

无线传感器网络中基于盲点查找的能量空洞避免路由算法

赵湘宁

(福建农林大学 计算机与信息学院,福州 350002)

摘 要: 在实际的无线传感器网络中,由于路由空洞而采用的边缘转发方式容易引起空洞边缘节点能量消耗过快从而导致空洞不断扩大,形成能量空洞。为延长网络生命周期,避免能量空洞的出现,对网络中的盲区、盲点进行定义,设计一种盲区查找规则,并提出一种基于盲点查找的路由算法。利用网络中的盲点和盲区信息进行路由,避开空洞边缘的盲点,从而减少了边缘转发次数。仿真结果表明,与 GPSR 和 GEAR 算法相比,该算法能有效延长网络生命周期,数据包到达率较高,传输效率有所提升。

关键词: 无线传感器网络;能量空洞;网络生命周期;盲点;盲区

中文引用格式: 赵湘宁. 无线传感器网络中基于盲点查找的能量空洞避免路由算法[J]. 计算机工程, 2017, 43(12): 88-92, 97.

英文引用格式: ZHAO Xiangning. Energy Hole Avoidance Routing Algorithm Based on Blind Node Searching in Wireless Sensor Network[J]. Computer Engineering, 2017, 43(12): 88-92, 97.

Energy Hole Avoidance Routing Algorithm Based on Blind Node Searching in Wireless Sensor Network

ZHAO Xiangning

(College of Computer and Information Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

[Abstract] In the actual Wireless Sensor Network (WSN), the perimeter forwarding method can easily cause the hole edge nodes' energy consumption to be too fast because of the routing void, resulting in the expansion of the void, and the formation of energy holes. In order to prolong the network lifetime, and avoid energy hole, this paper defines the blind area and the blind node, designs blind area search rules, and proposes a routing algorithm based on blind node search. This paper uses the blind node and blind area information in the network to route, thus avoiding the blind node of the hole edge, and reducing the frequency of using perimeter forwarding. Simulation results show that compared with GPSR and GEAR, this algorithm can effectively prolong the network lifetime, and also improve the performance of packet delivery rate and transmission efficiency.

[Key words] Wireless Sensor Network (WSN); energy hole; network lifetime; blind node; blind area

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.12.017

0 概述

在无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 中,传感器节点需要将收集的数据通过多跳的方式传送至汇聚节点,即 Sink 节点。由于网络中节点分布的随机性和传感器网络的数据传输特性,网络中一些特定区域的节点往往会承担更多的数据传输量,如 Sink 节点附近的节点,因此这些节点更容易更早地耗尽能量而死亡。这些死亡节点附近的其他节点将承担这些死亡节点本应承担的数据中继而加速耗尽能量,很快这片区域将变成没有活跃节点覆

盖的空洞区域,形成“能量空洞”^[1],造成网络失效。文献[2]指出,由于能量空洞现象,当网络失效时,网络中还有高达 90% 的能量未被利用。

在国内外现有的研究工作中,针对多跳传输的无线传感器网络中,避免或缓解 Sink 节点周围形成的能量空洞问题的解决方法有基于非均匀的节点部署控制算法^[1-3]、基于节点可变发射功率的算法^[4-5]、基于能量优化路由的算法^[6-7]、时延受限的移动式数据收集^[8-9]等方向。

在实际的无线传感器网络中,除了在 Sink 周围容易形成能量空洞,由于传感器网络监测区域地形

基金项目: 福建省教育厅科技项目 (JAT160152)。

作者简介: 赵湘宁 (1983—), 女, 实验师、硕士, 主研方向为无线传感器网络。

收稿日期: 2017-06-21 **修回日期:** 2017-07-21 **E-mail:** zxn130@126.com

的复杂性和节点分布的随机不均匀性,网络中存在路由空洞的地方也极易形成能量空洞。

路由空洞^[10]现象是在采用地理信息路由算法的无线传感器网络中常见的现象。地理信息路由算法根据节点的地理位置信息进行路由,是无线传感器网络中重要的一类路由协议^[11-13]。贪婪算法是大多数路由算法的基本转发机制,因为其原理简单而且高效。贪婪算法将数据包转发给距离 Sink 节点最近的一跳邻居节点。然而在实际的传感器网络中,贪婪算法会导致路由空洞,也就是当数据包到达某一节点,该节点所有的邻居节点到 Sink 节点的距离都比自己到 Sink 节点的距离远的时候,数据将无法继续传输。路由空洞产生的原因为网络中存在一定面积没有活跃传感器节点有效覆盖的区域。

当遭遇路由空洞时,节点可以采取边缘转发的方式^[14-16],使数据包沿空洞边缘转发,绕过空洞到达 Sink 节点。经典的采用边缘转发的地理路由算法是 GPSR^[14],GPSR 采用贪婪算法作为基本数据转发方式,当贪婪算法遇到路由空洞时,则转为边缘转发,按右手法则沿空洞边缘转发数据。

但是,GPSR 这类算法由于采用了边缘转发方式,生成的路径紧贴着空洞边缘,极易在空洞周围形成“能量空洞”,使传感器网络的生命周期大幅缩短。文献[17]理论分析了沿空洞边缘转发的路由方式会使空洞边缘的节点承担更多的数据转发量,极易形成能量空洞,从而大幅缩短了网络生命周期。文献[18]通过定义网络连通校准节点来保持网络的连通性,在此基础上寻求网络生命周期最大化的优化贪婪路由。文献[19]提出一种通过周期性地、虚拟地扩大和缩小空洞来达到空洞周围节点负载均衡的目的。

针对具有复杂地形条件且节点随机不均匀分布的传感器网络环境,本文通过设计盲区体系,对盲区和盲点进行定义,提出盲区查找规则,并利用盲点定位和盲区查找规则设计能量空洞避免路由算法。

1 盲区体系

路由空洞现象产生的原因,是当前节点无法用贪婪算法找到比自己离 Sink 节点距离更近的邻居节点。如果能够提前判断在某节点上是否会发生路由空洞,那么就可以在选择路由的时候提前避开这些会产生路由空洞的节点,从而减少边缘转发的次数,继而避免能量空洞的产生。本节将首先对盲区进行定义,并提出盲区查找规则,然后根据盲区与 Sink 节

点的位置关系来定义盲点,最后证明盲点即是需要定位出来的会发生路由空洞的节点。

为了方便描述,首先作如下设定:无线传感器网络中存在 n 个传感器节点,所有节点集合为 S 。每个节点都知道自己及其一跳范围内邻居的地理位置信息。每个节点的通信范围是一个半径为 r 的圆。

定义 1 对于任意节点 $p \in S$,如果存在一个区域 $BA(p)$, p 无法用贪婪算法找到能够到达 $BA(p)$ 区域中任意一点的下一跳,那么区域 $BA(p)$ 就是 p 的盲区。

定义 2 对于当前节点 p ,假设有一条连接 p 和汇聚节点 Sink 的线段 $\overline{pSink}$ 。将 p 作为圆心,顺时针旋转 $\overline{pSink}$,第一个被线段 $\overline{pSink}$ 扫到的 p 的一跳邻居就是 p 的右邻居(如图 1 中的 u 点);逆时针旋转 $\overline{pSink}$,第一个被线段 $\overline{pSink}$ 扫到的 p 的一跳邻居就是 p 的左邻居(如图 1 中的 v 点)。

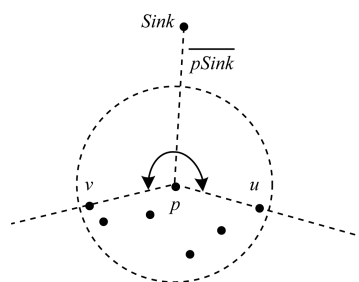


图 1 左邻居与右邻居

盲区查找规则(Blind Area Search Rules, BASR)如图 2 所示。在图 2(a)中,对于任意节点 p ,假设 p 的右邻居是 u , p 的左邻居是 v 。分别作线段 $\overline{pu}$ 和 $\overline{pv}$ 的垂直平分线 l_1 和 l_2 。 l_1 和 l_2 相交于 O 点。 l_1 与 $\overline{pu}$ 的交点是 t_1 , l_2 与 $\overline{pv}$ 的交点是 t_2 。

1) 如果角 $\angle upv \leq 120^\circ$,那么 p 没有盲区,如图 2(b)所示。

2) 如果角 $\angle upv \geq 180^\circ$,那么位于 l_1 、 l_2 之间并且处于 p 的通信范围之外的区域就为 p 的盲区,如图 2(c)所示。

3) 如果角 $120^\circ < \angle upv < 180^\circ$,考察交点 O :

(1) 如果 O 在 p 的通信范围内,那么 p 就没有盲区。

(2) 如果 O 在 p 的通信范围之外,那么三角形 $\triangle t_1 t_2 O$ 落于 p 的通信范围之外的区域即为 p 的盲区,如图 2(a)所示。

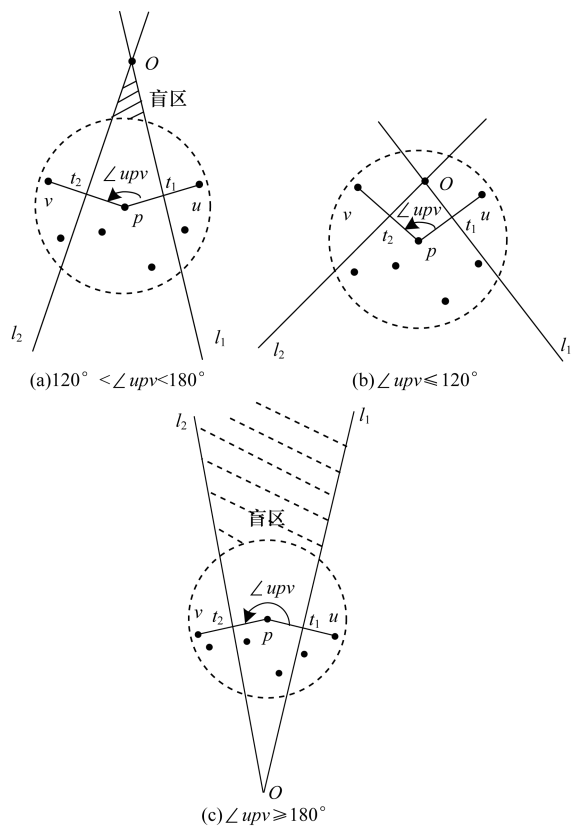


图2 盲区查找规则

定义3 对于任意节点 $p \in S$, 如果汇聚节点 $Sink$ 位于 p 的盲区 $BA(p)$ 中, 那么 p 是一个盲点。

定理1 对于任意节点 $p \in S$, 如果 p 是一个盲点, 那么 p 无法根据贪婪算法找到下一跳。

证明: 对于任意节点 p , 假设 u 是 p 的右邻居, v 是 p 的左邻居。如果 p 是一个盲点, 根据盲点的定义, $Sink$ 节点在 p 的盲区 $BA(p)$ 中, 如图3(a)和图3(b)所示。

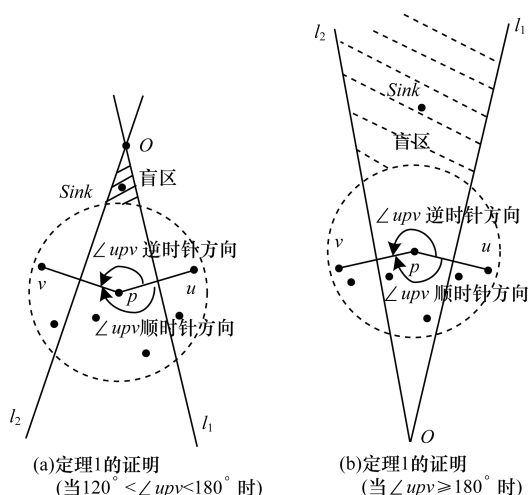


图3 定理1的证明

根据盲区查找规则 BASR, $Sink$ 应当位于 p 的通信范围之外, 并且同时位于线段 pu 和 $p v$ 的垂直平分线 l_1 与 l_2 之间。根据垂直平分线的几何特性,

在此区域内的节点与 u 、 v 的距离必然比与 p 的距离更远。根据左邻居和右邻居的定义, 在 $\angle upv$ 的逆时针方向上, p 没有除 u 、 v 以外的其他邻居节点。并且, 显而易见在 $\angle upv$ 的顺时针方向上, p 的其他邻居节点到 $Sink$ 的距离比 p 到 $Sink$ 的距离更远。因此, p 没有邻居节点到 $Sink$ 的距离比 p 到 $Sink$ 的距离更近, 从而 p 无法用贪婪算法找到下一跳。证毕。

根据定理1可知, 盲点即是需要定位出来的会发生路由空洞的节点。

2 基于盲点查找的路由算法

2.1 算法描述

基于盲区查找规则和盲点的定义, 本节设计一种基于盲点查找的路由算法 (Routing Algorithm Based on Blind Node Search, RABNS), 来避开网络中的盲点。

首先, 根据盲区查找规则 BASR, 每个节点 p 查找其盲区 $BA(p)$ 。如果汇聚节点 $Sink$ 在 $BA(p)$ 中, 则 p 标志自己为盲点。每个节点发送其盲点信息给它的一跳邻居节点。每个节点保持一张一跳邻居的盲点信息表, 记录其邻居是否为盲点。当以贪婪转发的方式将数据包进行转发时, 每个节点将从那些非盲点的邻居中选择下一跳节点。

基于盲点查找的路由算法 RABNS 有2种转发策略: 基于盲点信息的贪婪转发策略 (Greedy+) 和边缘转发策略。RABNS 采用 Greedy+ 作为基本的转发策略。当 Greedy+ 遭遇路由空洞, 即用 Greedy+ 无法找到下一跳节点时, 再转为边缘转发策略。当可以用 Greedy+ 找到下一跳时, 转发策略就再次转变为 Greedy+。

在进行算法描述之前, 首先做如下设定: x 表示当前节点, y 表示上一跳节点, $Nb(x)$ 表示节点 x 的邻居集合。节点 z 与 $Sink$ 之间的距离表示为 $D(z, Sink)$ 。

RABNS 算法描述如下:

1) Greedy+ 策略, 在当前节点 x 的邻居集合 $Nb(x)$ 中查找邻居节点子集 $SNb(x)$ 。对于任意节点 $i \in SNb(x)$ 需同时满足以下条件:

- (1) i 不是盲点。
- (2) i 不是 y 。
- (3) $D(i, Sink) < D(x, Sink)$ 。

判断如果 $SNb(x)$ 不为空集, 选择 $SNb(x)$ 中与 $Sink$ 节点距离最近的节点作为下一跳。如果 $SNb(x)$ 为空集, 将转发策略转变为边缘转发策略。

2) 边缘转发策略, 边缘转发采用和 GPSR 算法一样的右手法则^[14]来转发数据。当当前节点可以用 Greedy+ 策略找到下一跳时, 转发策略就转变为 Greedy+。

2.2 RABNS 路由实例

如图 4 所示, GPSR 路由算法生成的路由非常贴近网络中空洞的边缘, 而 RABNS 路由算法生成的路由可以有效地避开网络中的会产生路由空洞的节点, 路径也不再紧贴网络中空洞的边缘。

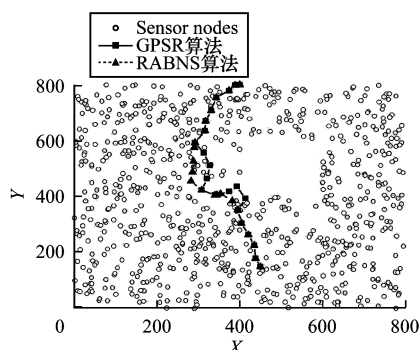


图 4 GPSR 和 RABNS 生成的路由

3 RABNS 算法仿真及性能分析

本节将利用网络仿真软件 NS-2 对 RABNS, GPSR 和 GEAR^[20] 等算法进行仿真, 验证 RABNS 算法性能。本文选取网络生命周期、数据包到达率、传输延迟、算法时间复杂度等 4 个重要指标来衡量算法性能。

仿真设置的网络参数如下: 如图 5 所示, 在一个 $800\text{ m} \times 800\text{ m}$ 的监测区域中, 800 个网络节点随机分布。在网络的中心有一个尺寸约 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的不布置传感器节点的空洞。节点传输距离为 50 m。每个节点每轮发送 16 Byte 数据。根据文献[21], 将节点发送数据的能量消耗设为 100 nJ/bit, 接收数据的能量消耗为 50 nJ/bit。Sink 节点坐标为 (400, 800)。

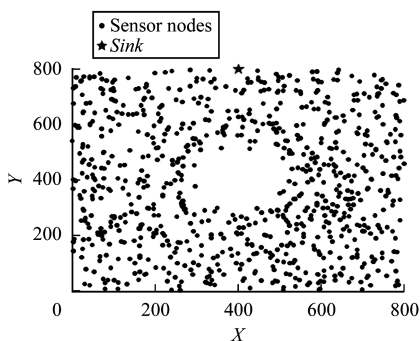


图 5 仿真网络环境

3.1 网络生命周期

网络生命周期定义为当网络中有 5% 节点死亡时的转发轮数。一轮定义为所有节点完成一次数据收集并且全部转发给 Sink 节点的过程, 不论时间花费多少。

图 6 所示的是 GPSR、GEAR 和 RABNS 3 种路由算法的网络生命周期。从图 6 中可以清楚的看出, RABNS 的网络生命周期相比其他 2 种算法有了很明显的改进。RABNS 的网络生命周期相比于 GPSR 和 GEAR 分别增加了约 45% 和 30% 以上。仿真结果表明, RABNS 能够有效地绕过空洞周围的盲点, 减少边缘转发的次数, 从而降低网络中空洞边缘节点的负载, 使网络中的负载更加的均衡并有效地延长了网络生命周期。

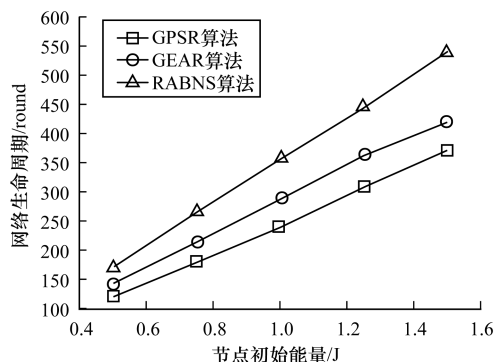


图 6 GPSR、GEAR、RABNS 的网络生命周期

3.2 数据包到达率

数据包到达率是数据包成功传送给 Sink 的数量占有发包数的比例。当网络中的部分传感器节点由于耗尽能量而死亡后, 一些数据包就无法成功地传送给 Sink 节点了, 数据包到达率就会下降。仿真通过数据包到达率来检验 3 种路由算法的容错能力。

图 7 给出当节点的初始是 1.5 J 时, 在不同查询轮数下, GPSR、GEAR 和 RABNS 的数据包到达率。当网络分别执行到第 150 轮查询和第 250 轮查询时, GPSR 和 GEAR 算法就出现了丢包现象。当网络执行到第 550 轮查询的时候, GPSR 和 GEAR 的数据包到达率分别为 94% 和 83%。RABNS 算法在第 300 轮查询时才开始出现丢包, 在第 550 轮查询时, RABNS 的数据包到达率大约为 95%。

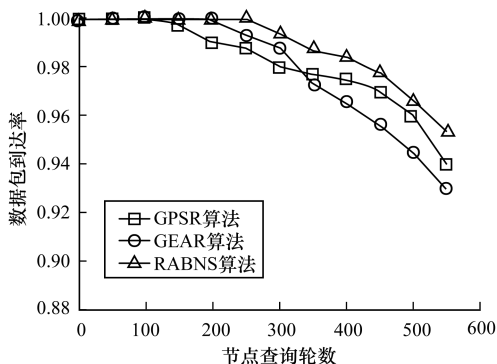


图 7 GPSR、GEAR 和 RABNS 的数据包到达率

3.3 传输延迟

传输延迟是通过测试在不同的查询轮数下,数据包通过 GPSR、GEAR 和 RABNS 3 种算法到达 Sink 节点时的平均路由跳数。传输延迟体现了路由算法的效率。如图 8 所示,RABNS 算法的平均路由跳数始终优于 GPSR 和 GEAR 算法。当网络查询轮数为 100 轮时,RABNS 会比 GPSR 算法的平均路由跳数优化一些,这是因为通过盲点查找以后,RABNS 能够绕开盲点,避免边缘转发,从而减少了路由跳数。随着查询轮数的增加,RABNS 比 GPSR 的平均路由跳数的性能优化更加明显,说明 RABNS 能够更好地控制空洞扩大的现象。

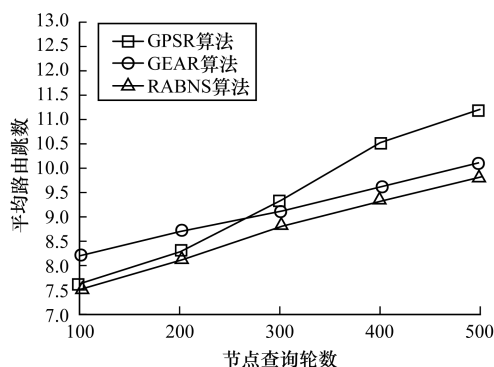


图 8 GPSR、GEAR 和 RABNS 的平均路由跳数

3.4 时间复杂度

RABNS 需要遍历所有的邻居节点或邻居节点的子集,最多需要在 Greedy + 中遍历 2 次和边缘转发中遍历 1 次,因此,RABNS 算法的时间复杂度为 $O(n)$ 。GPSR 和 GEAR 也为 $O(n)$ 。RABNS 与 GPSR、GEAR 算法的时间复杂度相同。

4 结束语

本文通过定义盲区查找和盲点定位的规则,设计一种能量优化路由算法 RABNS。RABNS 通过盲点查找,使节点掌握邻居节点的盲点信息,并在路由选择时避开盲点,从而减少边缘转发的次数,进而避免能量空洞的产生。实验结果证明,RABNS 相比于 GPSR 和 GEAR 算法能够有效地均衡网络中的能量消耗,延长网络生命周期,并且在数据包到达率和传输效率上也有明显优势。

参考文献

- [1] LIU Anfeng, LIU Zhenghua, Nurudeen M, et al. An Elaborate Chronological and Spatial Analysis of Energy Hole for Wireless Sensor Networks [J]. Computer Standards & Interfaces, 2013, 35(1): 132-149.
- [2] LIU Anfeng, JIN Xin, CUI Guohua, et al. Deployment Guidelines for Achieving Maximum Lifetime and Avoiding Energy Holes in Sensor Network [J]. Information Sciences, 2013, 230(4): 197-226.
- [3] 张萃玲,陈志刚,刘安丰,等. 非均匀部署 WSN 的能量空洞避免策略[J]. 计算机工程, 2010, 36(2): 83-86.
- [4] SALEEM F, JAVAID N, MOEEN Y, et al. MEET: Multi-hop Energy Efficient Protocol for Energy Hole Avoidance Using Variable Transmission Range in Wireless Sensor Networks [C]//Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 478-484.
- [5] 赵湘宁. 一种基于长链竞争机制的传感器网络能量空洞研究算法[J]. 计算机科学, 2016, 43(7): 125-130.
- [6] XUE Yu, CHANG Xiangmao, ZHONG Shuiming, et al. An Efficient Energy Hole Alleviating Algorithm for Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2014, 60(3): 347-355.
- [7] BHAGYALAKSHMI L, MURUGAN K. Energy Balancing Zone-based Cluster Head Approach to Avoid Energy Hole Problem in Wireless Sensor Network [J]. International Journal of Information & Communication Technology, 2016, 8(2/3): 263.
- [8] WANG Tian, PENG Zhen, CHEN Yonghong, et al. Continuous Tracking for Mobile Targets with Mobility Nodes in WSNs [C]//Proceedings of International Conference on Smart Computing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 261-268.
- [9] 王文华,王田,吴群,等. 传感网中时延受限的移动式数据收集方法综述[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(3): 474-492.
- [10] CHEN Dazhi, VARSHNEY P K. A Survey of Void Handling Techniques for Geographic Routing in Wireless Networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2007, 9(1): 50-67.
- [11] CADGER F, CURRAN K, SANTOS J, et al. A Survey of Geographical Routing in Wireless Ad-hoc Networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(2): 621-653.
- [12] POPESCU A M, SALMAN N, KEMP A H. Energy Efficient Geographic Routing Robust Against Location Errors [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(6): 1944-1951.
- [13] 王建新,赵湘宁,刘辉宇. 一种基于两跳邻居信息的贪婪地理路由算法[J]. 电子学报, 2008, 36(10): 1903-1909.
- [14] KARP B, KUNG H T. GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks [C]//Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Computing and Networking. New York, USA: ACM Press, 2000: 243-254.
- [15] FUJINO T, NISHIJIMA H. A Method for Reducing Perimeter Transitions in Beacon-Less Geographic Routing for Wireless Sensor Networks [J]. IEICE Transactions on Communications, 2012, 95(1): 283-288.
- [16] FREY H, STOJIMENOVIC I. On Delivery Guarantees and Worst-case Forwarding Bounds of Elementary Face Routing Components in Ad Hoc and Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Computers, 2010, 59(9): 1224-1238.
- [17] 赵湘宁. 一种基于信号机制的能量感知地理路由算法[J]. 电子学报, 2015, 43(5): 788-796.

5 结束语

本文从提高编队飞行器低截获性能的角度出发,提出一种基于混沌粒子群优化的低截获编队通信方法。该方法以飞行器辐射功率和拓扑链路作为优化对象,以最小化消耗能量函数、最小化截获概率函数和最大化拓扑信息熵函数作为目标,利用混合混沌粒子群优化算法对飞行器编队模型进行迭代优化。仿真结果表明,该算法在满足可靠通信的前提下,可有效地降低飞行器节点辐射功率,并使通信拓扑的不确定性最大化,从而保证飞行器编队具有较好的低截获性能,提高编队的生存能力。

参考文献

- [1] JR D L. 射频隐身导论[M]. 沈玉芳,译. 西安:西北工业大学出版社,2009.
- [2] WANG Wenqin. Feature Article: Potential Transmit Beamforming Schemes for Active LPI Radars[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2017, 32(5):46-52.
- [3] SHANG Changhai, WANG Zhenghua. A Metric Valuation of the Power Management for LPI Radar[C]//Proceedings of International Conference on Radar. Shanghai, China; [s. n.], 2016:1-3.
- [4] OHAD B, VLADIMIR V N. Adaptive Optimization of a Free Space Laser Communication System Under Dynamic Link Attenuation[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2011, 3(3):215-222.
- [5] 朱江,巴少为,杜清敏. 认知无线网络中一种非合作博弈功率控制算法[J]. 电讯技术, 2016, 56(12):1301-1309.
- [6] VINCENT L N, BART S. DADS with Short Spreading Sequences for High Data Rate Communications or Improved BER Performance[C]//Proceedings of Military Communications and Information Systems Conference. Paris, France; IEEE Press, 2013:1-8.
- [7] BART S, VINCENT L N. Pseudo-random Binary Sequence Selection for Delay and Add Direct Sequence Spread Spectrum Modulation Scheme[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(11):1002-1004.
- [8] AMIR I S, ARKADIY V K, IRINA R L, et al. Analysis and Simulation of Channel Nonreciprocity in Meteor-burst Communications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(4):2009-2019.
- [9] AMIR I S, ARKADIY V K. Secure Key Distribution Based on Meteor Burst Communications[C]//Proceedings of International Conference on Security and Cryptography. Vienna, Austria; IEEE Press, 2014:1-6.
- [10] 杨宇晓,周建江,陈军,等. 基于最大条件熵的射频隐身数据链猝发通信模型[J]. 航空学报, 2014, 35(5):1385-1393.
- [11] 洪涛,宋茂忠,刘渝. 切换天线发射的低截获率通信信号物理层安全传输[J]. 应用科学学报, 2011, 29(4):368-373.
- [12] ZHENG Y R, LI L F. Performance Metrics for Low Probability of Detection in Cooperative Communication Networks[C]//Proceedings of OCEANS'16. Shanghai, China; [s. n.], 2016:1-5.
- [13] JI W J, YOUNG S K. Low Probability of Intercept Property of Binary Sidel'nikov Sequences[C]//Proceedings of International Conference on Information and Communication Technology Convergence. Seoul, South Korea; IEEE Press, 2015:733-735.
- [14] FANCEY C, ALABASTER C M. The Metrication of Low Probability of Intercept Waveforms[C]//Proceedings of IEEE WDD'10. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2010:58-62.
- [15] YIRONG S, CHANG Zengping. Evaluation and Simulation of LPI Radar Signals' Low Probability of Exploitation[C]//Proceedings of International Conference on Image, Vision and Computing. Shanghai, China; [s. n.], 2017:842-846.
- [16] SHANNON C E. A Mathematical Theory of Communication II[J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(4):623-656.
- [17] JAYNES E T. Information Theory and Statistical Mechanics[J]. The Physical Review, 1957, 106(4):620.
- [18] WANG Hongfei, LIU Yongwei. Hybrid Teaching-learning-based PSO for Trajectory Optimisation[J]. Electronics Letters, 2017, 53(12):777-779.
- [19] DONG Wenyong, ZHANG Mengchu. A Supervised Learning and Control Method to Improve Particle Swarm Optimization Algorithms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Systems, 2017, 47(7):1135-1148.
- [20] MENG H J, ZHENG P, Wu R Y, et al. A Hybrid Particle Swarm Algorithm with Embedded Chaotic Search[J]//Proceedings of 2004 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems. Singapore; IEEE Press, 2004:1-6.

编辑 索书志

(上接第92页)

- [18] KOUAKOU A J M, OKADA K. A Novel Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks: Greedy Routing for Maximum Lifetime[J]. IEICE Transactions on Communications, 2012, 95(12):3802-3810.
- [19] LI Fan, GAO Jinnan, WANG Yu. Distributed Load Balancing Mechanism for Detouring Schemes of Geographic Routing in Wireless Sensor Networks[J]. International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems, 2013, 28(2):184-197.
- [20] YU Yan, GOVINDAN R, ESTRIN D. Geographical and Energy Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 20(1):48.
- [21] ZHAO Cheng, PERILLO M, HEINZELMAN W B. General Network Lifetime and Cost Models for Evaluating Sensor Network Deployment Strategies[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(4):484-497.

编辑 刘冰