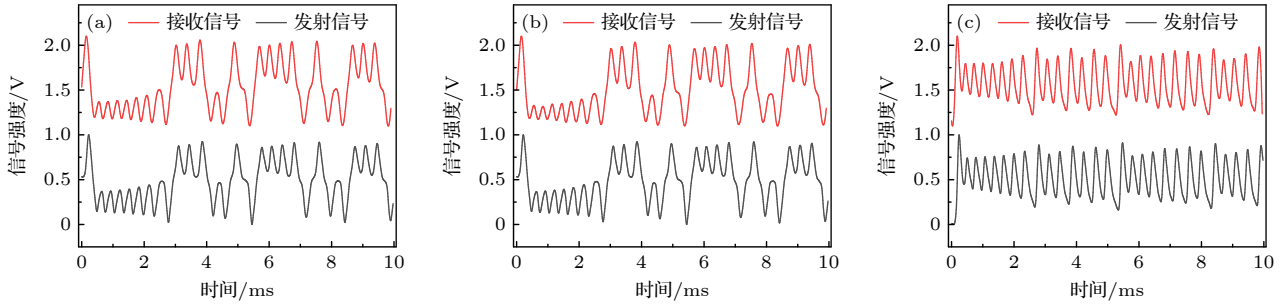


图 8 参考波形和测量波形 (a) x 方向; (b) y 方向; (c) z 方向

Fig. 8. Reference waveform and measurement waveform: (a) x direction; (b) y direction; (c) z direction.

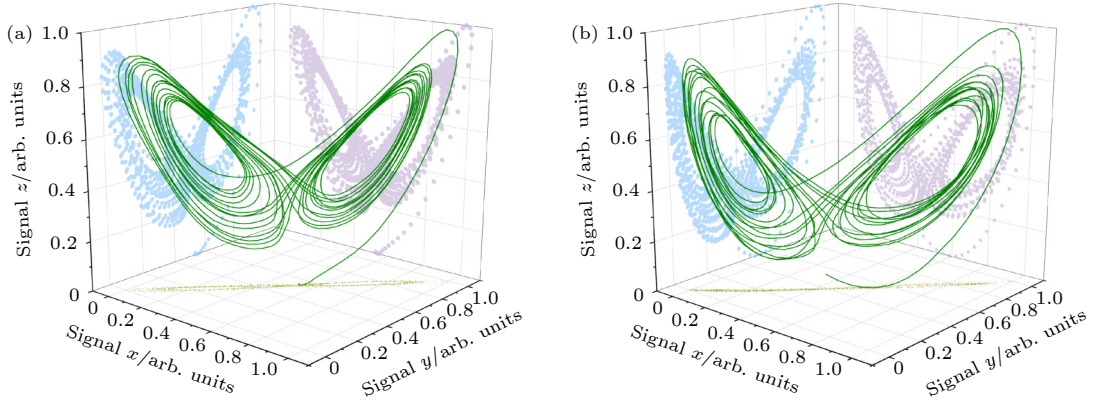


图 9 (a) 参考波形三维图像; (b) 识别波形三维图像

Fig. 9. (a) Three-dimensional image of the reference waveform; (b) three-dimensional image of the identified waveform.

路信号波形测量. 图中上方红色信号为解调后的测量信号, 下方黑色信号为参考信号, 参考信号与测量信号在时域上具有较高的吻合度, 信号传输保真度较高.

我们将解调后的三路识别信号时间同步后合成, 如图 9 所示. 合成混沌信号与三维参考信号在整体形态上相近, 其在 xy , xz , yz 三平面上的线性投影表明信号相似度较好. 三路信号并行传输合成后的信号能够高度还原复杂混沌信号的特征. 并行传输在提高信号传输效率、优化频谱利用率等方面有潜在优势.

上述分析结果充分说明了本研究所采用的三维混沌信号传输方案具有良好的可靠性, 为相关领域的实际应用提供了坚实的实验依据.

5 结 论

本文构建了里德伯原子天线, 演示验证了复杂信号的多路并行传输方案. 实验利用 852 nm 激光和 509 nm 激光实现铯原子里德伯态激发, 利用差分探测技术消除激光共模噪声, 获得高信噪比 EIT

光谱. 将复杂混沌信号分解为三维独立电场信号, 分别演示三路信号的时间分离传输和载波分离并行传输. 对传输信号与参考信号相关性参数的定量测量表明, 基于光学原子天线可以实现复杂信号的波形重构.

本文基于里德伯原子构建原子天线, 演示并验证混沌信号的时间分离传输和载波分离并行传输, 验证了复杂信号多路传输的可行性. 实验将三维混沌信号分解后加载在 kHz 载波进行传输和探测. 混沌系统是一种非线性动力系统, 其行为在长时间尺度上表现出高度的不可预测性和对初始条件的极端敏感性^[25]. 这种系统在气象学、流体力学、生物学、经济学以及通信技术等方面都有广泛的应用, 在通信中可以利用混沌信号进行加密, 以提高信息传输的安全性. 混沌信号本身是高维度含时信号, 加载信号过程中, 其匹配里德伯原子天线的三维电信号维度分解需要参数优化; 传输信号过程中, 系统稳定运行要精确控制, 微小的环境噪声或者测量误差都可能导致测量的三维混沌信号失真. 未来的研究需要进一步优化信号分解、传输和重构技术, 提高信号传输的精度和稳定性, 充分发挥该

技术的优势, 推动其在更多领域的广泛应用. 复杂信号并行传输展现了里德伯原子天线的潜力与应用能力. 里德伯原子天线具有宽的电磁场频谱探测能力, 在并行通信或抗干扰通信场景中, 允许将信号编码至不同频段载波并行传输以实现多频无干扰通信, 提升复杂电磁环境下通信的可靠性与稳定性. 在隐蔽通信中, 原子天线作为接收端, 可以接收和恢复多种编码的并行载波传输信号, 该技术可以将单一信号功率谱密度降低至噪声水平以下, 降低信号截获概率, 为信息的安全传输提供技术途径.

参考文献

- [1] He J, Liu Q, Yang Z, Niu Q Q, Ban X J, Wang J M 2021 *Phys. Rev. A* **104** 063120
- [2] Meyer D H, Kunz P D, Cox K C 2021 *Phys. Rev. Appl.* **15** 014053
- [3] Wu P, Wu F, 2022 *Electron. Inf. Warfare Technol.* **37** 5 (in Chinese) [鲜佩, 吴峰 2022 电子信息对抗技术 **37** 5]
- [4] Fu Y Q, Lin Y, Wu B, An Q, Liu Y 2022 *Chin. J. Radio. Sci.* **37** 279 (in Chinese) [付云起, 林沂, 武博, 安强, 刘隸 2022 电波科学学报 **37** 279]
- [5] Liu H F 2014 *M. S. Thesis* (Taiyuan: Shanxi University) (in Chinese) [刘慧丰 2014 硕士学位论文 (太原: 山西大学)]
- [6] Wang X F, Liu C T, Lu X D, Li J J, Deng Y C, Xu Q F 2025 *Laser Optoelectron. Prog.* **62** 0100010 (in Chinese) [王学锋, 刘崇泰, 卢向东, 李建军, 邓意成, 徐强锋 2025 激光与光电子学进展 **62** 0100010]
- [7] Zhang L H 2024 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [张力华 2024 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [8] Sedlacek J A, Schwettmann A, Kübler H, Löw R, Pfau T, Shaffer J P 2012 *Nat. Phys.* **8** 819
- [9] Kumar S, Fan H Q, Kübler H, Sheng J T, Shaffer J P 2017 *Sci. Rep.* **7** 42981
- [10] Jing M Y, Hu Y, Ma J, Zhang H, Zhang L J, Xiao L T, Jia S T 2020 *Nat. Phys.* **16** 911
- [11] Ding D S, Liu Z K, Shi B S, Guo G C, Mølmer K, Adams C S 2022 *Nat. Phys.* **18** 1447
- [12] Simons M T, Haddab A H, Gordon J A, Holloway C L 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 114101
- [13] Holloway C L, Simons M T, Gordon J A, Novotny D 2019 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **18** 1853
- [14] Anderson D A, Sapiro R E, Raithel G 2021 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **69** 2455
- [15] Wang Q X 2023 *Ph. D. Dissertation* (Taiyuan: Shanxi University) (in Chinese) [王勤霞 2023 博士学位论文 (太原: 山西大学)]
- [16] 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]
- [17] Deb A B, Kjærgaard N 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 211106
- [18] Meyer D H, Cox K C, Fatemi F K, Kunz P D 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 211108
- [19] Jiao Y C, Han X X, Fan J B, Raithel G, Zhao J M, Jia S T 2019 *Appl. Phys. Express* **12** 126002
- [20] Song Z F, Liu H P, Liu X C, Zhang W F, Zou H Y, Zhang J, Qu J F 2019 *Opt. Express* **27** 8848
- [21] Robinson A K, Prajapati N, Senic D, Simons M T, Holloway C L 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 114001
- [22] Du Y J, Cong N, Wei X G, Zhang X N, Luo W H, He J, Yang R F 2022 *AIP Adv.* **12** 065118
- [23] Gao Y S, Wen W, Pang X Y, et al. 2025 CN202411680275.4 (in Chinese) [高永胜, 文雯, 庞晓炎, 等 2025 CN202411680275.4]
- [24] Otto J S, Hunter M K, Kjærgaard N, Deb A B 2021 *Appl. Phys. Lett.* **129** 154503
- [25] Chen Y 2019 *M. S. Thesis* (Zhenjiang: Jiangsu University) (in Chinese) [陈远 2019 硕士学位论文 (镇江: 江苏大学)]
- [26] Ding C, Hu S S, Deng S, Song H T, Zhang Y, Wang B S, Yan S, Xiao D P, Zhang H Q 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 043201 (in Chinese) [丁超, 胡珊珊, 邓松, 宋宏天, 张英, 王保帅, 阎晟, 肖冬萍, 张淮清 2025 物理学报 **74** 043201]
- [27] Li W, Zhang C G, Zhang H, Jing M Y, Zhang L J 2021 *Laser Optoelectron. Prog.* **58** 144 (in Chinese) [李伟, 张淳刚, 张好, 景明勇, 张临杰 2021 激光与光电子学进展 **58** 144]

Chaos signal transmission based on atomic antennas

ZHAO Chenhan¹⁾²⁾ SU Nan¹⁾ LIU Yao¹⁾ HE Jun^{1)3)†}ZHAN Defang¹⁾²⁾ LIU Zhihui¹⁾ WANG Junmin¹⁾³⁾

1) (*State Key Laboratory of Quantum Optics Technologies and Devices, Institute of Optoelectronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

2) (*School of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

3) (*Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

(Received 25 April 2025; revised manuscript received 23 May 2025)

Abstract

To achieve multi-channel parallel transmission of complex signals and enhance spectral efficiency, this study presents a Rydberg atomic antenna system that can demonstrate multiplexed communication schemes. 852-nm and 509-nm lasers are used to excite cesium atoms into Rydberg states in a vapor cell, while employing differential detection techniques to suppress common-mode noise in order to obtain high signal-to-noise ratio electromagnetically induced transparency (EIT) spectra. Under weak electric field conditions, microwave field coupling causes atomic energy level shifts, resulting in two-photon detuning and rendering the EIT transmission intensity almost linearly dependent on the microwave electric field strength. Based on this effect, the integrated electrode configuration in the atomic cell generates a time-varying electric field, which can measure the waveforms, amplitudes, and frequencies of microwave and low-frequency electric fields. According to this principle, we decompose complex chaotic signals into three-dimensional orthogonal electric field components in order to demonstrate time-division multiplexing (TDM) of three-channel signals. Meanwhile, frequency-division multiplexing (FDM) is realized by modulating the x -, y -, z -channels with 3 kHz, 5 kHz, and 4 kHz carriers, respectively. The quantitative analysis of the parameters related to the transmission signal and the reference signal reveals high-fidelity reconstruction, with the fidelity levels reaching 95% for TDM and 90% for FDM. These results validate the feasibility of using optical atomic antennas to reconstruct complex signal waveforms and emphasize the potential of Rydberg-based systems in high-performance electromagnetic field sensing and communication applications.

Keywords: Rydberg atomic antenna, electromagnetically induced transparency, three-dimensional chaotic signals, signal transmission

PACS: 05.45.Gg, 32.80.Rm, 42.50.-p, 42.50.Ex

DOI: [10.7498/aps.74.20250554](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250554)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250554](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250554)

† Corresponding author. E-mail: hejun@sxu.edu.cn



基于原子天线的混沌信号传输

赵晨含 苏楠 刘瑶 何军 詹德芳 刘智慧 王军民

Chaos signal transmission based on atomic antennas

ZHAO Chenhan SU Nan LIU Yao HE Jun ZHAN Defang LIU Zhihui WANG Junmin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 150501 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250554

CSTR: 32037.14.aps.74.20250554

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250554>

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

电磁感应透明条件下里德伯原子系统的亚稳动力学

Metastable dynamics of Rydberg atomic system under electromagnetically induced transparency

物理学报. 2024, 73(10): 104203 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240233>

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>

基于冷里德堡原子电磁感应透明的微波电场测量

Measurement of microwave electric field based on electromagnetically induced transparency by using cold Rydberg atoms

物理学报. 2023, 72(4): 045204 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222059>

射频电场缀饰下铯Rydberg原子的电磁感应透明光谱

Electromagnetically induced transparency spectra of cesium Rydberg atoms decorated by radio-frequency fields

物理学报. 2024, 73(11): 113201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240355>

里德伯原子幻零波长

Tune-out wavelengths of Rydberg atoms

物理学报. 2024, 73(13): 130701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240397>

基于纳秒光脉冲激发的里德伯原子光谱

Rydberg atomic spectroscopy based on nanosecond pulsed laser excitation

物理学报. 2025, 74(1): 013201 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20240900>