

基于改进布谷鸟算法的 LPI 雷达信号无源定位

夏韶俊, 牛 勤

(中国电子科技集团公司 第三十八研究所, 合肥 230088)

摘要: 由于雷达信号传播复杂, 定位易受到初始值和局部极值的影响, 导致定位误差较大; 为此, 利用改进布谷鸟算法优化设计 LPI 雷达信号无源定位方法; 考虑 LPI 雷达信号的产生与传播环境来接收雷达信号, 从空间维度提取雷达信号特征, 并根据接收信号与 LPI 雷达信号之间的特征匹配度, 分选出接收雷达信号的 LPI 雷达信号部分; 然后对 LPI 雷达信号展开增强与干扰抑制处理, 生成信号波束, 并推导出波束方向, 根据雷达信号的传输速度, 得出信号定位初始值; 将定位初始值输入到改进布谷鸟算法中, 选择拉丁超立方抽样方式生成布谷鸟初始样本, 以更全面地覆盖搜索空间; 并采用 Levy 飞行机制进行全局搜索, 通过调整步长因子, 提高全局搜索能力; 同时利用模拟退火机制确定布谷鸟位置更新结果被接受的概率, 避免布谷鸟搜索陷入局部最优; 最终利用改进后的布谷鸟算法获得初始定位误差, 以此调整定位值, 得出 LPI 雷达信号的无源精准定位结果; 结果表明: 在正常和电子对抗环境中, 优化设计方法的定位误差最高分别达到 10 mm 和 13.5 mm, 且均具有较低定位离散度。

关键词: 改进布谷鸟算法; 低截获概率雷达; 雷达信号; 信号定位; 无源定位

Passive Localization of LPI Radar Signals Based on Improved Cuckoo Algorithm

XIA Shaojun, NIU Qin

(The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China)

Abstract: Due to the complex propagation of radar signals, localization is easily affected by initial values and local extremum, resulting in significant positioning errors. Therefore, an improved cuckoo algorithm is utilized to optimize and design passive positioning methods for LPI radar signals. Firstly, considering the generation and propagation environment of LPI radar signals to receive radar signals, extracting radar signal features from spatial dimensions, and sorting out the LPI radar signal part that receives the radar signal based on the feature matching degree between the received signal and the LPI radar signal; Then, the LPI radar signal is performed the enhancement and interference suppression to generate a signal beam, and derive the beam direction. Based on the transmission speed of the radar signal, the initial signal positioning value is obtained; Input the initial positioning values into the improved cuckoo algorithm and select the Latin hypercube sampling to generate initial cuckoo samples, in order to cover the search space more comprehensively; And then, use Levy flight mechanism for global search, improve global search capability by adjusting step size factor; And utilizing simulated annealing mechanism to determine the probability of cuckoo update position being accepted, avoiding cuckoo search getting stuck in local optima; Finally, the improved cuckoo algorithm is used to obtain the initial positioning error, which is used to adjust the positioning value and obtain the passive accurate positioning result of the LPI radar signal. The results show that in normal and electronic warfare environments, the maximum positioning error of the optimized method reaches up to 10.0 mm and 13.5 mm, respectively, with a low positioning dispersion.

Keywords: improved cuckoo algorithm; low probability of interception radar; radar signal; signal positioning; passive positioning

收稿日期:2024-12-30; 修回日期:2025-02-19。

作者简介:夏韶俊(1981-),男,硕士,高级工程师。

引用格式:夏韶俊,牛 勤. 基于改进布谷鸟算法的 LPI 雷达信号无源定位[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(8): 274-282.

0 引言

LPI 雷达信号是指雷达系统发射的信号具有低峰值功率、大带宽、频率可变、波形灵活等特点, 使得截获接收机探测到该信号的概率很低^[1-2]。这种雷达信号的设计目标是使雷达能探测到目标的距离大于能够被截获接收机截获的距离, 从而实现隐蔽探测效果。在电子对抗环境中, 为了能够在不暴露自身的情况下, 实现对敌方雷达系统的隐蔽探测与精确定位, 提出 LPI 雷达信号无源定位方法。

目前发展较为成熟的雷达信号无源定位方法中, 文献 [3] 引入图信号处理技术, 依据频控阵雷达的几何模型及回波数据间的关联性, 构建出回波数据的图信号表示, 采用图傅里叶变换对图信号进行频谱分解, 构建二维谱峰搜索的优化函数, 获取目标的方位角与距离的联合估计值, 最终实现无源定位的目标。然而上述方法在复杂电磁环境下, 该方法无法完全准确地反映实际情况, 导致构建的图信号模型存在误差, 进而影响定位精度。文献 [4] 开发基于 5G 信号的目标回波模型, 依据回波的时延信息, 构建到达距离差的数学方程; 采用加权最小二乘算法对初步估计的目标位置参数进行迭代更新和优化; 在最终阶段, 通过线性变换, 对方程中的距离约束进行处理, 从而精确求解出目标的位置。然而 5G 信号在传播过程中可能会受到建筑物、树木等障碍物的阻挡和干扰, 导致信号衰减, 进而降低雷达信号定位精度。文献 [5] 通过使用在闭集上训练的原始深度神经网络识别模型, 估计信噪比, 并通过编码器-解码器模型计算重建损失, 对已知调制进行分类并识别未知调制, 得出信号定位结果。然而该方法未能考虑电磁环境复杂性, 导致定位结果存在偏差。文献 [6] 通过对雷达信号的处理, 获取中频频谱, 并将其作为输入传递给网络解算器, 生成位置相关的潜变量; 利用物理机制对这些潜变量进行转换, 以生成模拟的虚假中频信号频谱; 设计一个局部光滑的损失函数, 以此促进潜变量的解耦, 并使其定位结果更加精准。然而上述方法在运行过程中, 雷达信号受到噪声、干扰等因素的影响, 会导致初始信号数据质量下降, 进而影响定位性能。综上所述, 传统雷达信号定位方法均存在定位性能不佳的问题, 为此引入改进布谷鸟算法。

雷达信号传播环境复杂多变, 且 LPI 雷达信号由于具有低截获概率特性, 其信号强度较弱且易受噪声和干扰的影响, 导致局部最优解而陷入困境, 定位误差较大。布谷鸟搜索算法通过其独特的莱维飞行模式, 能够在全局范围内进行高效搜索, 避免陷入局部最优, 从而有望找到更接近真实值的定位结果。为保证布谷鸟搜索算法能够适应各种噪声和干扰的影响, 在各种环境下都

能保持稳定的性能, 对布谷鸟搜索算法进行改进。利用改进布谷鸟算法对 LPI 雷达信号无源定位方法进行优化设计, 以期能够提升对雷达信号的定位性能。

1 LPI 雷达信号无源定位方法设计

LPI 雷达信号无源定位大体可以分为信号接收、信号处理和定位 3 个环节, 首先利用侦察设备获取 LPI 雷达信号传输环境中的所有雷达信号, 对接收到的信号进行预处理, 根据雷达信号特征的提取结果, 结合雷达的传播路径得出雷达信号的无源定位结果。在此次研究中, 为解决电子对抗环境中的信号干扰情况, 在上述无源定位方法基础上引入改进布谷鸟算法, 对雷达传播路径推导出的雷达信号定位结果进行调整, 在降低定位干扰的情况下, 避免定位结果陷入局部最优, 得出精准的 LPI 雷达信号无源定位结果。

1.1 接收雷达信号

综合考虑 LPI 雷达信号的产生与传播环境, 利用多个侦察站接收 LPI 雷达信号传播环境中的所有雷达信号, 以此作为雷达信号无源定位的处理对象^[3]。LPI 雷达信号通常采用复杂信号波形, 初始产生的 LPI 雷达信号为:

$$x_0 = A_{\text{LPI}} \cos(2\pi f_0 t + 2\pi f_{\text{adjust}} t + \varphi_0) \quad (1)$$

式中, A_{LPI} 为 LPI 雷达信号振幅, f_0 和 f_{adjust} 分别为 LPI 雷达信号的起始频率和调频率, φ_0 为初相。将生成的 LPI 雷达信号发射到传输环境中, 具体传播过程如图 1 所示。

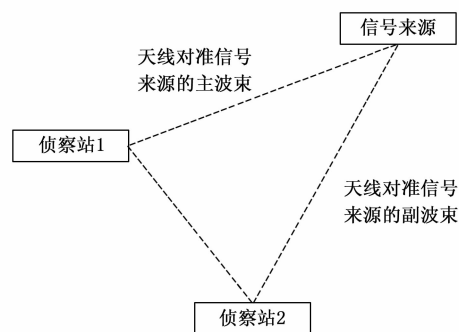


图 1 LPI 雷达信号传输示意图

LPI 雷达信号通过降低发射功率来减少信号的截获概率, 发射功率的降低意味着信号在传播过程中的衰减增大, 在雷达信号传输过程中, 由于信号衰减、多径效应等因素的影响, LPI 雷达信号到达目标后, 部分信号会被目标反射回来, 形成回波信号^[4]。回波信号经过大气传播后到达雷达接收机, 被侦察站接收。综合考虑雷达信号传输环境以及多效应叠加作用, 得出侦察站实际接收的雷达信号为:

$$x_{\text{receive}} = \kappa_{\text{decay}} \kappa_{\text{stacking}} (x_0 + x_{\text{radar}} + \psi) \quad (2)$$

式中, κ_{decay} 和 κ_{stacking} 分别为雷达信号传输衰减系数和多径效应系数, x_{radar} 和 ψ 分别为 LPI 雷达信号传输环境中包含的其他雷达信号以及噪声信号^[5]。根据雷达信号传播环境以及传播距离, 确定变量 κ_{decay} 和 κ_{stacking} 的具体取值, 得出雷达信号的接收结果。

1.2 提取雷达信号特征

以接收的雷达信号为处理对象, 为检测信号中是否存在 LPI 雷达信号, 对雷达信号特征进行提取, 为后续 LPI 雷达信号判断提供支撑。雷达信号特征提取分量具体包括: 脉冲宽度、载波频率、脉冲重复频率、功率谱密度、相位差等, 其中脉冲宽度为脉冲信号的持续时间, 可直接测量得出^[6]。载波频率和脉冲重复频率分别为雷达发射信号的载波频率和雷达信号在单位时间内发射的脉冲数, 上述特征分量的提取结果为:

$$\begin{cases} \tau_{f_c} = \frac{\sum_{k=1}^{\frac{n_c}{2}} k |F[x_{\text{receive}}(k)]|^2}{\sum_{k=1}^{\frac{n_c}{2}} |F[x_{\text{receive}}(k)]|^2} \\ \tau_{f_{\text{pulse}}} = \frac{1}{\Delta t_{\text{launch}}} \end{cases} \quad (3)$$

式中, n_c 为接收雷达信号经快速傅里叶变换的采样点数, $F()$ 为信号的傅里叶变换函数, $x_{\text{receive}}(k)$ 为第 k 个接收雷达信号, Δt_{launch} 为相邻两个雷达信号之间的时间间隔^[7]。雷达信号功率谱密度用来描述信号功率随频率的分布情况, 对于接收的雷达信号, 其功率谱密度特征分量提取过程如下:

$$\tau_p = \lim_{C \rightarrow \infty} \frac{1}{C} E\{|F[x_{\text{receive}}(k)]|^2\} \quad (4)$$

式中, C 为接收雷达信号的观察时间窗口, $E[]$ 为期望值求解函数。从公式 (4) 中可以看出, 由于无法获取无限长时间的雷达信号, 因此使用有限时间窗口内的信号来估计功率谱密度^[8]。另外雷达信号之间的相位差异特征的提取结果为:

$$\tau_\varphi = \varphi(i+1) - \varphi(i) \quad (5)$$

式中, $\varphi(i)$ 和 $\varphi(i+1)$ 分别为两个相邻雷达信号 $x_{\text{receive}}(i)$ 和 $x_{\text{receive}}(i+1)$ 的相位值。按照上述方式可以得出其他所有特征分量的提取结果, 并采用加权融合的方式对融合多个特征分量, 得出当前接收雷达信号的综合特征提取结果, 即:

$$\tau = \omega_1 \tau_{f_c} + \omega_2 \tau_{f_{\text{pulse}}} + \omega_3 \tau_p + \omega_4 \tau_\varphi \quad (6)$$

式中, ω_1 、 ω_2 、 ω_3 和 ω_4 分别为各特征分量的融合系数, $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 1$ 。其中, 各特征分量的融合系数取值需遵循根据特征分量对任务的贡献程度赋予权重、根据特征分量在噪声或干扰条件下的稳定性赋予权重、根据雷达信号的实时接收情况动态调整权重的原则, 以提高综合特征提取结果的准确性和鲁棒性。按照上述方式完

成雷达信号特征的提取, 并根据雷达信号的实时接收情况, 对信号特征进行相应调整。

1.3 检测并分选 LPI 雷达信号

以雷达信号特征的提取结果为比对对象, 采用特征匹配的方式判断当前接收的雷达信号集合中是否存在 LPI 雷达信号。针对存在 LPI 雷达信号的部分, 将 LPI 雷达信号与其他雷达信号分割^[9]。在 LPI 雷达信号检测过程中, 首先根据该类型信号的标准波形设雷达信号的标准特征, LPI 雷达信号的标准波形如图 2 所示。

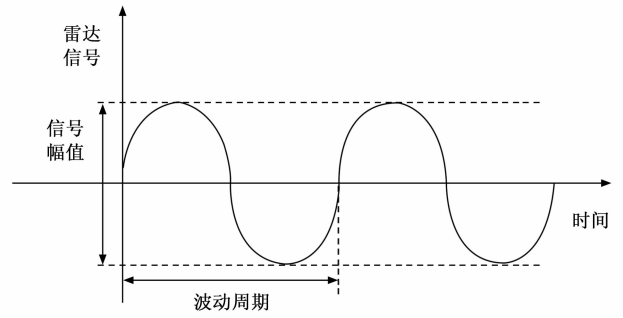


图 2 LPI 雷达信号标准波形图

从图 2 中可以确定 LPI 雷达信号的标准特征, 将其标记为 β 。将接收雷达信号的特征提取结果与 β 进行匹配, 得出 LPI 雷达信号的检测结果, 即:

$$s(x_{\text{receive}}) = \frac{\tau \cdot \beta}{\|\tau\| \cdot \|\beta\|} \quad (7)$$

将接收雷达信号的特征提取结果代入公式 (7) 中, 即可得出信号特征匹配度的求解结果。并通过分析信号特征分布和信噪比影响, 确定区分 LPI 雷达信号和非 LPI 雷达信号的最佳阈值。若特征匹配度高于所确定的阈值 s' , 证明接收雷达信号中包含 LPI 雷达信号, 否则认为当前接收信号中无 LPI 雷达信号^[10]。针对存在 LPI 雷达信号的接收信号部分, 采用信号分割的方式, 得出 LPI 雷达信号分选对象, 信号分选结果如下:

$$x_{\text{LPI}} = \begin{cases} \kappa_f(x_{\text{receive}} - x_{\text{env}}), & s(x_{\text{receive}}) \geq s' \\ 0, & s(x_{\text{receive}}) < s' \end{cases} \quad (8)$$

式中, κ_f 为信号差分系数, x_{env} 为信号传输环境中的噪声和其他综合信号。将满足相似度匹配阈值要求的接收雷达信号输入到公式 (8) 中, 即可分选接收信号中的 LPI 雷达信号部分, 以此作为信号无源定位处理对象。

1.4 LPI 雷达信号增强与干扰抑制

由于 LPI 雷达信号使用低发射功率执行发射任务, 因此在接收雷达信号中分选出的 LPI 雷达信号具有微弱性特征, 为实现对 LPI 雷达信号的精准定位, 需要对分选信号进行增强处理^[11]。LPI 雷达信号采用发射功率调整的方式实现增强, 发射功率调整过程如下:

$$P_{\text{adjust}} = P_{\text{initial}} \times \left[1 + \frac{G_i G_r \lambda^2 d^4}{(4\pi)^3 \sigma^2} \right] \quad (9)$$

式中， P_{initial} 为 LPI 雷达信号的初始发射功率， G_t 和 G_r 分别为的是雷达天线增益和目标天线增益， λ 和 d 分别为雷达信号波长和传输距离， δ 为雷达信号的传输损耗^[12]。采用时域滤波的方式抑制 LPI 雷达信号中的干扰部分，将滤波器应用到分选并增强完成的 LPI 雷达信号中，得出信号干扰抑制结果，即：

$$x_{\text{sup}} = H_{\text{filtering}}(x_{\text{LPI}} \times P_{\text{adjust}}) \tag{10}$$

式中， $H_{\text{filtering}}()$ 为时域滤波函数。重复上述操作，对分拣出的所有 LPI 雷达信号进行处理。

1.5 推导 LPI 雷达信号波束方向

在 LPI 雷达信号增强与干扰抑制处理结果支持下，通过 LPI 雷达信号的聚类形成波束，推导出波束的方向，以此作为信号的定位方向。生成的 LPI 雷达信号波束为：

$$y = \sum_{i=1}^N x_{\text{sup}}(i) \cdot e^{2\pi(i-1)[\sin(\theta) - \sin(\theta_0)]/\lambda} \tag{11}$$

式中， N 为波束中包含的 LPI 雷达信号量， θ_0 和 θ 分别为 LPI 雷达信号的初始发射角度和接收方向角。根据生成的信号波束，得出 LPI 雷达信号波束方向的推导结果为：

$$\begin{cases} \vartheta = \sin\left[\frac{y(t)}{y(t-1)}\right] \\ \varphi = \cos\left[\frac{y(t)}{y(t-1)}\right] \end{cases} \tag{12}$$

式中， $y(t-1)$ 和 $y(t)$ 分别为 $t-1$ 和 t 时刻生成的 LPI 雷达信号波束，计算结果 ϑ 和 φ 分别为信号波束的方向角和俯仰角^[13]。以推导的信号波束方向角作为信号定位方向，在实际波束方向推导过程中，LPI 雷达信号及其波束可能会产生传输方向偏移现象，此时需要对波束方向角进行实时计算，取平均值作为波束方向的推导结果。

1.6 LPI 雷达信号无源定位的实现

1.6.1 获取 LPI 雷达信号定位初始值

LPI 雷达信号波束方向的推导结果反映了信号在空间中的传播路径，波束方向角描述了波束在水平面上的投影方向，而俯仰角则反映了波束相对于水平面的倾斜程度。这两个角度共同定义了雷达波束的三维指向^[14]。当雷达发射信号时，信号将沿着这个波束方向传播，直至遇到目标物体。通过测量信号从雷达发射到目标反射回来的时间，可以计算出目标与雷达之间的距离。随后，结合已知的波束方向角和距离信息，雷达系统可以运用三角函数等数学工具，推算出信号目标在三维空间中的位置^[15]。在定位初始值计算过程中，首先通过测量 LPI 雷达信号往返时间计算定位目标与测量段之间的距离，计算结果为：

$$D = \frac{vt_{\text{return}}}{2} \tag{13}$$

式中， v 和 t_{return} 分别为 LPI 雷达信号在空气环境中的传播速度以及往返时间。结合 LPI 雷达信号波束方向角的推导结果，得出 LPI 雷达信号定位初始值为：

$$\begin{cases} X_0 = D \times \cos\vartheta \\ Y_0 = D \times \sin\vartheta \\ Z_0 = D \times \sin\varphi \end{cases} \tag{14}$$

公式 (14) 得出的是 LPI 雷达信号的初始位置估计结果，在实际应用中，需要通过迭代算法或其他优化方法来进行进一步提高定位精度。

1.6.2 利用改进布谷鸟算法调整雷达信号初始定位值

为保证 LPI 雷达信号的定位精度，利用改进布谷鸟算法对 LPI 雷达信号进行训练与学习，在初始信号定位结果的基础上，对其进行调整^[16]。为保证信号定位精度，首先构建布谷鸟算法，并通过增加种群多样性、引入混沌映射、混合模拟退火机制、自适应度调节步长等方式，改进布谷鸟算法，改进后的布谷鸟算法执行流程如图 3 所示。

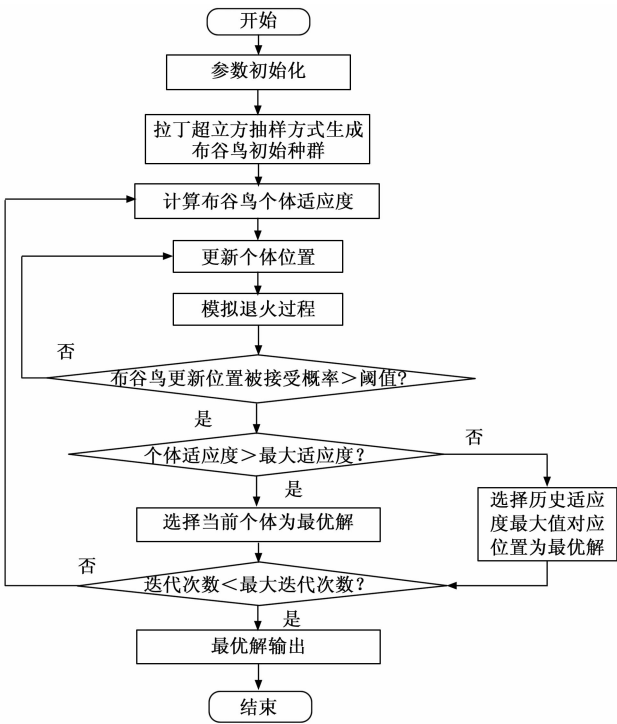


图 3 改进布谷鸟算法流程图

在改进的布谷鸟算法中，定义每个布谷鸟代表一个潜在的雷达信号雷达位置解，通过模拟布谷鸟寻窝产卵的行为，在解空间中随机产生初始种群，种群多样性可以通过在初始种群生成时引入随机性和多样性策略来增强，根据 LPI 雷达信号特征，选择拉丁超立方抽样方式生成布谷鸟初始样本，并计算每个个体的最优位置作为 LPI 雷达信号的定位偏差。初始布谷种群的生成结果为：

$$B = \sum_{i=1}^{N_w} b_i^w \quad (15)$$

式中, N_w 为维度 w 中包含的布谷鸟样本分布区间数量, b_i^w 为任意分布区间中随机产生的样本点^[17]。假设初始生成的布谷鸟个体的飞行符合随机搜索路径与时间的关系服从 Lévy 分布, 则通过模拟 Lévy 飞行即可更新布谷鸟个体的位置。服从 Lévy 分布的布谷鸟个体飞行轨迹如图 4 所示。

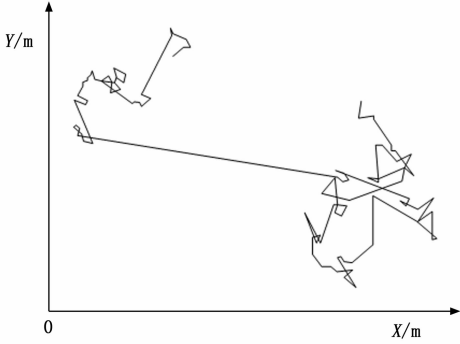


图 4 布谷鸟个体 Lévy 飞行轨迹示意图

按照图 4 表示方式, 得出个体在任意一次迭代中输出的位置更新结果为:

$$q_{b_i} = b_i + \alpha \cdot \kappa_{\text{Lévy}} \cdot \xi, b_i \in B \quad (16)$$

式中, b_i 为初始生成种群中的第 i 个布谷鸟个体, α 、 $\kappa_{\text{Lévy}}$ 和 ξ 分别为步长因子、Lévy 飞行参数和服从 Lévy 分布的随机数^[18]。按照上述方式对初始种群中的所有个体进行位置更新, 实现全局搜索, 扩大布谷鸟的搜索空间, 引入自适应调节步长方式, 确定步长因子的具体取值, 即:

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{\min} + \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{g_{\text{avg}} - g_{\text{best}}} \times (g_{b_i} - g_{\text{best}}), & g_{b_i} \leq g_{\text{avg}} \\ \alpha_{\max}, & \text{else} \end{cases} \quad (17)$$

式中, $\alpha_{\max}$ 和 $\alpha_{\min}$ 为初始设定步长因子的最大值和最小值, g_{b_i} 、 g_{avg} 和 g_{best} 分别对应的是当前布谷鸟个体的适应度以及适应度的平均值和最优值。将公式 (17) 表示的自适应步长结果代入公式 (16) 中, 重复更新操作, 选择适应度最高值, 作为布谷鸟位置的更新结果。随着算法不断探寻最优巢穴位置, 相应的适应度数值逐步降低, 导致莱维飞行步长的比例因子逐渐从大到小调整^[19]。在算法迭代的初始阶段, 采用大步长进行跳跃式前进, 确保全面的搜索范围; 随着搜索范围逐渐缩小, 进入后期阶段, 当接近最佳巢穴时, 步长比例因子的减小促使算法在接近最优解的区域内进行细致搜索, 防止因步长过大而遗漏最优解, 从而维持算法在全局搜索与局部收敛之间的平衡, 增强算法整体的优化性能。在每次迭代中, 根据定位误差更新鸟巢位置, 并保留较优的解。为避免布谷鸟搜索陷入局部最优, 将模拟退火

机制引入布谷鸟搜索算法中, 平衡全局搜索和局部搜索能力。在模拟退火过程中, 布谷鸟位置更新结果被接受的概率为:

$$p_{b_i} = \exp\left(\frac{\Delta q_{b_i}}{T}\right) \quad (18)$$

式中, Δq_{b_i} 表示布谷鸟更新位置 q_{b_i} 与当前位置之间的偏差, 也就是当前雷达信号初始定位值与最优值之间的偏差, T 为模拟退火机制中的当前温度值, 在考虑降温系数的情况下, 确定任意时刻模拟退火机制中变量 T 的具体取值。根据公式 (18) 的计算结果, 判断是否接受新解, 并保留最优的解^[20]。当达到最大迭代次数或保留的最优解小于预设阈值时, 输出当前布谷鸟位置作为最优解, 即 LPI 雷达信号初始定位误差的精准计算结果, 即:

$$e = \begin{cases} q_{b_i}(k_{\max}), & p_{b_i} \geq p' \\ q_{b_i}(k_0), & p_{b_i} < p' \end{cases} \quad (19)$$

式中, k_0 和 $k_{\max}$ 分别为算法迭代次数的初始值和最大值, p' 为预设阈值。按照上述方式, 利用改进后的布谷鸟算法优化搜索策略并增强全局搜索能力, 同时避免早熟收敛和陷入局部最优。根据改进布谷鸟算法输出的定位误差求解结果, 实现对 LPI 雷达信号初始定位值的调整, 调整结果为:

$$\begin{cases} X_{\text{adjust}} = X_0 + e \\ Y_{\text{adjust}} = Y_0 + e \\ Z_{\text{adjust}} = Z_0 + e \end{cases} \quad (20)$$

根据定位误差 e 求解结果的正负属性确定初始定位值的调整方向, 由此完成对 LPI 雷达信号初始定位值的调整。

1.6.3 输出 LPI 雷达信号无源定位结果

以 LPI 雷达信号定位初始值与调整值的输出结果, 作为 LPI 雷达信号的无源定位结果, 为实现无源定位结果的可视化输出, 将其映射到 LPI 雷达信号传输环境所处的坐标环境中, 并对无源定位结果进行坐标转换, 由此确定 LPI 雷达信号无源定位的输出结果为:

$$\begin{cases} X = \kappa_{\text{convert}} X_{\text{adjust}} \\ Y = \kappa_{\text{convert}} Y_{\text{adjust}} \\ Z = \kappa_{\text{convert}} Z_{\text{adjust}} \end{cases} \quad (21)$$

其中: κ_{convert} 为无源定位坐标的转换系数。若环境中包含的 LPI 雷达信号数量不唯一, 则按照上述方式得出所有信号的无源定位结果, 并以融合、可视化方式, 实现 LPI 雷达信号无源定位结果。

2 性能测试实验分析

为了测试优化设计基于改进布谷鸟算法的 LPI 雷达信号无源定位方法的定位性能, 设计性能测试实验, 此次实验主要以定位精准度作为测试目标, 采用对比测试

的方式，即在实验环境中通过 LPI 雷达信号传输任务的设定，在相关硬件设备的支持下，确定雷达信号样本的实际传输路径，以信号传输路径点作为 LPI 雷达信号的实际值。利用优化设计方法捕获 LPI 雷达信号，通过对信号特征的提取与分析，得出雷达信号对象的定位结果，将其与设定的传输路径点进行比对，得出反映信号定位精准度性能的测试结果。为保证优化设计方法能够适应 LPI 雷达信号传输的多种情景，实验共布设两种信号传输环境，分别为正常传输环境和电子对抗环境，在两种传输环境中重复执行信号定位操作，得出相应的定位性能测试结果。

2.1 布设雷达信号传输环境

为保证雷达信号传输环境的可控性，选择空旷平地作为传输环境，在初始状态下，信号传输环境中不包含任何雷达设备、通信设备和电子对抗设备。在选择传输环境中安装多个 AN/TPS-43、AN/TPS-74 等类型雷达设备，保证准备的雷达设备能够自主生成 LPI 雷达信号并按照设定方向发射雷达信号。在雷达设备周围安装信号处理器、电源以及环境监测等辅助设备，为雷达设备工作提供稳定电源，并监测信号传输环境状态，由此实现雷达信号正常传输环境的布设。在此基础上，在信号传输环境中安装 C-32B 型电子侦查设备和 LJ-J3000+型电子干扰设备作为电子对抗设备，电子侦查设备用来模拟对敌方电磁干扰源的监测工作，电子干扰设备用来模拟对敌方侦察接收机的干扰与压制工作，电子侦查设备覆盖频段为 10~30 MHz，侦察分辨率为 80 Hz，电子干扰设备的干扰频段为 300 MHz~6 GHz，采用发射电磁波的干扰方式，干扰信号的发射强度和发射频率分别为 20 dB 和 60 Hz，得出电子对抗环境的布设结果。

2.2 安装 LPI 雷达信号捕获设备

为了给实验提供 LPI 雷达信号样本，在布设的雷达信号传输环境中安装 TFN RMT744A 型雷达信号捕获设备，以此作为信号采集任务的硬件支持。

安装的雷达信号捕获设备能够覆盖 5 kHz~44 GHz 的宽测试频率范围，频谱扫速在 9 kHz~9 GHz/20 GHz 范围内可达 137 GHz/s (@25 kHz)，这意味着它可以对信号进行 100% 捕获，高频接收灵敏度可达到 -165 dBm/Hz。在捕获设备安装过程中，需保证其安装位置与电子对抗设备之间的距离不小于 2 km，根据 LPI 雷达信号传输参数的设定情况，设置信号捕获设备的频率范围、扫描速度。

2.3 生成 LPI 雷达信号样本及无源定位任务

在雷达发射设备支持下，选择线性调频信号作为样本信号类型，设定雷达样本信号的起始频率为 2 GHz，终止频率为 4 GHz，调频带宽为 2 GHz，信号脉冲宽度

为 10 μs，脉冲重复频率为 1 kHz。为减少被敌方侦察设备截获的风险，LPI 雷达信号样本的发射功率设置为 52 mW。生成不同数量的 LPI 雷达信号样本，按照上述参数，向不同方向发射，得出 LPI 雷达信号样本的生成结果。其中第一组 LPI 雷达信号样本的生成结果，如图 5 所示。

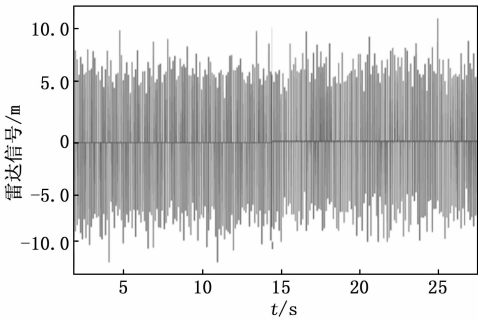


图 5 LPI 雷达信号样本波形图

按照上述方式得出多组 LPI 雷达信号样本，综合考虑其传输环境，记录信号的实际传输路径数据，以此作为无源定位目标，第一组雷达信号的无源定位实际值如表 1 所示。

表 1 雷达信号实际路径数据表

时间节点编号	正常传输环境	电子对抗环境
1	(120.0,67.9,34.6)	(120.0,67.9,34.6)
2	(125.7,78.8,36.9)	(125.7,78.8,32.5)
3	(127.4,89.0,37.2)	(127.4,89.0,37.2)
4	(131.3,90.2,38.7)	(131.3,50.7,38.7)
5	(134.5,101.3,39.8)	(134.5,101.3,39.8)
6	(136.9,112.4,41.1)	(136.9,62.2,41.1)
7	(139.2,116.8,43.5)	(139.2,116.8,40.2)
8	(140.6,121.5,45.9)	(93.7,121.5,45.9)

按照上述方式可以得出所有 LPI 雷达信号样本对应实际位置数据，以此作为验证定位方法定位性能的比对标准。

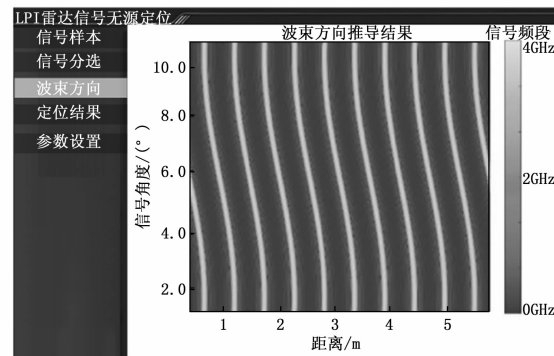
2.4 设定改进布谷鸟算法运行参数

为保证改进布谷鸟算法能够在 LPI 雷达信号无源定位方法中正常运行，设定算法的初始布谷鸟个体数量为 50，最大迭代次数为 200，Lévy 飞行步长和步长因子分别为 0.1 和 0.01，服从 Lévy 分布的随机数设定为 2.0，步长因子的最大值和最小值分别为 0.1 和 0.001，局部搜索采用差分进化策略。

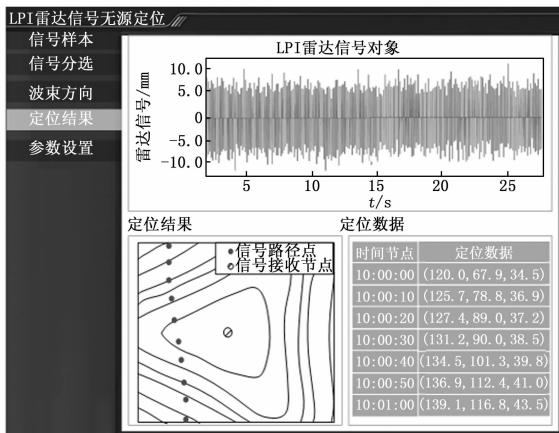
2.5 描述性能测试实验过程

选择 MATLAB/Simulink 软件作为基于改进布谷鸟算法的 LPI 雷达信号无源定位方法的开发工具，MATLAB 能够实现信号无源定位结果的可视化输出，Simulink 实现了改进布谷鸟算法的可视化运行。将安装的

LPI 雷达信号捕获设备接入到无源定位方法对应的运行程序中, 保证设备输出的信号捕获结果能够直接导入到定位方法中。在正常信号传输环境中, 同时启动信号生成设备、信号捕获设备, 通过对样本信号的训练与分析, 得出 LPI 雷达信号无源定位执行输出结果, 如图 6 所示。



(a) 雷达信号波束方向推导界面



(b) LPI 雷达信号无源定位结果界面

图 6 LPI 雷达信号无源定位方法执行界面

按照上述方式可以得出该环境下所有 LPI 雷达信号样本的无源定位结果。将实验环境调整至电子对抗环境, 重复上述操作, 得出该环境下所有信号的无源定位结果。实验设置文献 [4] 中的基于 5G 信号的雷达目标定位方法和文献 [5] 中基于深度神经网络的雷达信号定位方法作为对比方法, 利用对比方法得出对应 LPI 雷达信号样本的无源定位结果。

2.6 设置 LPI 雷达信号无源定位性能测试指标

设置 LPI 雷达信号无源定位误差和定位离散度作为证明信号无源定位性能的测试指标, 其中定位误差的测试结果为:

$$\epsilon = |X_{\text{pos}} - X_{\text{set}}| + |Y_{\text{pos}} - Y_{\text{set}}| + |Z_{\text{pos}} - Z_{\text{set}}| \quad (22)$$

式中, $(X_{\text{pos}}, Y_{\text{pos}}, Z_{\text{pos}})$ 和 $(X_{\text{set}}, Y_{\text{set}}, Z_{\text{set}})$ 分别为信号无源定位的输出值与实际值。另外, 定位离散度指标的测

试结果如下:

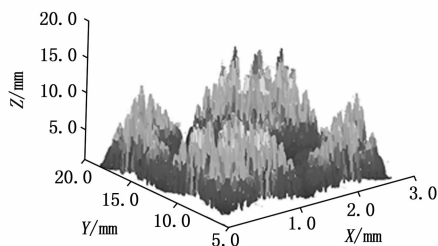
$$\eta = \frac{\sigma}{\chi} \quad (23)$$

式中, σ 和 χ 分别为定位结果的标准差和平均值, 标准差 σ 反映了定位数据点的离散程度, 平均值 χ 代表了定位数据点的集中趋势。最终计算得出定位误差和离散度取值越小, 证明对应方法的定位性能越优。

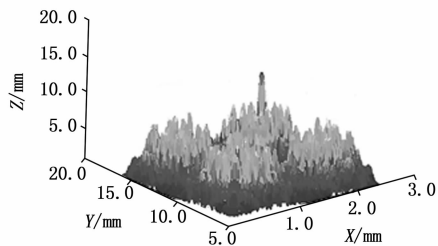
2.7 定位性能测试实验结果与分析

2.7.1 LPI 雷达信号正常传输环境

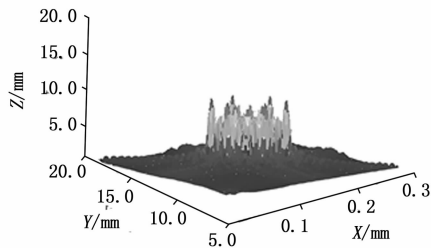
在正常传输环境下, 通过 3 种方法定位输出结果的统计与公式 (17) 的计算, 得出定位误差的测试结果, 如图 7 所示。



(a) 基于 5G 信号的雷达目标定位方法



(b) 基于深度神经网络的雷达信号定位方法作为对比方法



(c) 基于改进布谷鸟算法的 LPI 雷达信号无源定位方向

图 7 正常传输环境中雷达信号定位误差测试结果

从图 7 中可以看出, 优化设计方法在 x 、 y 和 z 三个方向维度上的信号定位误差均低于基于 5G 信号的雷达目标定位方法和基于深度神经网络的雷达信号定位方法, 误差最高达到在 10 mm。而基于 5G 信号的雷达目标定位方法和基于深度神经网络的雷达信号定位方法的定位误差均最高分别为 15.3 mm 和 15 mm。由此, 对比上述结果可知, 在正常传输环境中, 所提出的优化设计方法具有较高的定位精度, 定位误差较小。在此基础

上，通过公式（18）的计算，得出信号定位离散度的测试结果，如图 8 所示。

从图 8 中可以直观看出，与基于 5G 信号的雷达目标定位方法和基于深度神经网络的雷达信号定位方法相比，优化设计方法得出的定位结果更接近信号的实际值，且离散点数量更少。而基于 5G 信号的雷达目标定位方法和基于深度神经网络的雷达信号定位方法的离散点数量较多。由此表明，所提出的优化设计方法更具有定位可靠性。

2.7.2 LPI 雷达信号电子对抗环境

在电子对抗环境中，通过相关数据的统计与公式（17）（18）的计算，得出信号定位误差和离散度的测试对比结果，如图 9 所示。

从图 9（a）中可以看出，优化设计方法的信号定位结果误差明显低于基于 5G 信号的雷达目标定位方法和基于深度神经网络的雷达信号定位方法得出的定位误差，最高仅为 13.5 mm。从图 9（b）中可以看出，与基于 5G 信号的雷达目标定位方法和基于深度神经网络的雷达信号定位方法相比，优化设计方法得出定位结果与实际信号位置之间的拟合度更高。综上所述，在此次研究中，无论是在正常传输环境中还是电子对抗环境中，所提出的优化设计方法均具有较优的定位性能表现。这是由于改进布谷鸟算法的应用，能够适应各种噪声和干扰的影响，可及时发现 LPI 雷达信号定位中的误差，并及时做出调整，从而提升 LPI 雷达信号在不同传输环境中的定位性能。

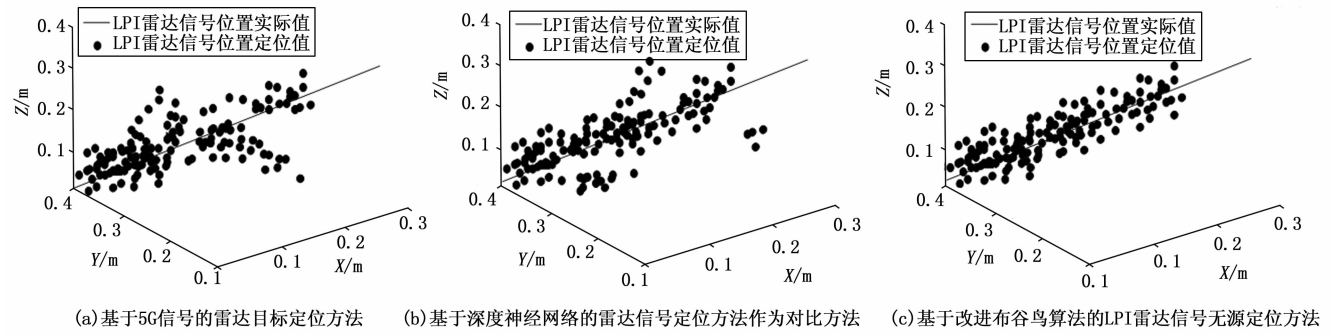


图 8 正常传输环境中 LPI 雷达信号定位离散度测试结果

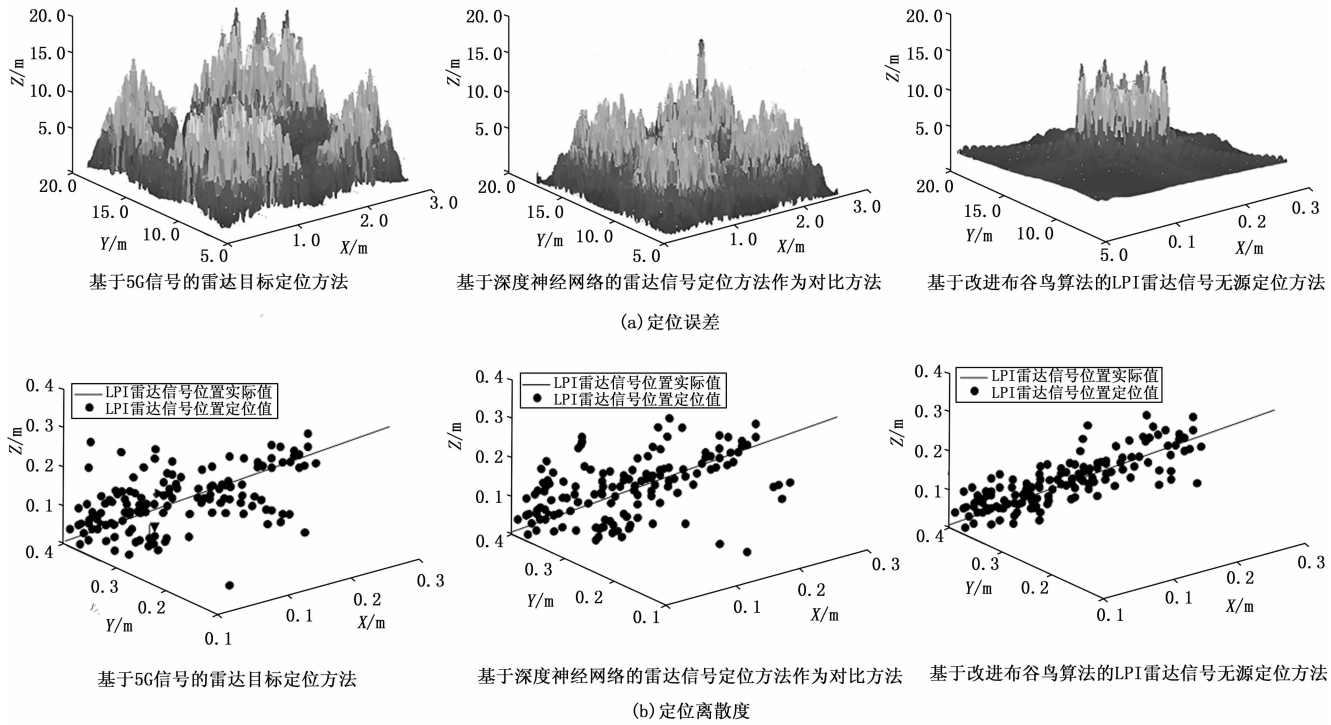


图 9 电子对抗环境下 LPI 雷达信号定位性能测试结果

3 结束语

LPI 雷达信号无源定位不依赖于雷达系统主动发射的信号,而是利用环境中已存在的或目标自身发射的信号进行定位,因此具有隐蔽性强、抗干扰能力好等特点,不易被敌方侦测和干扰,提高了雷达系统的生存能力和作战效能。与此同时,也给 LPI 雷达信号无源定位带来较大挑战。在此次研究中,通过改进布谷鸟算法的应用,显著提高了算法的收敛速度和全局寻优能力,对信号的定位误差及时做出调整,进而保证信号的无源定位性能,因此优化设计方法可以广泛应用于多种场景,包括军事侦察、导弹制导、水下探测、航天测控等领域,具有较高的应用前景。未来,为进一步提升所提方法的性能,将探索自适应的参数调整策略,使算法能够根据当前搜索状态和搜索空间的特点动态调整参数,以提高算法的鲁棒性和搜索效率,确保 LPI 雷达信号定位精度和可靠性。

参考文献:

- [1] 周其玉, 易伟, 袁野, 等. 分布式多基无源雷达信号级协同目标定位技术 [J]. 现代雷达, 2024, 46 (9): 64-78.
- [2] 孟彦京, 刘青. 基于 S7-200PLC 光伏供电自动切换控制系统 [J]. 现代电子技术, 2018, 41 (2): 107-110.
- [3] 谢宁波, 欧阳缮, 廖可非, 等. 基于图信号处理的频控阵雷达目标定位方法 [J]. 电子与信息学报, 2023, 45 (5): 1559-1566.
- [4] 何漆龙, 黄川, 邱星晔, 等. 基于 5G 信号的分布式被动雷达目标定位方法 [J]. 信号处理, 2024, 40 (9): 1621-1632.
- [5] YUAN S, LI P, WU B. Radar emitter signal intra-pulse modulation open set recognition based on deep neural network [J]. Remote Sensing, 2024, 16 (1): 108.
- [6] 刘磊, 林杰. 基于可解释网络解耦表征的低成本雷达定位解算方法 [J]. 计算机应用研究, 2024, 41 (2): 563-568.
- [7] 赵研, 陶海红, 畅鑫, 等. 基于差分模型的近场无源定位算法 [J]. 雷达科学与技术, 2023, 21 (4): 405-410.
- [8] 夏楠, 马昕昕, 王思琦. 强干扰下基于三阶互累积量的 FMCW 雷达信号 DOA 估计算法 [J]. 电子学报, 2024, 52 (2): 510-517.
- [9] 王易丽, 杨宇明. 一种基于改进谱聚类的雷达信号分选算法 [J]. 电讯技术, 2023, 63 (9): 1348-1354.
- [10] 薛燕, 王磊. 未知信号传播速度的 TDOA 定位方法研究 [J]. 传感技术学报, 2024, 37 (3): 456-462.
- [11] 钟华, 阮怀林, 孙兵, 等. 时频空域混叠脉冲串辐射源信号直接定位算法 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44 (1): 363-371.
- [12] 朱珂慧, 董亮, 李建峰. 基于联合时频差分析的高仰角卫星干扰信号定位 [J]. 电波科学学报, 2024, 39 (4): 631-639.
- [13] 朱松, 李玮. BDS-3 卫星信号质量及 RTK 定位分析 [J]. 测绘科学, 2022, 47 (1): 1-8.
- [14] 卞志昂, 卢虎, 史浩东. 运动参数辅助的无人机单站机会信号定位方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2022, 49 (3): 101-110.
- [15] 孙骞, 丁天语, 简鑫, 等. 面向同频干扰环境的 5G 机会信号定位算法研究 [J]. 电子与信息学报, 2024, 46 (8): 3136-3145.
- [16] 毛伊敏, 顾森晴. 基于 MapReduce 与优化布谷鸟算法的并行密度聚类算法 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2023, 53 (10): 2909-2916.
- [17] 丁希成, 王红军. 基于布谷鸟迭代更新策略的多重优化算法 [J]. 计算机工程与应用, 2022, 58 (9): 67-73.
- [18] 吴浩峻, 郝启润, 聂群, 等. 基于骑手优化的动态布谷鸟搜索算法 [J]. 计算机应用研究, 2022, 39 (7): 2007-2011.
- [19] 郑洪清, 冯文健. 求解约束优化问题的改进布谷鸟搜索算法 [J]. 工程数学学报, 2023, 40 (1): 135-146.
- [20] 马技, 刘彩霞, 丁琳琳. 基于改进布谷鸟搜索算法的矿震震源定位方法研究 [J]. 地球物理学进展, 2024, 39 (3): 1070-1080.
- [20] DOUGLAS M, RACHARDSON R, MARCELO T, et al. Reinforcement learning with multiple shared rewards [J]. Procedia Computer Science, 2016, 80: 855-864.
- [21] BAIL Y, CHEN M Z, ZHU L, et al. Multi-hop temporal knowledge graph reasoning with temporal path rules guidance [J]. Expert Systems with Applications, 2023, 223 (1198): 4-22.
- [22] LI J, SONG D D, WANG H, et al. Entity alignment for temporal knowledge graphs via adaptive graph networks [J]. Knowledge-Based Systems, 2023, 274: 1106-1137.
- [23] YANG C, ZHENG R Z, CHEN X R, et al. Content recommendation with two-level TransE predictors and interaction-aware embedding enhancement: an information seeking behavior perspective [J]. Information Processing & Management, 2023, 60 (4): 103402-103418.
- [24] YASSIN K, SOUHIRR G, LEW F C, et al. Deep embedded hybrid CNN-LSTM network for lane detection on NVIDIA Jetson Xavier NX [J]. Knowledge-Based Systems, 2022, 240: 107941-107958.
- [25] MOUNIR M, FLAVIUS F, TAMO R. A visual-semantic approach for building content-based recommender systems [J]. Information Systems, 2023, 117: 102243-102255.

(上接第 273 页)