量子光学学报 31(4):040204, 2025
Journal of Quantum Optics

DOI:10.3788/JQO20253104.0204

基于里德堡原子的模拟鱼类放电特征信号测量

詹德芳[1,2]， 苏楠[1]， 刘瑶[1]， 何军[1,3†]， 赵晨含[1,2]， 刘智慧[1]， 王军民[1,3]

（1. 光量子技术与器件全国重点实验室，山西大学光电研究所，山西 太原 030006；
2. 山西大学物理电子工程学院，山西 太原 030006；
3. 山西大学极端光学协同创新中心，山西 太原 030006）

摘要：本文中描述利用里德堡原子构建光学原子天线并开展鱼类放电特征信号的模拟测量。实验中采用级联双光子激发方案制备铯（^{133}Cs）里德堡原子，利用反向共线光路获得消多普勒效应的电磁感应透明（electromagnetically induced transparency，EIT）光谱。电场中的里德堡原子有较强的Stark频移效应，原子能级频移通过单光子频率失谐引起EIT幅度变化。我们优化了原子天线工作于电场强度响应的近线性区域，利用EIT光谱技术测量时间相关的脉冲电场信号，测量并表征了多种鱼类放电特征信号。

关键词：里德堡原子；电磁感应透明光谱；放电鱼类；生物电场波形

中图分类号：O431.2　　**文献标识码**：A

1 引言

里德堡原子具有较大的跃迁电偶极矩和较高的极化率[1–2]，基于光学方法可调控原子内态获得电磁场敏感量子态，进一步结合高精度的光谱测量技术可以构建用于宽频段电磁场测量的光学原子天线[3–4]。电磁感应透明效应（electromagnetically induced transparency，EIT）通过强耦合光场调控介质的色散特性实现探测光的吸收减弱，基于EIT效应可以在室温原子气室获得窄线宽光谱[5–6]。电场中的里德堡原子存在Stark效应，其引入的原子能级频移会导致EIT幅度变化，EIT光谱可以工作于电场强度相关的近线性区域[7–9]，基于此效应可以构建原子天线开展非共振电磁场的光学测量。

基于原子天线的电场测量技术近年来发展迅速。2007年，Adams等[10]在室温原子气室中实现窄线宽的里德堡原子EIT光谱。2012年，Shaffer[11]等利用EIT光谱测量微波电场，实验获得的最小可测电场强度为8 μV/cm；2019年，Holloway等[12]通过外差探测技术开展微波电场测量，实验获得的电场强度为0.46 μV/cm；2020年，山西大学景明勇等[13]基于超外差技术开展微波电场测量，实验获得的最小可测量电场强度为0.78 nV/cm。2022年，中国科学技术大学史保森、丁冬生等[14]利用强关联系统相变提高微波电场测量灵敏度，实验获得的电场测量灵敏度为49 nV/cm/Hz$^{1/2}$。2024年，华南师范大学朱诗亮、颜辉等人利用冷原子降低原子天线等效噪声温度[15]，实验获得的电场测灵敏度为10 nV/cm/Hz$^{1/2}$。

上述工作主要基于里德堡原子的共振跃迁实现微波频段的电磁场测量。里德堡原子有较高的极化率，结合EIT光谱技术同样可以实现非共振电磁场参数测量[6–10]，该方法将电磁场的场强测量转换到光谱频率测量上，高分辨光谱有利于提高电磁场测量灵敏度和量值溯源。2012年，Carter等[16]采用冷原子技术，对材料表面的电场强度进行量化分析，最终获得

收稿日期：2025-04-17；**接受日期**：2025-07-09

作者简介：詹德芳（2003–），女，湖南省桃江人，在读本科生，主要研究方向为量子光学、电信技术。

†通信作者：何军，E-mail: hejun@sxu.edu.cn

0.6 V/cm的典型测量值。2014年，Hankin等[17]利用冷原子体系进行直流电场测量实验，成功获取1.5 V/cm的典型场强数据，该实验利用激光控制掺锡氧化铟（ITO）薄膜产生可控电场，这对于复杂环境电场的光学调控有较大价值。2020年，Jau等[18]通过增大材料面电阻来削弱常规原子气室在低频电场下的屏蔽现象，该实验利用蓝宝石材料制造了热原子气室，通过原子气室内部光学控制优化内部电场，在分析频率kHz条件下，该实验实现的极限灵敏度达到0.34 mV /cm/Hz$^{1/2}$。2020年，Ma[19]等通过光学调控来调谐调整原子气室内部的电荷分布来改变气室的电学性能，实验测得典型电场值为0.8V/cm。在电场测量技术的持续探索中，通过将内置电极与波导技术相融合，为宽频段低频电场的精确探测提供了新方向。2020年，Meyer等[20]借助微带波导与里德堡原子的耦合机制，实现DC～20 GHz频段的电场测量。同年，Bai等[21]基于冷原子系统开展低频电场测量实验，实验测量的典型电场强度为4.9 mV/cm。2022年，杜艺杰等[22]利用里德堡原子天线实现了MHz～GHz频段的电场测量。2023年，Li等[23]在原子气室内部布置平行电极结构，频率为100 Hz时的典型场强为214.8 μV/cm，展现出良好的测量性能。

目前，里德堡原子天线在实验上已经演示了DC—THz频段的电场强度测量[24]及多频段的电磁场模拟通信和数字通信等[25-26]。自然界中，很多生物可以产生电磁场并实现高灵敏电磁场感知。例如，放电鱼类通过自身电器官发出电场来感知周围环境或者与同伴交流，通过调整放电模式来表达威胁、友好或求偶等行为。鱼类电场信号通常是特定波形的脉冲电场，这有利于其通过波形或强度感知能力来获得性别、年龄等信息。不同种类的电鱼具有独特的放电波形，这些波形中蕴含了丰富的生物信息，高精度的波形参数测量可以作为鱼类身份识别以及物种分类的重要依据。

本文利用里德堡原子构建原子天线，利用光学原子天线开展放电鱼类特征信号的模拟测量。实验采取级联双光子激发方案制备铯（^{133}Cs）里德堡原子，利用EIT光谱测量不规则电场信号。实验设计六种放电鱼类的电信号波形，波形时间跨度从毫秒到上百秒。我们优化原子天线工作于电场强度近线性响应区域，优化光谱动力学参数获得微秒尺度的响应时间，满足毫秒精度的鱼类放电时间测量。

2 实验方案

实验选择$6S_{1/2}\rightarrow 6P_{3/2}\rightarrow 65S_{1/2}$的双光子跃迁原子能级结构，如图1所示。852 nm探测光将铯原子从基态激发到中间态，509 nm耦合光将中间态原子激发到里德堡态。852 nm弱探测光和509 nm强耦合光在室温原子气室中共线反向传输形成消多普勒效应的EIT结构，输出852 nm探测光输入光电探测器进行光电信号转换。扫描耦合光激光频率探测852 nm激光强度，当探测光、耦合光与原子跃迁能级共振时，原子对探测光的吸收减弱，即EIT透射光谱。

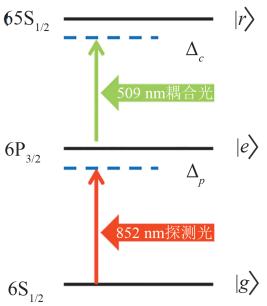


Fig. 1. Schematic diagram of the energy level transition of Rydberg atoms

图1. 里德堡原子能级跃迁示意图

考虑三能级原子与光相互作用，哈密顿量的矩阵表达式为：

$$\hat{\boldsymbol{H}}_s=\frac{\hbar}{2}\begin{pmatrix}2\omega_1 & \Omega_p e^{i\omega_p t} & 0\\ \Omega_p e^{-i\omega_c t} & 2\omega_2 & \Omega_c e^{i\omega_c t}\\ 0 & \Omega_c e^{-i\omega_c t} & 2\omega_3\end{pmatrix}。\tag{1}$$

表象变换后的哈密顿量形式如下：

$$\boldsymbol{H}=\frac{\hbar}{2}\begin{pmatrix}0 & \Omega_p & 0\\ \Omega_p & -2\Delta_p & \Omega_c\\ 0 & \Omega_c & -2\left(\Delta_p+\Delta_c\right)\end{pmatrix},\tag{2}$$

其中$\hbar$为普朗克常数，$\Delta_p=\omega_1+\omega_p-\omega_2$为探测光相对$|g\rangle$、$|e\rangle$能级跃迁的频率失谐。$\Delta_c=\omega_2+\omega_c-\omega_3$为耦合光相对能级$|e\rangle$、$|r\rangle$跃迁的频率失谐量。$\Omega_p$为探测光拉比频率，$\Omega_c$为耦合光拉比频率。

考虑原子自发辐射以及环境导致的退相干，引入退相干矩阵如下：

$$\boldsymbol{L}(\rho)=\begin{pmatrix}\gamma_2\rho_{22} & -\frac{\gamma_2}{2}\rho_{12} & -\frac{\gamma_3}{2}\rho_{13}\\ -\frac{\gamma_2}{2}\rho_{21} & \gamma_3\rho_{33}-\gamma_2\rho_{22} & -\frac{\gamma_2+\gamma_3}{2}\rho_{23}\\ -\frac{\gamma_3}{2}\rho_{31} & -\frac{\gamma_2+\gamma_3}{2}\rho_{32} & -\lambda_3\rho_{33}\end{pmatrix}。\quad(3)$$

原子密度矩阵为：

$$\boldsymbol{\rho}=\begin{pmatrix}\rho_{11} & \rho_{12} & \rho_{13}\\ \rho_{21} & \rho_{22} & \rho_{23}\\ \rho_{31} & \rho_{32} & \rho_{33}\end{pmatrix},\quad(4)$$

其中γ_1、γ_2、γ_3分别为基态、激发态、里德堡态的自发辐射率。通过Liouville方程描述光与原子相互作用的动力学过程：

$$\dot{\rho}=\frac{\mathrm{i}}{\hbar}\left[\hat{H},\hat{\rho}\right]+L(\rho),\quad(5)$$

其中$\left[\hat{H},\hat{\rho}\right]=\hat{H}\rho-\rho\hat{H}$为泊松括号。将相互作用表象下的总哈密顿量和退相干矩阵代入上式，相应的光学布洛赫方程为：

$$\begin{cases}\dot{\rho}_{11}=\frac{\mathrm{i}}{2}\Omega_p(\rho_{12}-\rho_{21})+\gamma_2\rho_{22},\\ \dot{\rho}_{22}=\frac{\mathrm{i}}{2}\Omega_p(\rho_{21}-\rho_{12})+\frac{\mathrm{i}}{2}\Omega_c(\rho_{23}-\rho_{32})-\gamma_2\rho_{22}+\gamma_3\rho_{33},\\ \dot{\rho}_{33}=\frac{\mathrm{i}}{2}\Omega_c(\rho_{32}-\rho_{23})-\gamma_3\rho_{33},\\ \dot{\rho}_{12}=\frac{\mathrm{i}}{2}\Omega_c\rho_{13}-\frac{\mathrm{i}}{2}\Omega_p(\rho_{22}-\rho_{11})-\mathrm{i}\Delta_p\rho_{12}-\frac{1}{2}\gamma_2\rho_{12},\\ \dot{\rho}_{13}=-\frac{\mathrm{i}}{2}\Omega_p\rho_{23}+\frac{\mathrm{i}}{2}\Omega_p\rho_{12}-\mathrm{i}(\Delta_p+\Delta_c)\rho_{13}-\frac{1}{2}\gamma_3\rho_{13},\\ \dot{\rho}_{23}=-\frac{\mathrm{i}}{2}\Omega_p\rho_{13}+\frac{\mathrm{i}}{2}\Omega_c(\rho_{22}-\rho_{33})-\mathrm{i}\Delta_c\rho_{23}-\frac{1}{2}(\gamma_2+\gamma_3)\rho_{23},\\ \rho_{21}=\rho_{12}^{*},\\ \rho_{31}=\rho_{13}^{*},\\ \rho_{32}=\rho_{23}^{*}。\end{cases}\quad(6)$$

精确求解较为复杂，此处给出近似解析解[27]：

$$\rho_{21}=-\frac{2\Delta_c\Omega_p(\Omega_c^2+2\mathrm{i}\gamma_2\Delta_c)}{4\Delta_c^2(\gamma^2{}_2+2\Omega_p^2)+(\Omega_p^2+\Omega_c^2)}。\quad(7)$$

探测光的吸收依赖EIT耦合光的频率失谐，外电场中里德堡原子能级通过Stark效应使耦合光失谐。

$$\Delta_c=\frac{1}{2}\alpha E^2。\quad(8)$$

α为原子极化率，由理论分析得到极化率χ表达式，其虚部代表光的吸收或透射，可表示为：

$$\mathrm{Im}\,\chi=\frac{4N_0\wp_{12}^2}{\varepsilon_0\hbar}\times\frac{\Delta_c\Omega_c^2}{4\Delta_c^2(\gamma_2^2+2\Omega_p^2)+(\Omega_p^2+\Omega_c^2)^2}。\quad(9)$$

$\wp_{12}$代表里德堡原子基态能级与激发态能级之间的跃迁矩阵元，当失谐量大于零时，失谐量与极化率χ的虚部成正比。

EIT信号幅度用透射率T来表示：

$$T=\mathrm{e}^{(-\mathrm{Im}\chi\cdot k\cdot l)},\quad(10)$$

式中k为光波矢，l为气室长度。由于极化率χ虚部与EIT的幅度成反比，在弱场条件下，电场强度增大，Stark频移增大，其引入的单光子失谐导致EIT幅度减小[28–29]，基于此原理可以进行电场波形测量。

3　实验装置

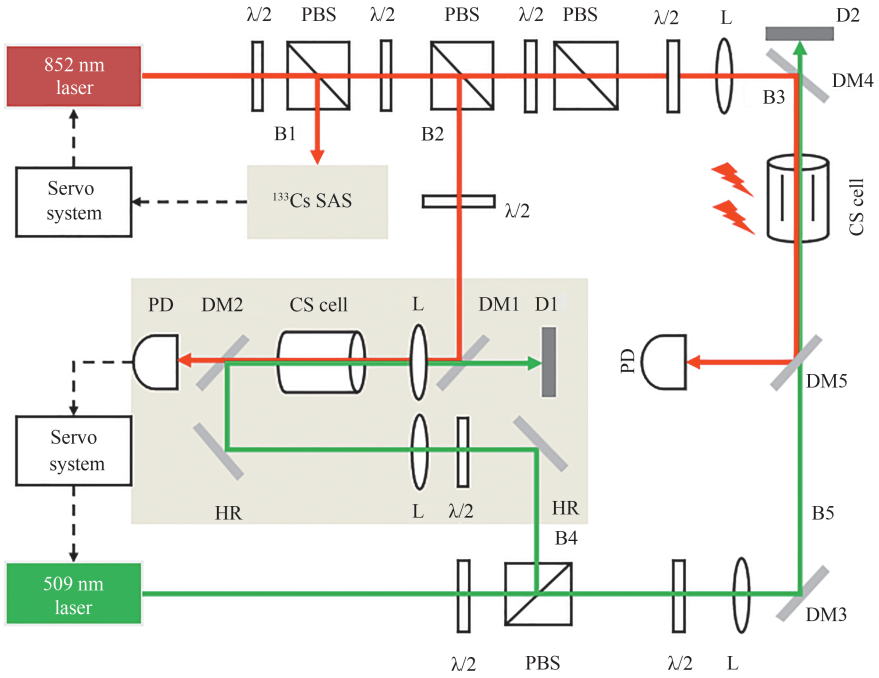
实验装置如图2所示。两台半导体激光器作为852 nm光源和509 nm光源，852 nm激光利用饱和吸收谱稳频，509 nm激光利用参考EIT光谱稳频。852 nm激光器输出激光经过半波片和偏振分光棱镜分为B1、B2、B3光束。B1搭建饱和吸收光谱（SAS，Saturated aborption spectroscopy）用于852 nm激光稳频；B2与509 nm激光器输出的B4光束反向共线传输，构建参考EIT用于509 nm激光稳频；B3与509 nm激光器输出光束在铯原子气室中反向共线传输实现EIT光谱，用于放电鱼类波形测量。

测量气室为内置电极原子气室，内部界面利用石蜡镀膜、ITO阵列镀膜；内置铜、钼电极材料通过陶瓷和真空胶固定。模拟测量过程，首先通过调研给出不同鱼类特征电信号，利用信号源生成模拟电信号，模拟波形通过电极输入原子气室。

4　实验结果与分析

鱼类放电通常为特定波形的脉冲信号，电信号波形和幅度随时间快速变化，这需要原子天线响应时间足够快以捕捉信号变化。我们将509 nm耦合光的频率锁定在参考EIT的$6P_{3/2}-65S_{1/2}$共振跃迁线，获得稳定的EIT信号，相应的测量原子气室获得EIT信号，如图3所示。图3（a）为实验测量EIT信号，图3（b）为EIT鉴频信号，用来锁定509 nm激光器，图3（c）为EIT线性工作区域中EIT峰值与电场关系图。优化EIT线性工作区域可以获得高精度的电场波形的测量，进一步增加耦合光和探测光功率，提高EIT信号拉比频率，高拉比频率有助于获得快速的动力学测量。

我们首先测量原子天线的响应时间或动力学带宽。里德堡原子布居数依赖耦合光和探测光功



λ/2: half-wave plate; PBS: polarization beam splitter; L: lens;
DM1, DM4: dichroic mirrors (with high reflectivity at 852 nm and high transmittance at 509 nm);
DM2, DM3: dichroic mirrors (with high transmittance at 852 nm and high reflectivity at 509 nm)

Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup

图2. 实验装置图

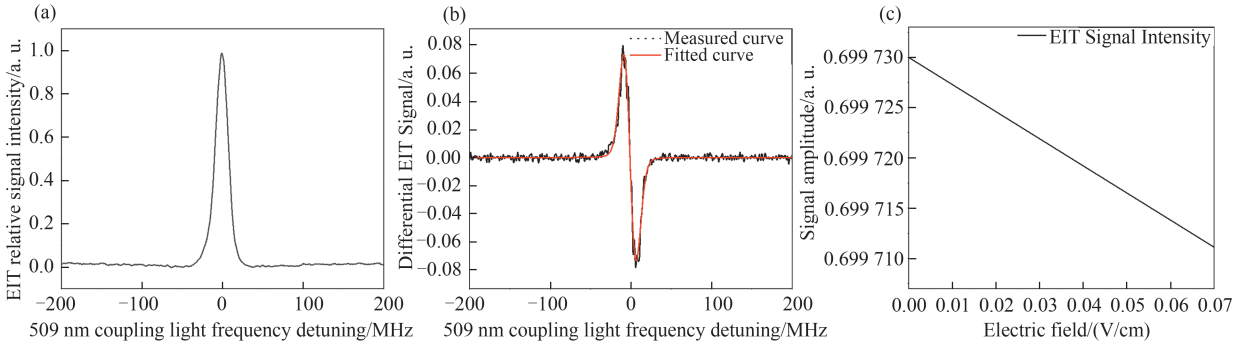


Fig. 3. (a) Experimentally measured EIT signal; (b) EIT Frequency-discriminated signals; (c) The relationship between EIT peak and electric field

图3.（a）实验测量EIT信号；(b)EIT鉴频信号；(c)EIT峰值与电场关系图

率，EIT条件下，探测光不显著改变系统动力学过程。里德堡原子的布居时间或EIT光谱响应时间主要依赖强耦合光。当耦合光开启和关闭时，由于EIT效应，探测光的透射率会提高或降低。耦合光拉比频率正比于光强，即$\Omega_c \propto \sqrt{I}$。响应时间反比于耦合光拉比频率，即$\tau \approx 1/\Omega_c$。故增大光强可以增大系统响应带宽。我们利用ns脉冲的509 nm激光激发里德堡原子，实验测量的典型EIT响应时间为百ns左右。

由于技术原因我们的脉冲光驱动方案通常工作在0.1 ns～1 μs（MHz～10 GHz），对于ms级甚至更长时间尺度的非规律脉冲波形测量，我们采用连续光激发、EIT强度锁定的测量方案。外电场中的里德堡原子会通过Stark效应引入原子频移，这种单光子失谐会通过耦合光相对失谐进而导致EIT幅度变化，通过EIT幅度变化可以反演得到输入电场的波形和幅度。实验中利用信号发生器产生上升沿小于5ns的脉冲电压信号作为参考信号和触发信号。脉冲电场

与里德堡原子的耦合导致探测光透射率随时间变化，基于此可以测量系统的响应时间。参考文献[30]，系统响应时间可以定义为初始值1/e的时间。EIT的响应时间依赖耦合光和探测光功率，实验优化后的509 nm耦合光功率为190 mW，852 nm探测光功率为60 μW，对应的拉比频率分别为1 MHz和18 MHz。如图4所示，“黑色实线”为参考信号，“红色点线”为实验测量信号，“灰色划线”为拟合信号。指数拟合给出的上升响应时间为2.5 μs，下降响应时间为1.9 μs。考虑放电鱼类的特征信号在毫秒时间尺度，微秒尺度的系统响应时间分辨率满足电鱼的波形测量。

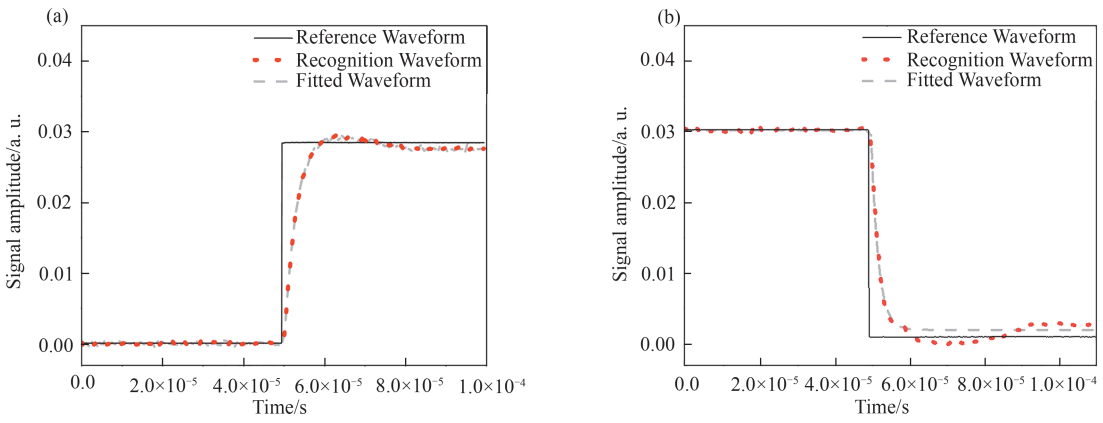


Fig. 4. Dynamic characteristics of atomic antenna

(a) Rise time; (b) Fall time; The black solid line represents to a reference electric pulse, the red dotted line represents to a reference electric pulse, and the gray dash-dotted lines represent the fitted curve. The typical turn-on time of the atomic antenna is 2.5 μs, and the turn-off time is 1.9 μs.

图4. 原子天线响应时间测量

（a）上升时间；（b）下降时间。其中，黑色实线为参考电脉冲，红色点线为测量曲线，灰色点划线为拟合曲线。典型的原子天线开启时间为2.5 μs，关断时间1.9 μs。

图5中给出了6种放电鱼类的特征电场波形[31-32]，根据放电强度可以分为强电鱼、弱电鱼。最近发现的生活在亚马逊河中的电鳗是典型的强电鱼[33]，其体型可以长到2.4 m，产生高达kV的电压，具有很强的攻击性，如图5（a）所示。弱电鱼释放的电压在百mV量级，如象鼻鱼和魔鬼刀鱼。这类鱼的感官器官产生弱电主要用来感知周围环境或沟通和互动。弱电鱼可以进一步分为脉冲型弱电鱼和连续波型弱电鱼，如图5（b）（c）（d）所示为脉冲型弱电鱼，其发射的探测信号是单个脉冲的形式，信号频率低于50 Hz[34]；图5（d）（e）所示为连续波型弱电鱼，这类鱼连续发射不规则信号，信号频率覆盖300 Hz至10 kHz，电压幅值小于1 V。实验中可以通过波形差异来判断是哪种鱼类。

我们基于原子天线实验模拟测量六种放电鱼类的波形信号。电鱼释放电压大小覆盖6个数量级左右，我们通过调控里德堡原子的主量子数来优化原子极化率，确保原子天线工作在线性区域。实验过程中为了简化系统，我们确定里德堡原子主量子数，通过可调衰减器使原子天线工作在近线性区域，实际测量参数可以通过衰减因子校准。测量结果如图6所示，黑色谱线为放电信号，红色谱线为原子天线识别出的光谱信号。

时间上的相关系数用于衡量放电波形与识别波形时间序列数据间的关联程度。为衡量放电鱼类放电波形和识别波形的相似性，首先我们分别以脉冲型放电鱼类短蟾蜥和连续型放电鱼类魔鬼刀鱼为例，利用Origin中pearson相关系数[35]画出时间上的相关系数变化图，如图7（a）（b）所示，其中横轴为时间序列，纵轴为归一化相关系数。图7（a）中短蟾蜥放电波形和识别波形之间呈现良好的线性关系，说明实验能够实现对脉冲型放电鱼类信号的精准捕捉。图7（b）中，魔鬼刀鱼放电波形和识别波形之间整体呈现良好的线性关系，但存在瞬时尖刺状波动，可能由于连续性放电信号对噪声更敏感。总体来说，脉冲型放电鱼类和连续型放电鱼类都能较好识别到波形。最后我们展示了六种放电鱼类放电波形与识别波形的总体相

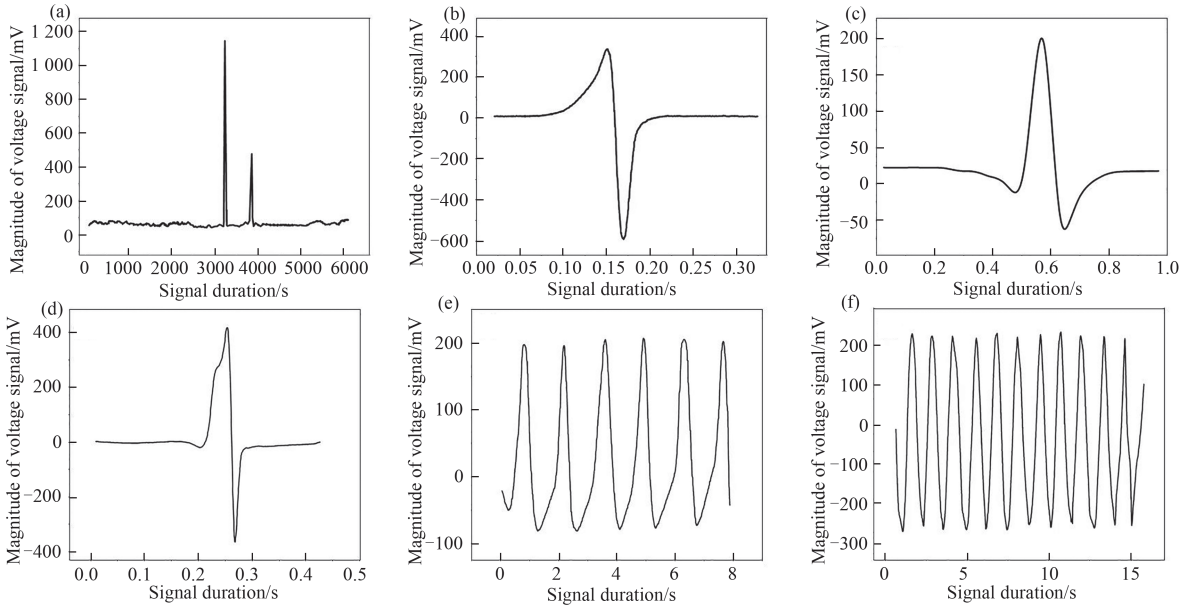


Fig. 5. Schematic waveforms of electric fish discharges

(a) Electric eel; (b) Brachyhypopomus; (c) Gymnotus; (d) Elephantnose fish; (e) Apteronotidae; (f) Black ghost knifefish. The horizontal axis represents signal duration time, and the vertical axis represents the electric signal intensity of fish.

图5. 放电鱼类波形示意图

(a)电鳗;(b)短蝠蜥;(c)裸背鳗;(d)象鼻鱼;(e)裸臀鱼科;(f)魔鬼刀鱼。横坐标为信号持续时间,纵坐标为鱼类放电信号强度。

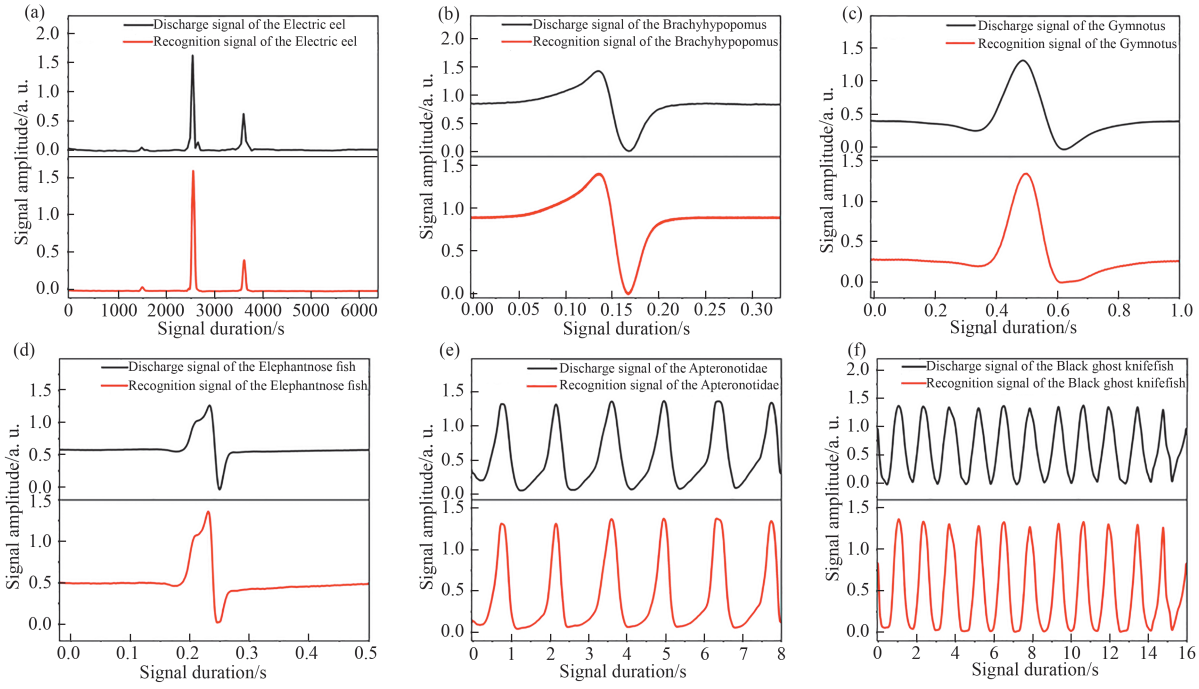


Fig. 6. Comparison chart of the discharging and recognition signals of electric fish

(a) Electric eel; (b) Brachyhypopomus; (c) Gymnotus; (d) Elephantnose fish; (e) Apteronotidae; (f) Black ghost knifefish. The horizontal axis represents the signal duration, and the vertical axis represents the intensity of the fish's discharging signal.

图6. 放电鱼类放电与识别信号对比图

(a)电鳗;(b)短蝠蜥;(c)裸背鳗;(d)象鼻鱼;(e)裸臀鱼科;(f)魔鬼刀鱼。横坐标为信号持续时间,纵坐标为鱼类放电信号强度。

关性分布，如图7(c)所示，1代表电鳗，2代表短蝾螈，3代表裸背鳗，4代表象鼻鱼，5代表裸臀鱼科，6代表魔鬼刀鱼。六种放电鱼类的相关性分别为0.903、0.996、0.984、0.984、0.987、0.985，都接近于1，其中红色区域为95%置信区间，所有点都落到置信区间内，放电波形和识别波形高度相关。

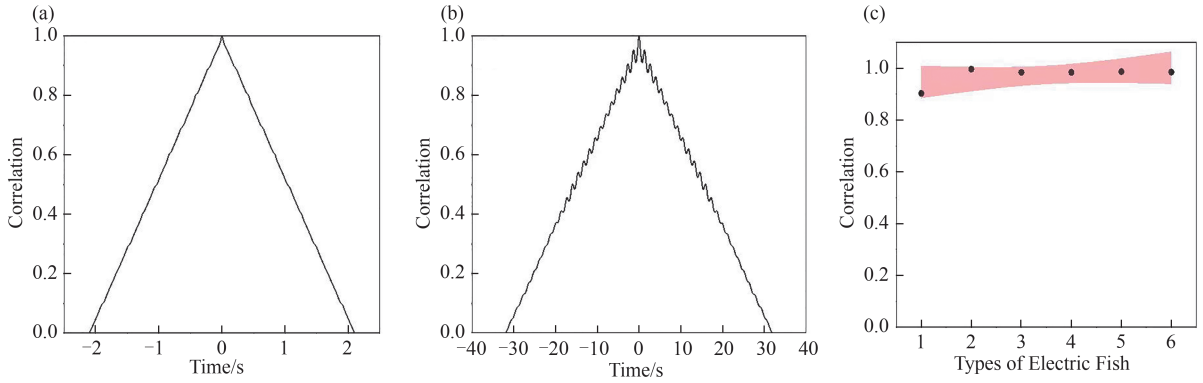


Fig. 7. (a) Dynamic correlation diagram between Brachyhypopomus discharge and recognition waveform; (b) Dynamic correlation diagram between Black ghost knifefish discharge and recognition waveform; (c) Correlation distribution of six discharge fish species

图7.（a）短蝾螈放电与识别波形的动态相关性图；(b)魔鬼刀鱼放电与识别波形的动态相关性图；(c)六种放电鱼类总体相关性分布图

目前的相关性还有差距，高精度测量和高带宽测量需要探测器特定参数进行优化，后续工作中我们进一步研制高性能共模探测器抑制噪声，通过降低噪声水平、提升信噪比来提高测量精度，在1 Hz～100 kHz范围实现量子散粒噪声极限测量。

5　总结与展望

本文中，我们基于里德堡原子构建光学原子天线，设计实验开展多种鱼类特征电磁场信号的模拟测量，下一步设计外场环境实验方案，验证活体鱼类的生物电磁场信息测量。基于光学方法开展更多维度的电磁场参数测量和表征，有助于放电鱼类的生物信息识别。

目前生物科学领域关注放电鱼类的感知机理研究，这包括物体存在时的电子图像的实验测量和数字仿真研究，以及放电鱼类器官结构、生活习性、行为功能等研究。基于光学方法的电磁场测量对于研究鱼类放电器官、电感觉器官和神经信号处理等具有重要的意义，也为生物间的电磁交流、生物仿生提供技术手段，该技术也可以应用于复杂水下海洋环境海底生物探测。进一步发展光学原子天线，有助于实现极其微弱神经电信号的测量。这些研究包括心脏电活动产生的微弱电场测量研究，血流微弱生物电信号测量以及血流动力学研究，大脑电活动精确空间测量和时间动力学测量研究等，这为生物医学研究、临床诊断及健康监测提供了技术方案。

参考文献

[1] GALLACHER T F. Rydberg atoms[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994:41. DOI: 10.1017/cbo9780511524530.

[2] FABRE C, HAROCHE S. Observation of giant polarizabilities in atomic sodium Rydberg states[J]. *Optics Communications*, 1975, **15**(2):254–257. DOI: 10.1016/0030-4018(75)90297-7.

[3] 鲍善霞. 磁场调控的里德堡原子电磁诱导透明光谱[D]. 太原: 山西大学博士论文. 2017:75–85.
[BAO S X. The spectroscopy of Rydberg electromagnetically induced transparency in external magnetic field[D]. Taiyuan: Shanxi University, (Ph. D Thesis), 2017:75–85. (in Chinese).]

[4] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2024.05.001.
[DU Y J, LÜ 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. (in Chinese). DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2024.05.001.]

[5] MARANGOS J P. Electromagnetically induced transparency[J]. *Journal of Modem Optics*, 1998, **45**(3):471–503. DOI: 10.1080/09500349808231909.

[6] HAO L P, XUE Y M, FAN J B, *et al*. Precise measurement of a weak radio frequency electric field using a resonant atomic probe[J]. *Chinese Physics B*, 2020, **29**(3):033201. DOI: 10.1088/1674-1056/ab6c49.

[7] ZHANG S S, GAO W, CHENG H, *et al*. Symmetry-breaking assisted Landau-Zener transitions in Rydberg atoms[J]. *Physical Review Letters*, 2018, **120**(6):063203. DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.063203.

[8] 李伟. 基于里德堡原子 AC-Stark 效应的工频电场测量[D]. 太原:山西大学硕士论文. 2021:16–18. DOI: 10.3788/LOP202158. 1702002.

[LI W. Power-frequency electric field measurement based on AC-Stark effect of Rydberg atoms[D]. Taiyuan: Shanxi University, (Master Thesis), 2021:16–18. (in Chinese). DOI: 10.3788/LOP202158.1702002.]

[9] 丁超, 胡珊珊, 邓松, 等. 基于里德伯原子电场量子测量方法及激光偏振影响分析[J]. 物理学报, 2025, **74**(4):043201. DOI: 10.7498/aps.74.20241362.

[DING C, HU S S, DENG S, *et al*. Rydberg atom electric field based quantum measurement method and polarization influence analysis[J]. *Acta Physica Sinica*, 2025, **74**(4):043201. (in Chinese). DOI: 10.7498/aps.74.20241362.]

[10] MOHAPATRA A K, JACKSON T R, ADAMS C S. Coherent optical detection of highly excited Rydberg states using electromagnetically induced transparency[J]. *Physical Review Letters*, 2007, **98**(11):113003. DOI: 10.1103/PhysRevLett.98.113003.

[11] SEDLACEK J A, SCHWETTMANN A, KUEBLER H, *et al*. Microwave electrometry with Rydberg atoms in a vapour cell using bright atomic resonances[J]. *Nature Physics*, 2012, **8**(11):819–824. DOI: 10.1038/nphys2423.

[12] GORDON J A, SIMONS M T, HADDAB A H, *et al*. Weak electric-field detection with sub-1 Hz resolution at radio frequencies using a Rydberg atom-based mixer[J]. *AIP Advances*, 2019, **9**(4):045030.

[13] 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. DOI: 10.1038/s41567-020-0918-5.

[14] DING D S, LIU Z K, SHI B S, *et al*. Enhanced metrology at the critical point of a many-body Rydberg atomic system[J]. *Nature Physics*, 2022, **18**(12):1447–1452. DOI: http://doi.org/10.1038/s41567-022-01777-8.

[15] TU H T, LIAO K Y, WANG H L, *et al*. Approaching the standard quantum limit of a Rydberg-atom microwave electrometer[J]. *Science Advances*, 2024, **10**(51):eads0683. DOI: 10.1126/sciadv.ads0683.

[16] CARTER J D, CHERRY O, MARTIN J D D. Electric-field sensing near the surface microstructure of an atom chip using cold Rydberg atoms[J]. *Physical Review A*, 2012, **86**(5):053401. DOI: 10.1103/PhysRevA.86.053401.

[17] HANKIN A M, JAU Y Y, PARAZZOLI L P, *et al*. Two-atom Rydberg blockade using direct 6S to *n*P excitation[J]. *Physical Review A*, 2014, **89**(3):033416. DOI: 10.1103/PhysRevA.89.033416.

[18] JAU Y Y, CARTER T. Vapor-cell-based atomic electrometry for detection frequencies below 1 kHz[J]. *Physical Review Applied*, 2020, **13**(5):054034. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.13.054034.

[19] MA L, PARADIS E, RAITHEL G. DC electric fields in electrode-free glass vapor cell by photoillumination[J]. *Optics Express*, 2020, **28**(3):3676–3685. DOI: 10.1364/OE.380748.

[20] MEYER D H, KUNZ P D, COX K C. Waveguide-coupled Rydberg spectrum analyzer from 0 to 20 GHz[J]. *Physical Review Applied*, 2021, **15**(1):014053. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.15.014053.

[21] BAI J, LIU S, WANG J, *et al*. Single-photon Rydberg excitation and trap-loss spectroscopy of cold cesium atoms in a magneto-optical trap by using of a 319-nm ultraviolet laser system[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, **26**(3):1600106. DOI: 10.1109/JSTQE.2019.2941483.

[22] 杜艺杰, 丛楠, 何军, 等. 基于室温里德堡原子天线的宽频带电场测量[J]. 导航与控制, 2022, **21**(5/6):192–198. DOI: 10.3969/j. issn.1674-5558.2022. h5.017.

[DU Y J, CONG N, HE J, *et al*. Broadband electric-field measurement based on room temperature Rydberg atomic antenna[J]. *Navigation and Control*, 2022, **21**(5/6):192–198. (in Chinese). DOI: 10.3969/j.issn.1674-5558.2022.h5.017.]

[23] LI L, JIAO Y, HU J, *et al*. Super low-frequency electric field measurement based on Rydberg atoms[J]. *Optics Express*,

2023, **31**(18):29228–29234. DOI: 10.1364/OE.499244.

[24] 贾春阳, 陈雪花, 丛楠, 等. 里德堡原子电磁探测技术及应用[J]. 信息通信技术与政策, 2024, **50**(7):85–96. DOI: 10.12267/j.issn.2096-5931.2024.07.011.
[JIA C Y, CHEN X H, CONG N, *et al*. Rydberg atomic electromagnetic detection technology and application[J]. *Information and Communications Technology and Policy*, 2024, **50**(7):85–96. (in Chinese). DOI: 10.12267/j. issn.2096-5931.2024.07.011.]

[25] 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. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2949017.

[26] SAFFMAN M, WALKER T G. Creating single-atom and single-photon sources from entangled atomic ensembles[J]. *Physical Review A*, 2002, **66**(6):065403. DOI: 10.1103/PhysRevA.66.065403.

[27] 雍福友. 基于里德堡原子的电场测量研究[D]. 成都: 电子科技大学硕士论文. 2023:48–50. DOI: 10.27005/d.cnki.gdzku.2023.001968.
[YONG F Y. Research based on Rydberg atomic electric field measurement[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, (Master Thesis), 2023:48–50. (in Chinese). DOI: 10.27005/d.cnki.gdzku.2023.001968.]

[28] 张淳刚, 李伟, 张好, 等. 基于调制射频场电磁诱导透明光谱的工频电场测量[J]. 光子学报, 2021, **50**(6):162–168. DOI: 10.3788/gzxb20215006.0602001.
[ZHANG C G, LI W, ZHANG H, *et al*. Power frequency electric fields measurement based on electromagnetic induced transparent spectrum under radio frequency field[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, **50**(6): 162 – 168. (in Chinese). DOI: 10.3788/gzxb20215006.0602001.]

[29] 张学超, 乔佳慧, 刘瑶, 等. 基于里德伯原子天线的低频电场波形测量[J]. 物理学报, 2024, **73**(07):070201. DOI: 10.7498/aps.73.20231778.
[ZHANG X C, QIAO J H, LIU Y, *et al*. Measurement of low-frequency electric field waveform by Rydberg atom-based sensor[J]. *Acta Physica Sinica*, 2024, **73**(07):070201. (in Chinese). DOI: 10.7498/aps.73.20231778.]

[30] ANDERSON D A, SAPIRO R E, RAITHEL G. An atomic receiver for AM and FM radio communication[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, **69**(5):2455–2462. DOI: 10.1109/TAP.2020.2987112.

[31] 邱春炎. 弱电生物电磁感知机理研究[D]. 西安:西安电子科技大学硕士论文. 2023:12–13. DOI: 10.27389/d.cnki.gxadu.2023.004226.
[QIU C Y. Research on the mechanism of weak bioelectromagnetic perception[D]. Xi'an: Xidian University, (Master Thesis), 2023:12–13. (in Chinese). DOI: 10.27389/d.cnki.gxadu.2023.004226.]

[32] 谢广明, 郑君政, 王晨. 水下仿生电场感知综述[J]. 系统仿真学报, 2020, **32**(12): 2289 – 2305. DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0759.
[XIE G M, ZHENG J Z, WANG C. A survey on underwater bionic electric perception[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, **32**(12):2289–2305. (in Chinese). DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0759.]

[33] 李奇安, 刘朋, 金鑫, 等. 电鳗放电非接触式测量系统的设计与实现[J]. 自动化仪表, 2012, **33**(10):30–33. DOI: 10.16086/j.cnki.issn1000-0380.2012.10.003.
[LI Q A, LIU P, JIN X, *et al*. Design and realization of non-contact measurement system of electric eel discharging[J]. *Automation Instruments*, 2012, **33**(10):30–33. (in Chinese). DOI: 10.16086/j.cnki.issn1000-0380.2012.10.003.]

[34] 段耀辉. 弱电鱼电信号特性及感知机理研究[D]. 西安:西安电子科技大学硕士论文. 2023:9–10. DOI: 10.27389/d.cnki.gxadu.2023.000555.
[DUAN Y H. Research on the electrical signal characteristics and perception mechanism of weakly electric fish[D]. Xi'an: Xidian University, (Master Thesis), 2023:9–10. (in Chinese). DOI: 10.27389/d.cnki.gxadu.2023.000555.]

[35] 方遵瑚, 杨汉杰, 邓晴, 等. 基于相关性优化的LSTM耦合模型预测溶解氧研究[J/OL].(2025-05-07). 安全与环境工程, 2025. https://link.cnki.net/urlid/42.1638.X.20250507.1015.002.
[FANG Z H, YANG H J, DENG Q, *et al*. Dissolved oxygen prediction research based on correlation optimization with the coupled LSTM model[J/OL]. (2025-05-07). *Journal of Safety and Environmental Engineering*, 2025. https://link.cnki.net/urlid/42.1638.X.20250507.1015.002. (in Chinese).]

Measurement of simulated fish discharge characteristic signals based on Rydberg atoms

ZHAN De-fang[1,2], SU Nan[1], LIU Yao[1], HE Jun[1,3†], ZHAO Chen-han[1,2], LIU Zhi-hui[1], WANG Jun-min[1,3]

(1. *State Key Laboratory of Quantum Optics Technologies and Devices, and Institute of Opto-Electronics, 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*)

Abstract: **Objective.** Different species of electric fish exhibit unique discharge waveforms, which encode rich biological information. High-precision measurements of these waveform parameters provide a critical basis for fish identification and species classification. This study aims to construct an optical atomic antenna based on Rydberg atoms to simulate and measure the characteristic discharge signals of electric fish. The primary objective is to harness the high sensitivity of Rydberg atoms to weak electric fields, thereby achieving high-precision detection and characterization of transient bioelectrical signals.

Methods. The cesium-133 (^{133}Cs) Rydberg atoms are prepared by adopting a cascaded two-photon excitation scheme. The Doppler broadening is eliminated through a counter-collinear optical path. When the probe and coupling light are resonant with the atomic transition energy levels, the absorption of the probe light by the atoms decreases, generating a high-resolution electromagnetically induced transparency (EIT) spectrum. Under weak field conditions, as the electric field strength increases, the Stark shift increases, and the single-photon detuning introduced by it leads to a decrease in the EIT amplitude. Based on this principle, the electric field waveform can be measured. In the experiment, the electrical signal waveforms of six species of electric fish are designed, and the time span of the waveforms ranges from milliseconds to hundreds of seconds. We optimize the operation of the atomic antenna in the region of nearly linear response to the electric field strength, and optimize the spectral dynamic parameters to obtain a response time at the microsecond scale, which meets the measurement of the discharging time of fish with a precision of milliseconds. Then, the waveform signals of the six species of electric fish are measured through experimental simulation based on the atomic antenna.

Results and Discussions. First, the response time of the atomic antenna was measured, which was approximately two microseconds. The system response time resolution at the microsecond scale meets the requirements for measuring the waveforms of electric fish. Then, the bioelectrical signals of various fish species were measured and analyzed. The Rydberg atomic antenna exhibits high sensitivity to weak and rapidly changing electric fields, and the modulation of the EIT amplitude can directly reflect the dynamic changes of the electric field. The optimization of the system within the linear response range ensures the accuracy of signal reconstruction, and the elimination of the Doppler effect improves the spectral resolution, enabling the successful identification of the waveform signals of electric fish. The results show that the Rydberg sensing technology provides a new method for the study of bioelectrical phenomena and has application potential in the fields of bionic sensing and electrophysiological research.

Conclusions. We construct an optical atomic antenna based on Rydberg atoms, design experiments to conduct simulated measurements of the characteristic electromagnetic field signals of various fish species. In the next step, we will design an experimental scheme for the field environment to verify the measurement of the biological electromagnetic field information of living fish. In the future, the further development of the optical atomic antenna will contribute to the measurement of extremely weak neural electrical signals. These studies include the measurement of the weak electric fields generated by cardiac electrical activities, the measurement of weak bioelectrical signals of blood flow and the study of hemodynamics, as well as the precise spatial and temporal dynamic measurement of brain electrical activities. This provides a technical approach for biomedical research, clinical diagnosis, and health monitoring.

Keywords: Rydberg atoms; electromagnetically induced transparency; electric fish; bioelectric waveforms