

12-12-2019

Jammer Placement Algorithm Based on Particle Swarm Optimization

Fang Fang

1. Anhui University of Chinese Medicine, Hefei 230037, China;;

Chunming Ye

2. School of Electronic Countermeasure, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;;

Haibo Liu

3. 31108th Unit, Nanjing 210016, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Jammer Placement Algorithm Based on Particle Swarm Optimization

Abstract

Abstract: A novel jammer placement algorithm based on particle swarm optimization is proposed to solve the problems of nodes' mobility and restrictions on placement areas in ad-hoc network. *There are three steps in this algorithm: network simulation, jamming simulation, and optimization. The algorithm simulates the network communication process and movement of nodes with discrete simulation method. Simple particle swarm optimization is applied to compute the exact coordinates of jammers.* Experiment results show that this algorithm is good at jamming network nodes moving in different ways. The algorithm has stable performance with varying conditions such as different placement areas, jamming ranges, network density, speeds of nodes and numbers of jammers.

Keywords

Ad-hoc network, jamming moving target, jammer placement, particle swarm optimization

Recommended Citation

Fang Fang, Ye Chunming, Liu Haibo. Jammer Placement Algorithm Based on Particle Swarm Optimization[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(6): 1101-1110.

一种基于粒子群优化的干扰点部署算法

方芳¹, 叶春明², 刘海波³

(1. 安徽中医药大学, 安徽 合肥 230037; 2. 国防科技大学电子对抗学院, 安徽 合肥 230037; 3. 31108 部队, 江苏 南京 210016)

摘要: 针对现有的自组网干扰点部署算法未考虑目标移动和部署区域受限的情况, 提出一种基于粒子群优化的干扰点部署算法。算法主要包括目标建模、攻击建模和优化计算3部分, 采用离散事件仿真方法对目标网络节点移动特性和通信过程进行建模, 利用简单粒子群算法实现最佳位置的选择。实验结果表明, 该算法部署的干扰点对于不同移动方式节点的目标网络具有很好的干扰效果。当干扰区域受限, 或是干扰距离、网络节点密度、节点速度、干扰点数量等条件变化时, 算法性能均表现出良好的稳定性。

关键词: 无线自组网; 移动节点干扰; 干扰点部署; 粒子群优化

中图分类号: TP393 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 06-1101-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0730

Jammer Placement Algorithm Based on Particle Swarm Optimization

Fang Fang¹, Ye Chunming², Liu Haibo³(1. Anhui University of Chinese Medicine, Hefei 230037, China; 2. School of Electronic Countermeasure, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China; 3. 31108th Unit, Nanjing 210016, China)

Abstract: A novel jammer placement algorithm based on particle swarm optimization is proposed to solve the problems of nodes' mobility and restrictions on placement areas in ad-hoc network. *There are three steps in this algorithm: network simulation, jamming simulation, and optimization. The algorithm simulates the network communication process and movement of nodes with discrete simulation method. Simple particle swarm optimization is applied to compute the exact coordinates of jammers.* Experiment results show that this algorithm is good at jamming network nodes moving in different ways. The algorithm has stable performance with varying conditions such as different placement areas, jamming ranges, network density, speeds of nodes and numbers of jammers.

Keywords: Ad-hoc network; jamming moving target; jammer placement; particle swarm optimization

引言

无线自组网具有易于部署、结构多变、路由灵活等特点, 适用于节点移动性强的通信场景, 在军

事行动、灾害救援、智能交通等领域应用广泛。自组网中节点位置变动、路由更改、外界攻击干扰等通信条件变化对网络性能、安全等方面的影响, 一直是相关研究的热点问题。研究者们一方面通过设计更复杂的路由策略、优化拓扑结构、引入加密机制等方法^[1], 改进网络通信性能和安全性能。另一方面研究自组网通信机制的弱点, 提出不同的攻击方法, 降低敌方网络通信性能, 达到特定的攻击效果。干扰攻击一直是针对自组网的主要攻击手段,



收稿日期: 2018-10-31 修回日期: 2019-01-04;
基金项目: 国防科技大学基金(zk170341), 安徽省教
研基金(kj2016A400), 安徽中医药大学自然重点项目
(2018zrzd12);
作者简介: 方芳(1982-), 女, 安徽安庆, 硕士生,
讲师, 研究方向为数据分析, 优化算法。

<http://www.china-simulation.com>

• 1101 •

适用于各类不同类型的无线网络。在传感器网络等一些规模较小的自组网中,攻击者一般不完全依赖高功率、高带宽设备对目标进行压制干扰,而是更注重攻击策略的运用。通过优化组织、合理分配有限的干扰信号资源,最大化攻击效果。相关的策略包括干扰时机的选择,干扰节点之间的协作,干扰点位置部署等^[2-3]。

干扰点位置部署问题主要研究基于目标网络的拓扑结构、节点位置等信息,在合适的位置部署干扰节点以达到最佳攻击效果。根据不同攻击目的,选择合适的位置部署干扰点就能造成预期的攻击效果。相比较其他几种策略,干扰点部署方法能够结合各类攻击手段并综合运用,完成对网络局部或整体的不同攻击目的,具有更普遍的适应性和更好的干扰效果。早期研究中,目标网络被抽象为连接网络,攻击策略大多基于图的连通性指标选择网络中关键节点或关键边作为攻击目标^[4],复杂网络中的度(degree)、介数(betweenness)、中心性(centrality),WSN介数中心度等描述节点和边连通性^[5-7]的指标被用作衡量标准,进而选出被攻击对象,干扰点则被部署以对这些目标实施攻击。Shankar^[8]在无线 mesh 网(Wireless Mesh Network, WMN)中根据节点密度、通信源/目的节点位置、网络分割程度等特性部署干扰点,并研究了干扰点位置和数量对网络通信的影响。Feng 等^[9-10]研究通过快速搜索的技术找出若干条链路(边),将目标网络分割成若干互不相连的子网络以降低通信能力,并基于此分析结果部署干扰点。Gezici 等^[11]研究了针对无线定位系统中的干扰点部署问题,通过分析和实验证明了在不考虑干扰距离的前提下,通过部署干扰点使得目标节点处于凸多边形的干扰范围内,能最大限度的提高定位精度的下界(CRLB)。Lall 等^[12]研究了 WMN 的安全防护技术,将干扰点部署转化为背包问题,利用剪枝算法计算最优干扰点位置,通过干扰点发送随机噪声防止网络被窃听。Liu 等^[13]也研究了利用干扰点防窃听问题,使用尽可能少的干扰点相互协作完全覆盖住监听区

域,采用是随机部署或区域和边界覆盖的策略。在军事通信领域中,干扰点部署研究多用于如何选择攻击的对象或分析目标网络脆弱性^[14-17]。

虽然现有多种干扰点部署算法,但仍存在下列问题:一是多数算法主要基于连接图的点、边特征计算选择攻击目标,较少考虑实际场景下节点的通信范围、干扰距离等参数;二是目标网络中多数为静态,未考虑实际情况下通信节点的移动特性;三是侧重理论上关键目标选择,未考虑实际场景中,干扰点部署位置可能存在受限的情况。针对上述问题,本文提出一种针对自组网移动特性的干扰点部署算法,算法对目标网络节点移动轨迹进行建模,仿真网络的通信、移动及受攻击过程,利用粒子群优化算法计算最优干扰点部署位置,能够实现不同通信距离、干扰范围和限定的部署区域等条件下,对目标网络的最优干扰效果。

1 模型与相关技术

1.1 网络模型

本文设定的网络模型如下。网络中共 P 个节点均匀分布在 $L \times L$ 的区域内,节点之间的通信距离为 D ,按照一定的速度和轨迹移动。各节点周期性地向当前处于自身通信范围内的所有其他节点发送数据报文。若无干扰,则不考虑报文丢失的情况。共 J 个干扰点被部署在相同区域内某位置,且始终保持静止,每个干扰点的干扰距离均为 d_{jam} ,假设干扰信号为全向覆盖的方式,即干扰范围是以干扰点坐标为圆心,以 d_{jam} 为半径的一个圆形区域,且所有处于干扰范围内的通信节点均无法接收报文。网络模型如图 1 所示。

现有的相关研究中网络节点大多保持静止。本文为研究移动节点的干扰,将通信节点移动模式表示为线性移动和随机移动两类。在线性移动模式下,节点在初始时刻,按照特定轨迹匀速向目的位置移动,直至结束时刻停止移动。在随机移动模式下,节点每个时刻随机向某一方向匀速移动,直至

最终时刻结束, 目的位置不确定。当节点速度为 0 时, 即为静态网络。

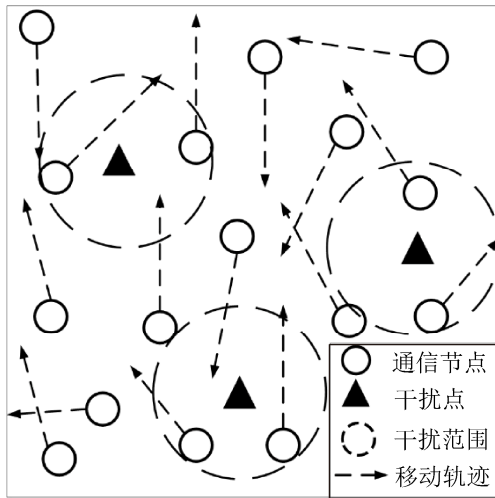


图 1 网络模型示意图

Fig. 1 Network model diagram

1.2 粒子群优化算法

由于通信节点位置不固定, 目标网络拓扑结构也不断变化, 依据网络静态结构参数进行分析计算的结果, 只能在部分阶段保持较好效果, 在网络运行一段时间后会带来较大误差。而优化算法能够根据目标特点, 不断调整迭代以适应目标的变化特性, 找到全局最优解, 适用于本文研究的问题。

粒子群算法^[18]是使用最广泛的优化算法之一, 其主要思路为: 初始产生一定规模的种群空间(算法中称个体为粒子, 称种群为粒子群落), 通过多次迭代从这些粒子中计算产生最优结果。在历次迭代过程中, 算法会根据优化选择的标准, 不断更新种群中全局最优个体以及本身历史上最优个体, 作为下一次迭代的优化标准。粒子群算法计算方法如(1)~(2)式所示。其中 v 代表每次迭代计算的增量, 被称为粒子的飞行速度, x 代表每次迭代中粒子的值, 被称为粒子的位置。 $i=1, 2, 3, \dots, m$, $d=1, 2, 3, \dots, D$, m 表示粒子群落的规模, D 表示粒子变量的维度。 c_1, c_2 为常数, 一般取值为 2 或 1.4916。 r_1, r_2 是(0, 1)之间的随机变量。式(1)表示任意下一时刻($t+1$ 时刻, 即下一次迭代)的新的速度值是

由上一时刻(t 时刻)的速度值乘以动量惯性系数 ω , 再加上 c_1, r_1 乘以每个粒子个体历史上最优值与当前值之差, 以及 c_2, r_2 乘以粒子群落中历史最优值与当前值之差。式(2)表示下一刻的位置则是当前位置加上下一刻的速度乘以约束因子 α 。

$$v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}^t) \quad (1)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + \alpha v_{id}^{t+1} \quad (2)$$

由于传统的粒子群计算收敛相对较慢, 本文采用简化的粒子群算法^[19]作为计算方法。计算方法如式(3)所示。简单粒子群在计算过程中省略了速度变量 v , 直接用上一时刻粒子位置代替 v , 在保持计算效果的前提下, 减少了迭代次数, 提高了计算速度。

$$x_{id}^{t+1} = \omega x_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}^t) \quad (3)$$

2 算法设计与实现

2.1 算法基本步骤

针对网络中节点的移动性和干扰点部署区域受限制的情况, 提出一种基于粒子群优化模型的移动自组网干扰点部署算法(Jammer Placement based on sPSO for MANET, 简称 JPM), 算法流程如图 2 所示。该算法框架主要包含目标建模、攻击建模和优化计算 3 部分。算法步骤大致如下。

(1) 明确攻击目的: 算法首先需要根据攻击者的意图和目标的信息, 明确攻击的目的, 选择合适的目标和攻击手段, 然后针对具体问题建模和分析。由于本文研究的是针对无线自组网移动节点的干扰点部署问题, 目标和攻击手段较明确, 因此实验中不再过多分析。

(2) 目标建模: 为了使攻击行为和过程评估具有载体, 需要根据上述攻击目的和具体场景, 对目标对象所有可用特性进行建模, 在此基础上仿真目标对象运行的过程。本文主要针对移动节点通信过程进行攻击, 因此实验中对网络中节点的移动过程和通信过程进行建模和仿真。

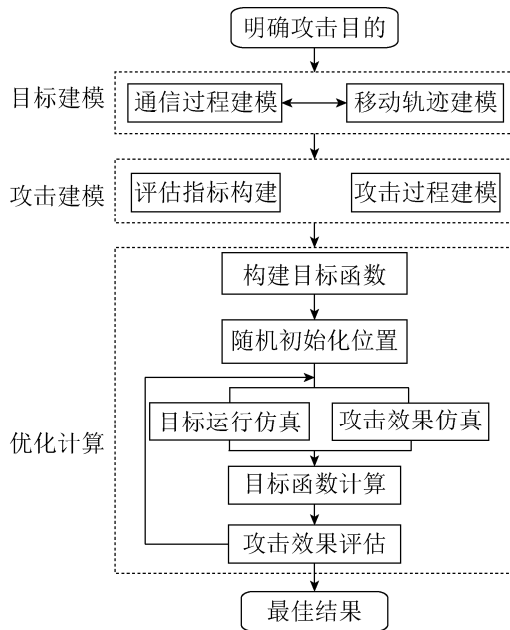


图2 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of the algorithm

(3) 攻击建模: 为了精确计算攻击效果, 需要对攻击行为进行建模, 其中包括评估指标的构建, 以及具体攻击过程的建模。算法基于离散事件仿真方法, 结合上述目标运行过程, 模拟对目标的攻击过程, 并计算评估攻击的效果, 为优化计算提供决策依据。本文实验中, 评估指标使用的是报文投递率和网络的自然连通度, 并通过计算每个离散时间点上干扰节点和通信节点之间的距离关系分析干扰效果。

(4) 优化计算: 根据上述建模过程和指标, 构建优化的目标函数, 并基于粒子群方法进行优化计算。本文实验中根据所有节点的位置, 基于上述指标构建优化的目标函数, 从随机化的初始位置开始, 基于离散事件仿真目标网络移动和通信过程, 计算每个节点的干扰效果, 由目标函数计算出整体的攻击效果, 并判断是否需要继续迭代计算。

(5) 得到最优结果: 当优化计算达到限定条件, 停止计算, 得到最优结果。

上述算法框架适用于对不同类型目标群体实施攻击的方案制定、效果评估和辅助决策。本文仅以无线自组网为示例, 阐述算法过程及验证其有效性。在实际场景中, 可针对更大区域和时间范围内

更多类型目标进行应用, 例如对飞行器、船只、车辆的干扰攻击等。

2.2 移动和通信过程建模

为描述目标网络通信过程中的动态特性, 采用离散事件仿真的方法, 将目标网络通信节点移动和通信过程描述为多个离散时间点的移动和通信状态的顺序合集。在每个最小的时间单元内, 为简化计算, 将节点在初始时刻的瞬时位置作为在这个时间段内的位置, 这样将节点连续移动状态被转变为若干离散的点状态。同样对于节点通信状态, 计算每个时间单元内所有节点之间的通信情况, 包括报文的发送、接收、干扰状况, 作为当前时间段内的通信状态。因网络规模较小, 不考虑报文传输时延。

本文对节点移动过程做如下假设: 对于线性移动模式下的节点, 在较短时间内节点移动保持匀速不变, 且按照一定轨迹运行。在实施干扰前如果能侦测到节点度瞬时速度和方向, 就能预测这段时间内节点的移动轨迹。对于随机移动模式下的节点, 仅认为短时间内速度不变, 方向和目的未知。按照节点移动轨迹形状将其分为以下5类, 其中 t 表示移动时长; t_0 表示 t 的开始时刻; t_n 表示 t 的结束时刻; v 表示移动速度。前4种属于线性移动模式, 目的位置确定, 轨迹固定。第5种随机移动模式的移动轨迹和目的位置不确定。

(1) 静止: 节点的速度 $v=0$, t 时间段内节点位置保持不变。

(2) 直线移动: 节点在 t 时间段内移动方向不变, 从 t_0 时刻开始以速度 v 移动, 直至到达目的位置。

(3) 曲线移动: 节点在 t 时间段内按照贝塞尔曲线轨迹以速度 v 移动, 直至 t_n 时刻到达目的位置。

(4) 折线移动: 节点从 t_0 时刻开始, 以速度 v 直线移动, 移动方向按照预先设定不断改变, 直至 t_n 时刻到达目的位置。

(5) 随机移动: 节点从 t_0 时刻开始, 以速度 v 移动, 任意时刻方向都可能发生改变, 直至 t_n 时刻结束, 目的位置不确定。

2.3 评价指标

本文从网络通信的畅通程度和网络结构抗毁性两方面评估部署算法的干扰效果,使用的是网络的报文投递率^[7](packet delivery ratio, *PDR*)和网络的自然连通度^[18]两个指标。

PDR 用于衡量节点通信受干扰的动态过程,在一定时间段内,单个节点 *p* 的 *PDR* 值计算公式为: $PDR=m/n$ 。其中 *m* 表示通过校验而正确接收到的报文数量, *n* 表示所有节点向 *p* 发送的报文数量。整个网络的 *PDR* 计算方法如式(4)所示。其中 *P* 为所有通信节点的数量, m_{pi} 表示第 *i* 个节点正确收到的报文数, n_{pi} 表示所有其他节点向第 *i* 个节点发送的报文数。节点的网络的 *PDR* 值越低,表明部署算法的干扰效果越好。

$$PDR = \sum_{i=1}^P \frac{m_{pi}}{n_{pi}} \quad (4)$$

自然连通度是网络中所有长度的闭途径数量的加权和,用于分析网络静态结构中的抗毁性。相比传统的度、中心性等,自然连通度能更好的刻画网络整体链路的畅通性和冗余特点。对于邻接矩阵 *A*,其自然连通度计算方法如式(5)所示。其中 *N* 表示矩阵 *A* 的特征根的个数, λ_{An} 表示 *A* 的第 *n* 个特征根。自然连通度值越低,表明网络的抗毁性能越低,部署算法干扰效果越明显。

$$\lambda = \ln\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e^{\lambda_{An}}\right) \quad (5)$$

在 JPM 算法中, *PDR* 指标用于动态仿真过程中的优化计算,自然连通度和 *PDR* 共同用于最后的效果评估。实际上由于优化算法的通用性, JPM 可以根据任意指标重新构建目标函数,调整部署效果。本文只是从中选取了两个有代表性的指标。

2.4 优化计算

按照上述节点移动的建模方式, JPM 算法对预测目标网络在 *t* 时长范围内节点的移动模式和轨迹,将其运行过程按照时间单位分割为 *t* 个离散的状态。对于每个状态下的网络,按照节点速度和运

行方向,更新所有节点位置、相互距离、通联关系等网络结构参数,并根据初始的干扰点部署位置,根据通信距离、干扰范围等参数,计算当前状态下网络的报文的发送、接收和受到干扰的报文数量。在 *t* 时间段结束时刻,计算网络整体的 *PDR* 值,作为当前部署位置的评价指标,并将上述参数带入优化模型,迭代计算直至结束。

预测节点轨迹适用于线性移动模式下。但在随机移动模式下,节点轨迹不可预测,无法精确计算每个时刻节点的通信和受干扰状态。在此模式下, JPM 算法将节点的初始位置作为整个时段运行过程中的平均位置,计算该状态下干扰效果作为优化指标。

2.5 其他限定条件

在上述计算过程中,干扰点可以被部署到通信网络的任意位置。但在实际网络环境中,考虑到地形、网络防护等因素,很多情况下外部的干扰点不能被随意部署到通信区域的任意位置。对于 $L \times L$ 的矩形通信区域,本文考虑了以下 2 类只能够被部署到限定区域的情况:一是被部署到通信区域的边缘角落;二是被部署到通信区域的外围区域。如图 3 所示。其中内部较大矩形表示实际的通信区域,阴影部分①表示角落区域;阴影部分②表示外围区域。

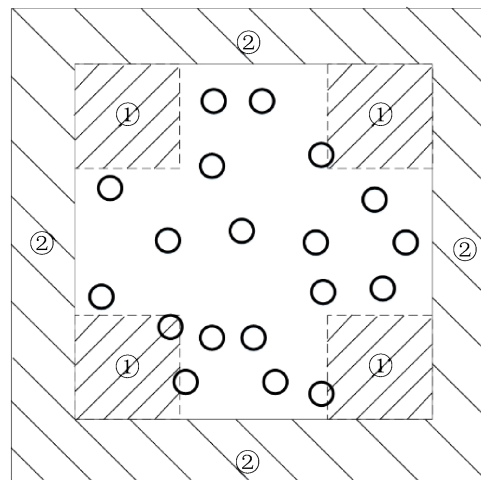


图 3 限定的干扰点部署区域
Fig. 3 Specific areas for jammer placement

2.6 算法复杂度分析

JPM 算法主要计算过程包括两部分: 目标运行过程模拟和粒子群优化。目标模拟计算受时间粒度和时长 t 、节点数量 P 、干扰点数量 J ，目标分布范围等因素影响。其中时间粒度需要根据具体场景设定。节点之间通信过程模拟时间复杂度为 $O(P^2)$ 。目标分布范围大小影响到粒子群解空间搜索范围。粒子群优化则受种群数量 N 、迭代次数 M 的影响。 J 值较小且一般不变化可视为常数。算法整体的复杂度与上述因素呈线性关系，可表示为 $O(M*N*T*A*P^2)$ ，其中 T 为与时长 t 除以时间粒度所得值， A 为目标分布区域的面积。

3 实验验证

为检验 JPM 算法效果，在 Matlab 2018a 中进行仿真实验，实验机为 i5-4200H 2.8Ghz CPU, 12G 内存配置的笔记本。实验构建范围为 $L \times L$ 的矩形通信区域，按照均匀分布的方式，随机产生 P 个通信节点，节点之间的通信距离均为 d_{com} ，每秒时间内每个节点向所有处于通信范围内的其他节点发送一个报文。通信区域内将部署 J 个干扰点，干扰距离统一为 d_{jam} ，处于干扰范围内的节点无法正确接收报文。通信节点以速度 v 在 t 时间段内匀速移动，移动模式包括线性和随机两种，其中线性模式主要以直线移动为例，其他移动方式计算效果类似不再赘述。干扰点被部署后不再移动。同时选取 4 种部署算法的结果进行类比，分别是：

(1) 随机部署(Jammer Placement with Random, JPR): 在通信范围内，随机产生 J 个坐标位置部署干扰点。

(2) 点度数部署(Jammer Placement with Node Degree, JPD): 选择点度数最大的 J 个通信节点，在其附近部署干扰点。

(3) 点介数部署(Jammer Placement with Node Betweenness, JPN): 选择点介数最大的 J 个通信节点，在其附近部署干扰点。

(4) 边介数部署(Jammer Placement with Edge Betweenness, JPE): 选择边介数最大的 J 条边，取边的两端节点的中心位置部署干扰点。

本文实验中如无特别说明，具体参数设置均按照表 1 所示。

表 1 实验参数设置
Tab. 1 Experimental parameters

参数	值
每轮实验次数 K	50
网络区域边长 L	200 m
通信节点数 P	20
干扰点数 J	3
通信距离 d_{com}	40 m
干扰范围 d_{jam}	40 m
仿真时长 t	10 s
移动速度 v	1 m/s
限定区域 1 大小	30
限定区域 2 边缘	20
粒子群落大小 N	30
优化迭代次数 M	200
c_1, c_2	1.496 1

3.1 不同算法效果对比

在一般情况下各种算法对于不同移动模式的干扰实验效果如图 4~6 所示。每种参数下各算法均运行 50 次，其中的自然连通度曲线每个时间点上的值是各次实验对应时刻结果的均值。

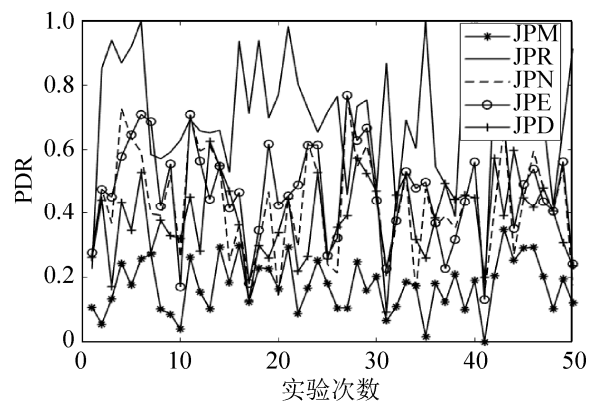


图 4 直线移动模式下 PDR 对比

Fig. 4 PDR comparison in linear moving mode

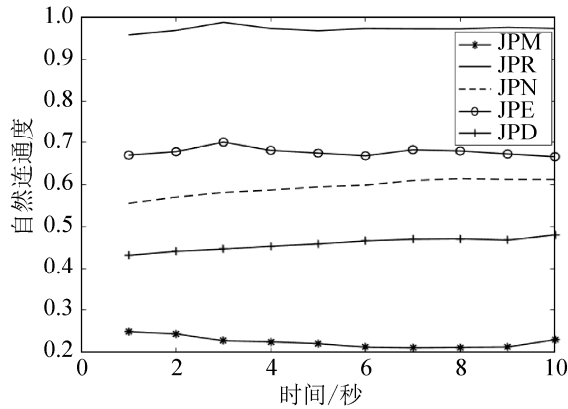


图 5 直线移动模式下连通度对比

Fig. 5 Connectivity comparison in linear moving mode

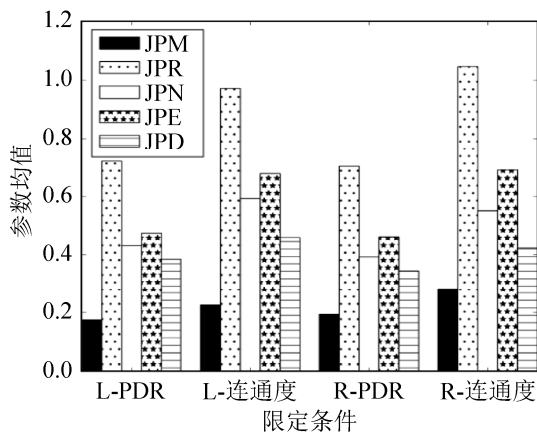


图 6 直线-随机移动模式参数对比

Fig. 6 Parameter comparison in linear and random moving modes

图 4 显示的是直线移动模式下 PDR 值对比。目标网络受到干扰后, PDR 值产生不同幅度的下降。在多次实验中, JPM 算法使得目标网络的 PDR 值始终保持较低值, 而随机部署 JPR 算法产生的效果波动较大, 甚至在部分情况下对目标网络通信几乎无影响。JPN, JPE 和 JPD 3 种算法对目标网络的 PDR 影响效果接近。图 5 所示影响网络抗毁性方面, JPM 算法仍表现出明显优势, 并且随着时间的变化, 使得目标网络的自然连通度持续降低, 表明 JPM 算法是针对网络整体动态过程的干扰。仅当节点移动距离离初始位置较远以后, 才使得干扰效果略有下降。另几种算法在网络初始阶段效果较好, 但随着节点的移动, 干扰效果逐渐下降, 网络抗毁性指标逐步提高。图 6 显示的是在两种移动

模式下各参数均值对比。其中 L 和 R 分别表示直线和随机移动模式。结果表明在不同移动模式下, JPM 算法始终保持较好效果且于其他算法。

3.2 不同限定区域的效果

进一步分析算法在限定区域的部署算法的干扰效果。对于上述的情况①角落区域, 设置角落大小为 $Z \times Z$ 的矩形区域, $Z=30$ 。对于情况②外围区域, 设定边缘的宽度为 20。由于部署位置被限制在靠外的区域, 无法按照 JPD, JPN 等算法的结果将干扰点布置在特定节点附近, 因此实验选择 JPR 算法作为对比, 干扰点位置在限定区域随机部署。另外按照尽量靠近通信区域, 且相互之间尽量分散的原则手动选择几个特殊节点作为对比, 如图 7 所示。其中三角形点表示情况 1 下的两类节点部署方式, 坐标分别为 $([0,30], [30,200], [200,170])$ 和 $([30,30], [30,170], [170,30])$, 分别记为 CP1 和 CP2。小的正方形表示情况 2 下两类部署方式, 坐标分别为 $([0, 0], [100, 200], [200,0])$ 和 $([0,100], [100,200], [200,100])$, 记为 EP1 和 EP2。在两种移动模式下的实验结果如图 8~9 所示。其中 CL 和 CR 分别代表情况①的直线和随机移动模式, EL 和 ER 分别代表情况②的直线和随机移动模式。

结果表明在限定区域的前提下, 虽然干扰效果比之前有所降低, 但 JPM 算法的各项指标均优于其他方式。在情况①角落区域部署时, 尽可能靠近通信区域内部的部署方式 CP2 与 JPM 算法在 PDR 指标上较接近, 但对网络抗毁性影响远低于 JPM 算法。而随机部署方式效果更差。在情况②外围区域部署时, 两类较均匀的部署方式 EP1 和 EP2 均好于随机算法, 但仍然不如 JPM 算法。算法普遍存在的问题是干扰效果存在波动, 另一个问题是网络抗毁性指标不再随时间变化而持续降低, 原因可能是这些情况下部分通信节点集中在通信区域内部, 远离干扰点范围, 导致干扰效果的下降。

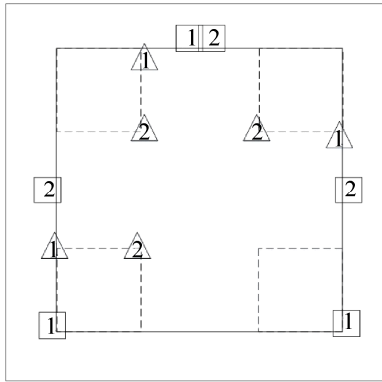


图7 特殊干扰点位置

Fig. 7 Selected jammer placement positions

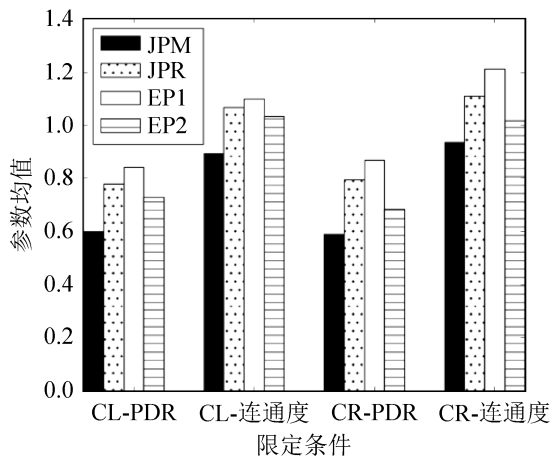


图8 情况1 干扰效果参数对比

Fig. 8 Mean values of results in condition 1

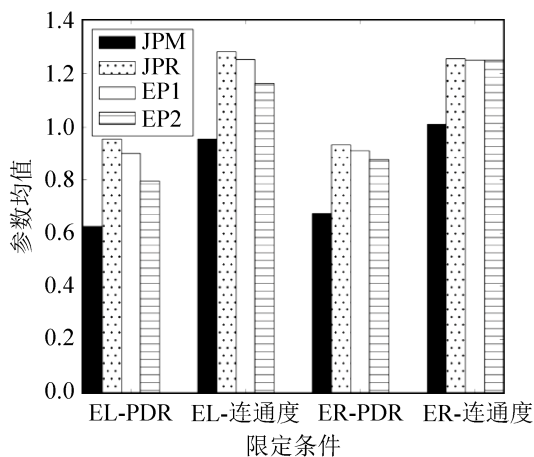


图9 情况2 干扰效果参数对比

Fig. 9 Mean values of results in condition 2

3.3 稳定性与耗时

进一步通过改变干扰范围、节点密度、速度、干扰点数量等条件分析算法稳定性。实验分别将干

扰距离 d_{jam} 改为 30 和 50, 将通信节点数 P 改变为 30, 将干扰节点数量 J 改变为 4, 以及将节点速度 v 从 1 m/s 改变为 2 m/s, 各次实验结果如表 2 所示。结果显示当各类条件发生变化时, JPM 算法仍旧保持较好效果, 且远优于其他算法。

表2 其他条件下效果对比

Tab. 2 Results under other conditions

参数	JPM	JPR	JPN	JPE	JPD	
$d_{jam}=30$	PDR	0.30	0.81	0.53	0.58	0.48
	连通度	0.40	1.02	0.55	0.63	0.48
$d_{jam}=50$	PDR	0.08	0.58	0.36	0.38	0.34
	连通度	0.11	0.99	0.54	0.59	0.44
$P=30$	PDR	0.24	0.68	0.54	0.62	0.47
	连通度	0.54	1.66	1.31	1.51	1.00
$J=4$	PDR	0.12	0.76	0.31	0.38	0.29
	连通度	0.14	1.09	0.42	0.57	0.36
$v=2$	PDR	0.18	0.68	0.41	0.45	0.38
	连通度	0.23	1.02	0.55	0.63	0.48

在上述实验环境中, 部分实验的平均耗时如表 3 所示。数据显示改变干扰点数量对算法性能影响不大。影响最大的是目标节点的移动模式, 原因是为了精确描述目标运行全部过程, 在不同移动模式下, 需要跟随移动轨迹, 计算每个时间点中所有节点的通信和受干扰状态, 耗费了较多计算时间。实际应用中, 可根据攻击时长和网络性能选择合适的时间粒度, 以达到性能和效果的平衡。

表3 算法平均耗时

Tab. 3 Mean time costs

参数	平均耗时/s
$J=3$, 直线模式	50.65
$J=3$, 随机模式	21.55
$J=4$, 直线模式	51.20
$J=4$, 随机模式	21.83
$J=3$, 角落区域, 直线模式	39.07
$J=3$, 角落区域, 随机模式	15.69
$J=3$, 边缘区域, 直线模式	53.72
$J=3$, 边缘区域, 随机模式	21.12

3.4 实验结果分析

上述实验显示, 随机部署干扰点 JPR 算法能够对网络性能产生影响, 但效果有限且不够稳定。

基于结构参数的部署算法针对网络局部有更好的干扰效果, 但当网络拓扑动态变化时算法无法保证最优。并且当部署区域受限时, 也无法根据结构特性计算出最优位置。而 JPM 算法将目标网络运行的全过程作为研究对象, 能够从全局的角度进行优化和部署。所以无论是部署区域受限的情况, 还是干扰距离、通信节点密度、移动速度、干扰点数量等条件发生变化等情况, JPM 算法均能计算出在现有条件限制下的相对最优的结果, 始终保持了良好的稳定性和干扰效果。

4 结论

针对通信自组织网络的干扰点部署是无线网络安全技术研究重要内容之一。现有各类基于网络结构参数分析的部署算法, 对于如何选择攻击对象和部署节点做出了理论分析, 但未考虑真实应用中各类条件的限制。本文针对实际场景下干扰点部署问题, 提出一种基于粒子群优化的干扰点部署算法 JPM, 通过对目标网络移动方式进行建模和预测, 并利用简单粒子群优化算法计算出限定数量干扰点的最佳部署位置。仿真实验表明, JPM 算法在目标节点不同移动模式下、在部署区域受到限制的情况下, 均能计算出最佳干扰点部署位置。且 JPM 算法表现出良好的稳定性, 干扰效果不因干扰距离、通信节点密度、移动速度、干扰点数量等条件的变化而产生波动。本文 JPM 算法中干扰点由于始终处于静止状态, 干扰效果仍未达到完全阻断目标网络通信的理论最优值, 下一步可以尝试研究根据目标网络特点实施移动式干扰, 计算最优的干扰点移动轨迹, 进一步提高干扰效果。

参考文献:

- [1] Chaubey N K. Security analysis of vehicular ad hoc networks (VANETs): a comprehensive study [J]. *International Journal of Security and Its Applications* (S1738-9976), 2016, 10(5): 261-274.
- [2] Jameel F, Wyne S, Kaddoum G, et al. A Comprehensive Survey on Cooperative Relaying and Jamming Strategies for Physical Layer Security [J]. *IEEE Communications*

- Surveys & Tutorials (S1553-877X), 2018, 8(1): 1.
- [3] Huo Y, Tian Y, Ma L, et al. Jamming Strategies for Physical Layer Security [J]. *IEEE Wireless Communications* (S1536-1284), 2018, 25(1): 148-153.
- [4] Holme P, Kim B J, Yoon C N, et al. Attack Vulnerability of Complex Networks [J]. *Physical review E* (S2470-0045), 2002, 65(5): 56-71.
- [5] Zhang D, Gogi S A, Broyles D S, et al. Modelling Wireless Challenges [C]. *Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking*. Turkey: ACM, 2012, 1(1): 423-426.
- [6] Zhang D, Sterbenz J P G. Analysis of Critical Node Attacks in Mobile Ad hoc Networks [C]. *Reliable Networks Design and Modeling (ONDM), 6th International Workshop on*. Spain: IEEE, 2014: 171-178.
- [7] 李文锋, 符修文. 无线传感器网络抗毁性[J]. *计算机学报*, 2015, 38(3): 625-647.
- Li Wenfeng, Fu Xiwen. Survey on Invulnerability of Wireless Sensor Networks[J]. *Chinese Journal of Computer*, 2015, 38(3): 625-647.
- [8] Shankar A. Optimal Jammer Placement to Interdict Wireless Network Services [R]. *Naval postgraduate school monterey ca, California, USA: dudley knox library*, 2008.
- [9] Feng J, Li X, Pasilio E L, et al. Jammer Placement to Partition Wireless Network [C]. *Globecom Workshops*. USA: IEEE, 2014: 1487-1492.
- [10] Feng J, Dixon W E, Shea J M. Fast Algorithms for Jammer Placement to Partition a Wireless Network [C]. *IEEE International Conference on Communications*. France: IEEE, 2017: 1-6.
- [11] Gezici S, Bayram S, Kurt M N, et al. Optimal Jammer Placement in Wireless Localization Systems [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing* (S1053-587X), 2016, 64(17): 4534-4549.
- [12] Lall S, Alfa A S, Maharaj B T. Optimal Placement and Power Allocation for Jammers in Wireless Mesh Networks [C]. *Vehicular Technology Conference (VTC Fall) 2015*. USA: IEEE, 2015: 1-7.
- [13] Liu J, Liu Z, Zeng Y, et al. Cooperative Jammer Placement for Physical Layer Security Enhancement [J]. *IEEE Network* (S0890-8044), 2016, 30(6): 56-61.
- [14] Eisen J, Watson S, Willink T. Location Constrained Jamming: Surgical Link Removal Using Local Graph Partitioning [C]. *2018 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*. Poland: IEEE, 2018: 1-7.
- [15] 颀孙少帅, 杨俊安, 刘辉, 等. 未知拓扑无线自组网

- 络多节点干扰决策算法[J]. 西安交通大学学报, 2018, 1(6): 91-97.
- Zhuansun Shaoshuai, Yang Junan, Liu Hui, et al. An Algorithm of Multi-Nodes Jamming Decision in Blind Wireless Ad-hoc Networks[J]. Journal of Xi'an JiaoTong University, 2018, 1(6): 91-97.
- [16] 李尔玉, 龚建兴, 黄健, 等. 基于功能链的作战体系复杂网络节点重要性评价方法[J]. 指挥与控制学报, 2018, 4(1): 42-49.
- Li Eryu, Gong Jianxing, Huang Jian, et al. Node Importance Analysis of Complex Networks for Combat System Based on Function Chain[J]. Journal of Command and Control, 2018, 4(1): 42-49.
- [17] 孙成雨, 申卯兴, 盛浩, 等. 防空多传感器网络结构抗毁性优化设计[J]. 通信学报, 2017, 38(6): 118-126.
- Sun Chengyu, Shen Maoxing, Sheng Hao, et al. Optimization design of structure invulnerability for air defense multiple sensor network[J]. Journal on Communications, 2017, 38(6): 118-126.
- [18] Kennedy J. Particle swarm optimization [M]. Encyclopedia of Machine Learning. Boston MA: Springer, 2011: 760-766.
- [19] 胡旺, 李志蜀. 一种更简化而高效的粒子群优化算法[J]. 软件学报, 2007, 18(4): 861-868.
- Hu Wang, Li Zhishu. A Simpler and More Effective Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Journal of Software, 2007, 18(4): 861-868.