

基于里德伯原子的 Loran-C 信号接收*

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, 量子精密测量实验室, 北京 100094)

2) (中国科学院大学, 航空宇航学院, 北京 101408)

(2025 年 7 月 9 日收到; 2025 年 10 月 20 日收到修改稿)

Loran-C 系统凭借其低频信号在抗干扰和穿透能力方面的优势, 可作为全球卫星导航系统 GNSS(global navigation satellite system) 的有效备份, 然而, 传统 Loran-C 接收机存在灵敏度低、体积庞大等固有缺陷. 本文提出一种基于里德伯原子传感器的 Loran-C 信号接收机, 利用参比电极将 Loran-C 低频电场耦合至内置平行电极板的原子气室中, 并使用直流电场辅助优化, 通过电磁感应透明效应结合斯塔克频移效应, 实现对电场强度与相位信息的直接高灵敏度测量. 研究构建了基于 FPGA 的硬件采集与 MATLAB 的信号处理平台, 成功实现了天地波识别、时间差提取与定位解算和授时解码, 实验验证了该里德伯原子 Loran-C 接收机的定位以及授时功能. 研究表明, 里德伯原子传感器有望显著提升 Loran-C 信号的低频探测灵敏度与动态范围, 为发展下一代高可靠、高性能的导航授时系统开辟了量子传感技术的新途径.

关键词: 里德伯原子, 斯塔克效应, 电磁感应透明, Loran-C 信号**DOI:** 10.7498/aps.75.20250900**CSTR:** 32037.14.aps.75.20250900

1 引言

Loran-C 系统作为星基导航系统 GNSS(global navigation satellite system) 的备份系统^[1], 可在卫星信号受到干扰或屏蔽的环境中发挥其关键作用, 其精确性和可靠性对于军事、民用航空、海洋运输以及地面交通等领域至关重要^[2-4]. 然而, 随着技术的发展, 对 Loran-C 系统的性能要求也在不断提高, 这促使研究者探索新的技术以提升其效率和准确性.

近年来, 里德伯原子作为一种新兴的量子传感技术, 在电场精密测量领域取得极大的研究进展. 里德伯原子是一种处于高激发态的原子, 这使得它们具有巨大的电偶极矩和电极化率, 从而在电场探测方面展现出极高的灵敏度. 与传统的金属天线相比, 里德

伯原子传感器灵敏度高、尺寸小、动态范围大、可溯源至基本物理常数, 是一种应用潜力巨大的新型电磁感知技术, 基于其电磁感应透明 (electromagnetically induced transparency, EIT) 效应和 Autler-Townes (AT) 劈裂效应, 目前可实现对微波电场强度^[5]、极化^[6-9]、相位^[10-13] 和到达角^[14-17] 等特性的测量. 在低频电场探测领域, Grimmel 等^[18] 利用内置电极的原子气室测量了强度高达 500 V/cm 的直流电场, 并进行了相关的理论验证. Li 等^[19] 利用内置有平行电极的原子气室实现了超低频的电场测量, 实验中同时使用辅助直流场来提高灵敏度, 并分析了激光极化和电场之间的角度的关系, 最终测得频率为 100 Hz 的电场场强最小值为 214.8 $\mu\text{V}/\text{cm}$, 测量灵敏度为 67.9 $\mu\text{V}/(\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2})$, 线性动态范围超过 37 dB. Lei 和 Shi^[20] 利用外加直流场的内置平行电极板里德伯原子传感器实现了低频、超低

* 国家重点研发计划 (批准号: 2024YFB3909500) 和国家自然科学基金联合基金 (批准号: U2341211) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: shimeng@csu.ac.cn

频、甚低频的高灵敏度测量. Xie 等^[21]利用里德伯原子传感器实现了低频数字信号通信.

本研究将里德伯原子电场探测技术引入 Loran-C 信号的接收过程, 使用参比电极将 Loran-C 信号引入一个内置金属电极板的铯原子气室, 从而避免了气室对低频电场的屏蔽效应. 在此基础上, 进一步采用直流电场与 Loran-C 信号电场合成的方法, 显著提升了对低频电场的探测灵敏度, 并为 Loran-C 的信号采集和处理设计了基于 FPGA 的硬件设备和 MATLAB 上位机程序. 本文详细介绍了里德伯原子接收机的架构设计, 并且阐明了里德伯 Loran-C 信号探测原理, 开展样机性能测试, 验证了该接收机可完成 Loran-C 导航定位任务.

2 接收机架构

2.1 里德伯原子探头

接收机整机主要由里德伯原子探头、激光系统、信号采集处理系统组成, 其中, 里德伯原子探头是 Loran-C 信号探测过程中最关键的组成部分. 如图 1 所示, 探头由内置平行电极板 (80 mm(长) $\times$ 26 mm(宽) $\times$ 1 mm(高), 间距为 18 mm) 的铯原子气室 (直径 40 mm, 长 100 mm)、参比电极、差分光电探测器组成. 在气室中, 852 nm 激光在入射气室前会被分束镜分成探测光和参考光束, 二者光功率均为 50 μ W, 光斑直径为 600 μ m. 探测光用于将铯原子由基态 $6S_{1/2}$ 跃迁至 $6P_{3/2}$ 激发态, 参考光束将与探测光同时被差分光电探测器接收, 以消除激光功率波动带来的影响. 与此同时, 光功率为 15 mW, 光斑直径为 1 mm 的 509 nm 耦合光与 852 nm 探测光相向传输, 将铯原子由 $6P_{3/2}$ 激发态跃迁至 $63D_{5/2}$ 里德伯态. Loran-C 信号属于中心频率为 100 kHz 的低频段无线电波, 原子气室在低频电场作用下会产生电磁屏蔽效应, 使得气室内的里德伯原子无法感应到 Loran-C 信号, 因此本研究尝试在原子气室内部放置平行电极板, 并采用特殊制造工艺将平行电极板与气室外界通过导线连通而不影响气室的密闭性. 为更好地接收空间中 Loran-C 信号, 与平行电极板相连的导线另一端用于连接参比电极. 当参比电极在水下接收到 Loran-C 信号后, 随即传输给平行电极板, 电极板形成 Loran-C 低频电场作用于里德伯原子. 并且

为了提升探测灵敏度, 一端参比电极将与直流电场通过功率合成器同时输入到电极板上.

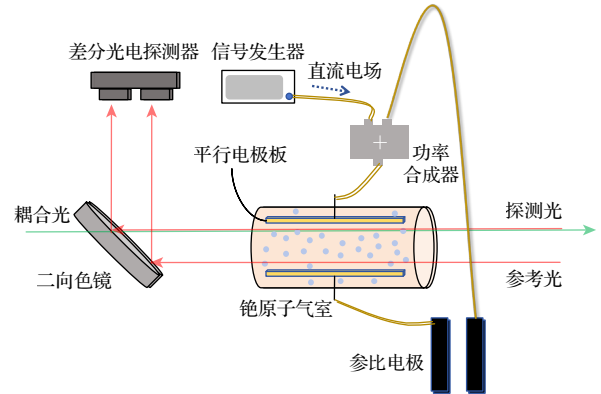


图 1 里德伯 Loran-C 接收机架构

Fig. 1. Rydberg-atom-based Loran-C receiver architecture.

2.2 信号采集处理系统

在探测光通过差分光电探测器转换为电信号后, 需要对该信号进行采集与处理, 进一步获取 Loran-C 导航定位信息. 其中信号采集部分基于 FPGA 平台实现, 使用 AD9245 模数转换芯片进行电信号采样, 并使用 AD5290 可编程数字电位器对 AD9245 转换结果进行自动增益控制. 采集数据将通过 UDP(user datagram protocol) 协议传送至 MATLAB 上位机进行信号处理与信息获取, 采集板实物图如图 2 所示. 接收机信号处理架构如图 3 所示. 在 MATLAB 处理程序中, 对目标台链信号进行捕获和处理, 在对信号进行天地波识别后可以搜寻到准确的到达时间的位置, 捕获信号后对目标信号进行持续的跟踪锁定, 锁定一个周期内 3 个台站信号, 基于时间差来解算定位, 最后将定位和授时信息显示于上位机界面.



图 2 采集板实物图

Fig. 2. Photograph of the acquisition board.

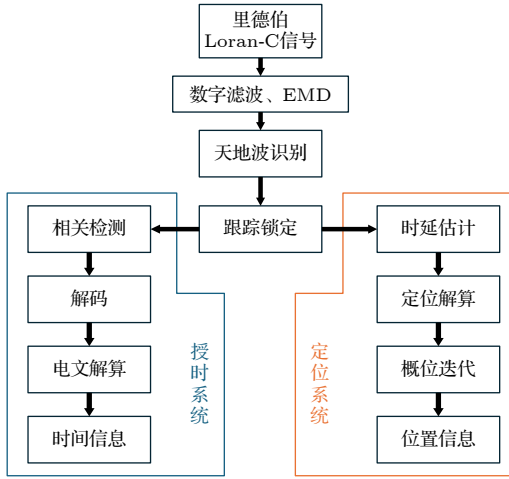


图 3 里德伯 Loran-C 信号处理架构

Fig. 3. Rydberg-atom-based Loran-C signal processing architecture.

3 里德伯 Loran-C 信号探测原理

一般碱金属最外层轨道只有一个电子, 比如铷原子 Rb 和铯原子 Cs. 经过光学激发, 可以把这个电子激发到一个高主量子数的能态, 即里德伯态, 将这些原子称为里德伯原子. 里德伯原子拥有许多特性: 轨道半径大、寿命长、极化率大、能级间隔小等. 由于里德伯原子的相邻能级间距随主量子数增加而减小, 改变主量子数可使其响应不同频率的信号; 同时由于其半径较大, 可以十分灵敏地响应外界电场. 这些特性使得里德伯原子在无线电测量领域具有巨大的利用价值. 里德伯原子通常利用 EIT 效应即电磁诱导透明效应进行电场测量. EIT 效应是一种量子相干效应, 核心是利用激光与多能级原子系统相互作用, 降低某些介质对探测光的吸收程度, 介质从不透明变为透明介质, 从而在观测时产生峰值. 图 4 中插图里德伯原子的能级跃迁图, 探测光将铯原子由 $6S_{1/2}$ 基态跃迁至 $6P_{3/2}$ 激发态, 耦合光将铯原子由 $6P_{3/2}$ 激发态跃迁至 $63D_{5/2}$ 里德伯态. 基于旋转近似和偶极近似的方法, 可以得到整个系统的哈密顿量:

$$H = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & \Omega_p & 0 \\ \Omega_p & -2\Delta_p & \Omega_c \\ 0 & \Omega_c & -2(\Delta_p + \Delta_c) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中 $\hbar$ 为普朗克常数, Δ_p 和 Δ_c 分别为探测光和耦合光的失谐量, Ω_p 和 Ω_c 分别为探测光和耦合光的拉比频率. 整个系统的演化可通过 Lindblad 主方程来描述:

$$\dot{\rho} = -\frac{i}{\hbar} [\hat{H}, \rho] + L(\rho), \quad (2)$$

其中 ρ 为原子密度矩阵, $L(\rho)$ 为自发辐射的退相位矩阵. 考虑合适的探测光和耦合光拉比频率 Ω_p 和 Ω_c , 室温原子气室 EIT 光谱响应带宽可达到 MHz 以上.

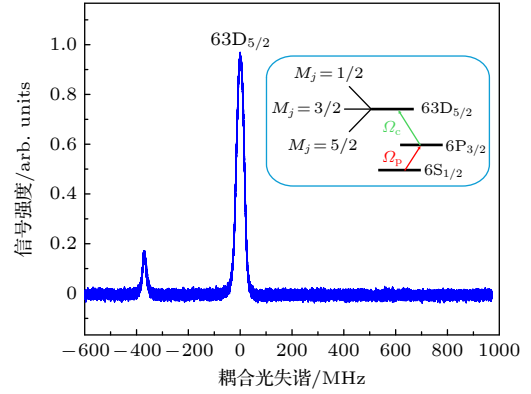


图 4 EIT 光谱图

Fig. 4. EIT spectrum.

当参比电极接收到 Loran-C 信号后, 再经由导线传输至原子气室的内置平行电极板, 在原子气室内部形成 Loran-C 低频电场与里德伯原子相互作用, 由于低频电场并不耦合里德伯能级, 如图 4 所示 EIT 光谱产生 Stark 频移效应, 光谱频移量为

$$\Delta f = -\frac{\alpha E^2}{2}, \quad (3)$$

其中 α 为原子的极化率, 是一个常数; E 为直流电场或交流电场强度有效值. 因此可通过测量光谱频移量来获取 Loran-C 低频电场信号. 为了进一步提升对低频电场的探测灵敏度, 采用直流电场与 Loran-C 信号电场合成的方法. 具体来说, 如图 1 所示, 将直流电场与 Loran-C 信号电场同时引入原子气室的内置平行电极板上, 通过功率合成器将两者叠加. 当强直流电场同时随 Loran-C 信号引入原子气室内置平行电极板时, $63D_{5/2}$ 这一里德伯态将分裂出 3 个磁子能级 $m_j = 1/2, 3/2, 5/2$, 可进一步提高对低频电场的探测灵敏度. 如图 5 所示, 将耦合光锁定在磁子能级为 $m_j = 1/2$ 处, 灵敏度最大^[21], 此时平行电极板上形成的总电场强度如下:

$$|E_{\text{tot}}| = \sqrt{E_{\text{DC}}^2 + E_{\text{SIG}}^2 + 2E_{\text{DC}}E_{\text{SIG}} \cos(\omega_{\text{SIG}}t + \varphi_{\text{SIG}})}, \quad (4)$$

其中 E_{DC} 为直流电场强度, E_{SIG} 为 Loran-C 信号电场强度, ω_{SIG} 和 φ_{SIG} 分别是 Loran-C 信号的频

率以及相位. 由于 $E_{\text{SIG}} \ll E_{\text{DC}}$, 所以总电场强度又可以约化成如下形式:

$$|E_{\text{tot}}| \approx E_{\text{DC}} + E_{\text{SIG}} \cos(\omega_{\text{SIG}}t + \varphi_{\text{SIG}}). \quad (5)$$

由 (4) 式可知, 当利用里德伯原子传感器探测低频电场时, 可以保留电场的幅度、频率以及相位信息.

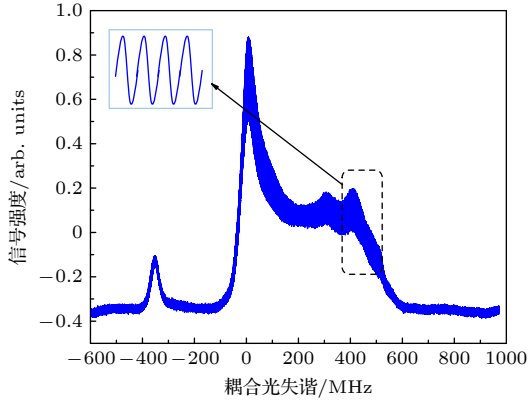


图 5 加入直流电场和 100 kHz 正弦波信号场 EIT 光谱图
Fig. 5. EIT Spectrum under the application of a DC electric field and a 100 kHz sinusoidal signal field.

4 接收测试

Loran-C 信号以脉冲组形式发送, 每个重复周期发射 8 个或 9 个脉冲信号. 副台发射 8 个脉冲, 脉冲间隔为 $1 \mu\text{s}$; 主台在副台基础上额外发射第 9 个脉冲, 与第 8 个脉冲的时间间隔为 2 ms, 主要用于主副台区分、同步和故障检测等, 不附加导航授时信息. 组重复周期 (group repetition interval, GRI) 是 Loran-C 系统发射台连续发射两组相邻脉冲信号之间的时间间隔. 同一台链的各个发射台具有相同的 GRI, 不同台链之间 GRI 不同. GRI 是 Loran-C 系统中区分不同台链的标识, 其表示形式为 $10 \mu\text{s}$ 的倍数, 范围为 4000—9999. 每两个 GRI 组成一个相位编码间隔 (phase code interval, PCI), 每个 PCI 是 $20 \mu\text{s}$ 的整数倍.

依据“Loran-C 接收机最低性能标准”和现有传统 Loran-C 接收机的性能指标, Loran-C 接收机应该在 2000 km 距离内, 信噪比不低于 -10 dB 的环境下实现定位精度达 50—360 m. 基于现有研究成果及相关信号处理算法, 构建信号处理系统以验证基于里德伯效应的 Loran-C 定位与授时技术. 通过传统电天线在外场环境中捕获高信噪比、无电离层反射干扰的 Loran-C 信号. 信号采集地点选

择要求为无强电磁干扰, 采集信号如图 6 所示; 采集地实际坐标使用手持 GPS 导航定位仪测得. 与之相对应, 在外场试验中里德伯接收机接收得到的 Loran-C 信号如图 7 所示.

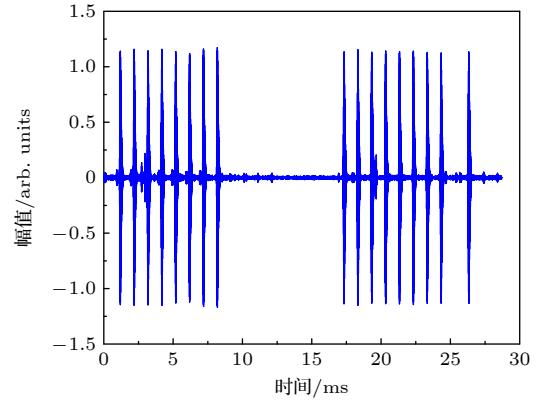


图 6 电天线接收高信噪比 Loran-C 信号
Fig. 6. Electrical antenna reception of high signal-to-noise ratio (SNR) Loran-C signals.

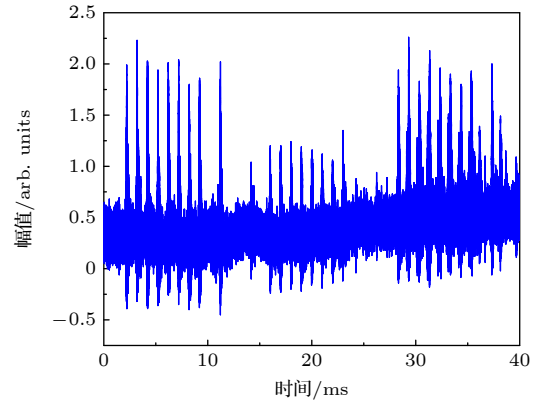


图 7 里德伯接收到的 Loran-C 信号
Fig. 7. Rydberg-received Loran-C signals.

首先从时域角度对信号进行分析. 如图 8 所示, 选取单个发射台中发射奇数周期中的第 1, 3 个脉冲和偶数周期中的第 1, 3 个脉冲. 这几个脉冲为统一初始相位, 按 (6) 式计算相互之间的相关系数 ρ :

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [x(i) - \bar{x}] \cdot [y(i) - \bar{y}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [x(i) - \bar{x}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n [y(i) - \bar{y}]^2}}. \quad (6)$$

结果如表 1 所列 (偶数周期中的第 1, 3 个脉冲表示为脉冲 5、脉冲 8, 数据结果均经过多次数据平均计算而得). 从表 1 可以看出, 脉冲 1 与脉冲 3 的

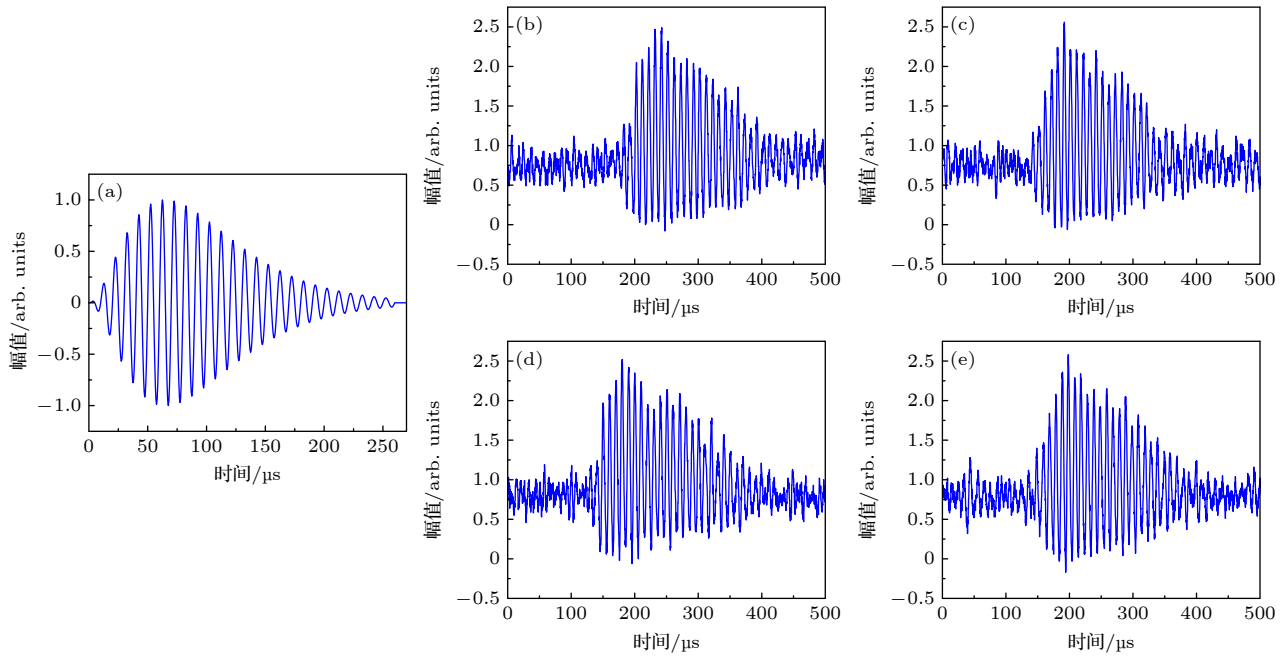


图 8 副台脉冲 (a) 标准 Loran-C 信号脉冲; (b) 奇周期第 1 脉冲; (c) 奇周期第 3 脉冲; (d) 偶周期第 1 脉冲; (e) 偶周期第 3 脉冲
Fig. 8. Secondary station pulses: (a) The standard Loran-C signal pulse; (b) the first pulse of the odd cycle; (c) the third pulse of the odd cycle; (d) the first pulse of the even cycle; (e) the third pulse of the even cycle.

相关系数 ρ_{13} 为 0.9285, 与脉冲 5 的相关系数 ρ_{15} 为 0.9098, 与脉冲 8 的相关系数 ρ_{18} 为 0.8727; 脉冲 3 与脉冲 5、脉冲 8 的相关系数 ρ_{35} 和 ρ_{38} 分别为 0.8878 和 0.8817; 脉冲 5 与脉冲 8 的相关系数 ρ_{58} 为 0.9191. 这些相关系数均接近 1, 这表明在发射台的一个 PCI 中, 每个脉冲经过里德伯接收机后相互之间依旧有着强相关关系. 这表明在短时间内, 里德伯接收机对同一信号产生固定影响, 具有良好的重复性和稳定性.

表 1 同一发射台脉冲间相关系数
Table 1. Correlation coefficient between pulses from the same transmitting station.

相关系数	脉冲1	脉冲3	脉冲5	脉冲8
脉冲1	1	0.9285	0.9098	0.8727
脉冲3	—	1	0.8878	0.8817
脉冲5	—	—	1	0.9191
脉冲8	—	—	—	1

接下来选取奇数周期主台第 1 脉冲、副台 X 第 1 脉冲以及副台 Y 第 1 脉冲计算相互之间的相关系数. 选取脉冲如图 9 所示, 相关系数如表 2 所列. 其中主台脉冲与副台 X 脉冲、副台 Y 脉冲的相关系数分别为 0.6792, 0.6166, 副台 X 脉冲与副台 Y 脉冲的相关系数为 0.6890. 从图 9 和表 2 可看出, 不同发射台脉冲由于接收时的幅值不同, 信号时

域波形畸变程度略有不同, 但相互之间仍具有一定相关性. 这说明在短时间内, 里德伯接收机对不同幅值信号产生影响略有不同, 但不改变信号特性.

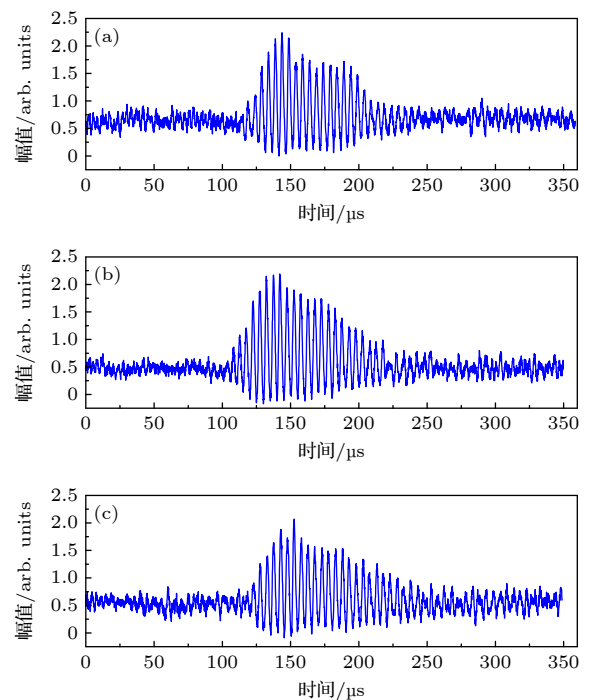


图 9 不同发射台脉冲 (a) 主台第 1 脉冲; (b) 副台 X 第 1 脉冲; (c) 副台 Y 第 1 脉冲
Fig. 9. Pulses from different transmitting stations: (a) The first pulse from the main platform; (b) the first pulse from the auxiliary platform X; (c) the first pulse from the auxiliary platform Y.

域波形畸变程度略有不同, 但相互之间仍具有一定相关性. 这说明在短时间内, 里德伯接收机对不同幅值信号产生影响略有不同, 但不改变信号特性.

表 2 不同发射台脉冲相关系数

Table 2. Correlation coefficients of pulses from different transmitting stations.

相关系数	主台脉冲	副台X脉冲	副台Y脉冲
主台脉冲	1	0.6792	0.6166
副台X脉冲	—	1	0.6890
副台Y脉冲	—	—	1

从频域对里德伯接收到的 Loran-C 进行分析, 对信号进行时频域转换, 得到信号的频谱图, 如图 10 所示. 从图 10 可以看到, 畸变后的信号频谱和标准 Loran-C 信号频谱相比增加了一部分 0—20 kHz 的低频分量, 信号主要工作频率保持在 90—110 kHz. 这说明里德伯接收机对 Loran-C 信号频率带宽无影响, 但会引入低频干扰.

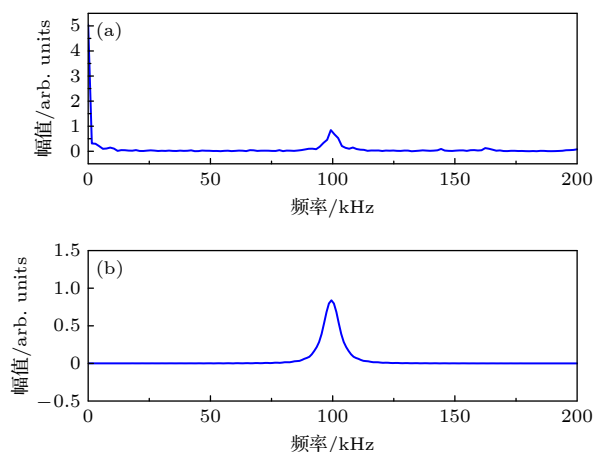


图 10 (a) 里德伯接收 Loran-C 和 (b) 标准 Loran-C 频域对比
Fig. 10. Comparison of frequency domain characteristics between (a) Rydberg-received Loran-C signals and (b) standard Loran-C signals.

外界电场和磁场的干扰会对里德伯原子的能级产生 Stark 效应和 Zeeman 效应, 从而影响信号的稳定性和准确性. 为了减少这些干扰, 在信号探测过程中, 将原子探头置于屏蔽盒中以屏蔽外界电磁干扰, 并采用差分探测技术, 通过同时测量参考光和探测光的信号, 并对两者进行差分处理, 可以有效消除激光共模干扰噪声. 在信号处理阶段, 如图 3 所示, 使用数字滤波技术可以有效去除信号中的高频噪声和低频漂移, 从而提高信号的信噪比. 在实验中, 对每个信号进行多次测量, 并通过平均处理来提高信号的稳定性. 通过优化激光系统和探测器的参数, 可以提高系统的动态范围, 从而更好地处理不同强度的信号, 以确保系统在不同信号强度下都能保持良好的性能.

采集到的信号按照信号处理流程进行处理并定位解算, 定位结果为 30 s 数据定位平均值, 得到的结果符合接收机定位精度要求, 并且成功对时间信息进行解码, 获得了时间信息, 验证了接收机实时定位及授时的可行性. 但与传统 Loran-C 接收机相对比, 针对里德伯原子接收机, 当温度变化和仪器震动时会导致探测光和耦合光频率漂移和失锁; 并且由于气室对低频无线电的屏蔽作用导致里德伯原子对其无法直接响应, 限制了测量灵敏度.

5 结 论

本研究通过将里德伯原子电场探测技术引入 Loran-C 信号接收系统, 成功实现了导航定位与授时功能. 由内置平行电极板的里德伯原子探头外接参比电极, 能够有效耦合 Loran-C 信号, 避免了传统原子气室对低频电场的屏蔽问题. 在此基础上, 通过引入直流电场与 Loran-C 信号电场合成的方法, 显著提升了对低频电场的探测灵敏度. 利用探测光和耦合光将铯原子激发至里德伯态, 实现对电场信号的高灵敏度探测, 并开发信号采集处理系统实现了天地波识别、时间差提取、定位解算和授时解码等功能.

基于里德伯原子的电磁感应透明效应和斯塔克频移效应, 能够直接获取 Loran-C 信号的幅度、频率和相位特性. 实验结果表明, 基于里德伯原子的 Loran-C 接收机在信号覆盖范围内可成功定位, 并在外场复杂水下环境中验证了实时信号解码能力. 这一成果不仅验证了里德伯量子传感技术在低频无线电波探测中的独特优势, 更揭示了其在极端环境 (如深海) 中作为卫星导航系统备份的潜力. 原子气室的小型化与集成化设计, 则有望推动便携式量子接收机的工程化应用. 未来, 随着激光系统稳定性与原子气室制造工艺的进步, 里德伯原子传感器或将成为构建“量子-经典”混合导航体系的核心组件, 将为全球关键基础设施提供更自主、更稳健的导航定位与授时保障.

参考文献

- [1] Johnson G W, Swaszek P F, Hartnett R J, Shalaev R, Wiggins M 2007 *IEEE Conference on Technologies for Homeland Security* Woburn, MA, USA, May 16–17, 2007 p95
- [2] Johnson G, Shalaev R, Hartnett R, Swaszek P, Narins N 2005 *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.* **20** 3

- [3] Johnson G W, Dykstra K, Oates C, Swaszek P F, Hartnett R I 2007 *2007 National Technical Meeting of the Institute-of-Navigation* San Diego, CA, USA, January 22–24, 2007 p1201
- [4] Narkus-Kramer M, Scales W, Calle E 2009 *IEEE/AIAA 28th Digital Avionics Systems Conference* Orlando, FL, USA, October 23–29, 2009 p1008
- [5] Sedlacek J A, Schwettmann A, Kübler H, Löw R, Pfau T, Shaffer J P 2012 *Nat. Phys.* **8** 819
- [6] Sedlacek J A, Schwettmann A, Kübler H, Shaffer J P 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 063001
- [7] Fan H Q, Kumar S, Sedlacek J, Kübler H, Karimkashi S, Shaffer J P 2015 *J. Phys. B-At. Mol. Opt. Phys.* **48** 202001
- [8] Jiao Y C, Hao L P, Han X X, Bai S Y, Raithel G, Zhao J M, Jia S T 2017 *Phys. Rev. Appl.* **8** 014028
- [9] Cloutman M, Chilcott M, Elliott A, Otto J S, Deb A B, Kjaergaard N 2024 *Phys. Rev. Appl.* **24** 044025
- [10] Gordon J A, Simons M T, Haddab A H, Holloway C L 2019 *AIP Adv.* **9** 045030
- [11] Holloway C L, Simons M T, Gordon J A, Novotny D 2019 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **18** 1853
- [12] Simons M T, Haddab A H, Gordon J A, Holloway C L 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 114101
- [13] Simons M T, Haddab A H, Gordon J A, Novotny D, Holloway C L 2019 *IEEE Access* **7** 164975
- [14] Robinson A K, Prajapati N, Senic D, Simons M T, Holloway C L 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 114001
- [15] Prajapati N, Artusio-Glimpse A, Simons M, Berweger S, Rotunno A, Jayaseelan M, Campbell K, Holloway C 2023 *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)* Greece, June 4–10, 2023 p1
- [16] Mao R Q, Lin Y, Fu Y Q, Ma Y M, Yang K 2024 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **72** 2025
- [17] Wu B, Zhou Y L, Ding Z K, Mao R Q, Qian S X, Wan Z Q, Liu Y, An Q, Lin Y, Fu Y Q 2024 *EPJ Quantum Technol.* **11** 30
- [18] Grimm J, Mack M, Karlewski F, Jessen F, Reinschmidt M, Sándor N, Fortágh J 2015 *New J. Phys.* **17** 053005
- [19] Li L, Jiao Y C, Hu J L, Li H Q, Shi M, Zhao J M, Jia S T 2023 *Opt. Express* **31** 29228
- [20] Lei M W, Shi M 2024 *Opt. Lett.* **49** 5547
- [21] Xie Y P, Lei M W, Zhang J Q, Dong W B, Shi M 2025 *Electronics* **14** 1041

Reception of Loran-C signals based on Rydberg atoms^{*}

XIE Yipeng¹⁾²⁾ LEI Mingwei¹⁾ SHI Meng^{1)†}

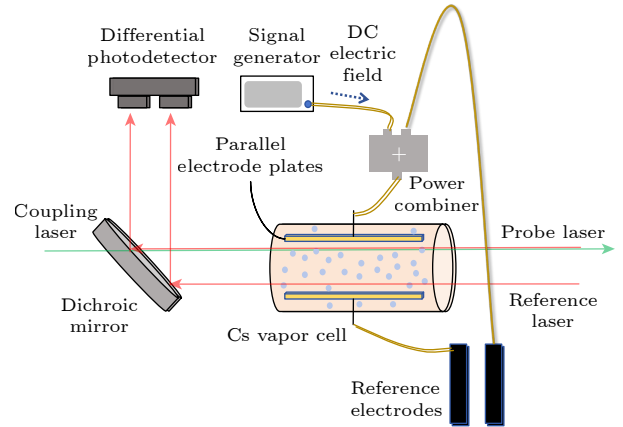
1) (*Laboratory for Quantum Precision Measurement, Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*)

2) (*Department of Aeronautics and Astronautics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China*)

(Received 9 July 2025; revised manuscript received 20 October 2025)

Abstract

This work presents a Rydberg-atom-based Loran-C receiver designed to overcome long-standing limitations of traditional systems, including low sensitivity and large size. In the proposed design, a reference electrode couples the low-frequency Loran-C signal into an atomic vapor cell equipped with integrated parallel plates; an auxiliary DC bias field is applied to optimize this coupling. By utilizing electromagnetically induced transparency (EIT) and Stark effect, the receiver can directly, sensitively measure the amplitude and phase of the electric field. An FPGA-based acquisition stage and an MATLAB signal-processing pipeline are implemented to perform ground-wave/sky-wave discrimination, time-difference-of-arrival (TDOA) estimation, position fixing, and timing recovery. Experimental results confirm that the Rydberg-atom-based receiver successfully provides both positioning and timing capabilities. These findings demonstrate that Rydberg-atom sensors can significantly enhance the sensitivity and dynamic range of Loran-C systems at low frequencies, thereby establishing a quantum-sensing pathway toward the next-generation, high-reliability navigation and timing architectures.



Keywords: Rydberg atoms, stark effect, electromagnetically induced transparency, Loran-C signals

DOI: [10.7498/aps.75.20250900](https://doi.org/10.7498/aps.75.20250900)

CSTR: [32037.14.aps.75.20250900](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20250900)

^{*} Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2024YFB3909500) and the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U2341211).

[†] Corresponding author. E-mail: shimeng@csu.ac.cn

基于里德伯原子的Loran-C信号接收

谢奕鹏 雷名威 石猛

Reception of Loran-C signals based on Rydberg atoms

XIE Yipeng LEI Mingwei SHI Meng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 030602 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20250900

CSTR: 32037.14.aps.75.20250900

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20250900>

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>

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>

交/直流电场对里德伯原子Stark效应的调控作用及工频强场测量

Regulation of Stark effect in Rydberg atoms by AC and DC electric fields and measurement of power-frequency strong fields

物理学报. 2025, 74(24): 243201 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250677>

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>

基于里德伯原子电磁诱导透明效应的光脉冲减速

Deceleration of optical pulses based on electromagnetically induced transparency of Rydberg atoms

物理学报. 2021, 70(10): 103201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210102>