

现代优化技术在无线传感器网络中的应用

何受倩

(广东科贸职业学院信息工程系 广州 510640)

摘要 无线传感器网络是由大量廉价、微小的传感器节点构成的,用于实时监测环境的无线自组织网络。由于无线传感器网络具有规模庞大、节点的计算和存储资源受限、网络拓扑动态不确定等特性,设计高性能的无线传感器网络常常会涉及传统的技术难以建模和求解的复杂优化问题。现代优化技术是一类新兴的具有较强全局搜索能力的启发式优化算法,是解决无线传感器网络中的复杂优化问题的有力工具。作者在研究现代优化技术在无线传感器网络中的主要应用领域,包括传感器节点的定位、网络节点的部署优化、网络覆盖优化、网络路由优化和数据融合问题的基础上,分析了现代优化技术在求解无线传感器网络中的复杂优化问题上的优缺点,并对该领域未来的发展趋势进行了展望。

关键词 无线传感器,部署优化,覆盖优化,路由优化,数据融合

中图法分类号 TP393 文献标识码 A

Application of Modern Optimization Techniques in Wireless Sensor Networks

HE Shou-qian

(Department of Information Engineering, Guangdong Vocational College of Science and Trade, Guangzhou 510640, China)

Abstract The wireless sensor network is a wireless self-organizing network which is composed by a large number of cheap and tiny sensor nodes, for real-time monitoring of the environment. Due to the limitation of wireless sensor networks, such as the scale, the characteristics of the nodes of the computing and storage resource-constrained network topology dynamic uncertainty, the design of high-performance wireless sensor networks often involves difficulties in traditional techniques modeling and solving complex optimization problems. A modern optimization technique is an emerging powerful tool solving complex optimization problems in wireless sensor networks. It is a heuristic optimization algorithm containing strong global search capability. The main study area of the author is the application of modern optimization techniques in wireless sensor networks, which is the positioning of sensor nodes, the optimization of deployment of network nodes, the optimization of network coverage, network routing optimization and data integration. Base on the analysis of modern optimization techniques, the author concludes the advantages and disadvantages of solution of modern optimization techniques about complex optimization problems in wireless sensor networks, and also foresees the development trend of its future prospects.

Keywords Wireless sensors, Deployment optimization, Coverage optimization, Route optimization, Data fusion

1 引言

无线传感器网络是由大量廉价、微小的传感器节点构成的,用于实时监测、感知和采集物理世界各种信息(如温度、湿度、气体浓度等)的无线自组织网络[1]。如图 1 所示,传感器节点检测的数据沿着规划好的路径逐跳传输,经过多跳后汇集到数据收集节点,最后通过互联网或卫星传输到数据处理中心。终端用户通过数据处理中心对数据进行分析处理和发布反馈信息。无线传感器网络将信息世界和客观的物理世界融合在一起,改变了人类与物理世界的信息交互方式,从而极大地扩展了人类认识世界和改变世界的的能力。近年来,随着计算机科学、微电子技术和无线通信技术的快速发展和日益成熟,低成本、低功耗和多功能的微型传感器的批量生产成为可能,无线传感器网络的应用领域也从最初的军事国防领域

扩展到环境监控、空间探测、交通管理、医疗工商服务等众多领域[2]。无线传感器网络已经被誉为 21 世纪对人类生活方式有重大影响的十大技术之一。

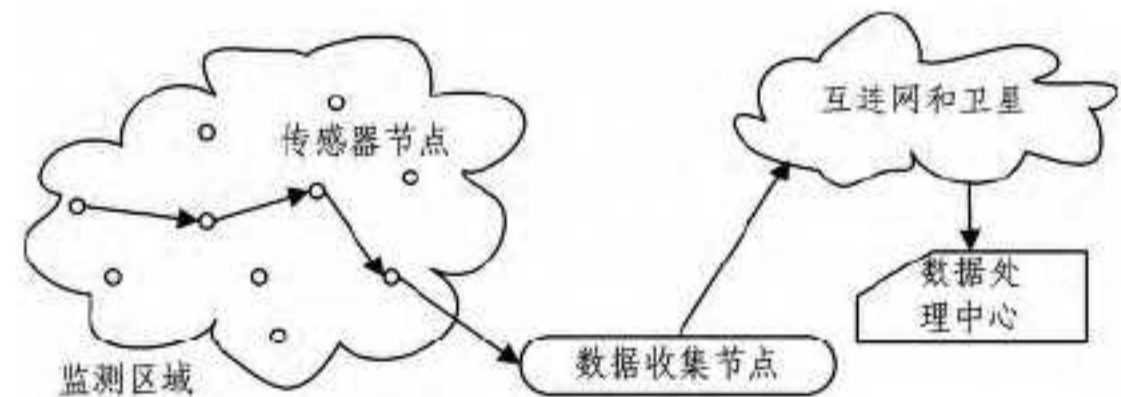


图 1 无线传感器网络的体系结构

无线传感器网络具有节点规模庞大、节点计算和存储资源受限、网络拓扑动态变化频繁等特性。因此,传统的无线网络技术无法适用于无线传感器网络。作为一门新兴的 IT 技术,无线传感器网络在实际的应用过程中常常会遇到新的挑

何受倩(1979—),女,硕士,讲师,主要研究方向为信息科学、计算机技术, E-mail: heshouqian@126.com。

战性难题,如节点定位问题^[3]、节点部署优化问题^[5]、网络覆盖优化问题^[21,22]、网络路由优化问题^[4]和数据融合问题^[16]等复杂优化问题。这些优化问题通常具有 NP-难、问题规模庞大、含有噪音和动态不确定因素等特性,使得传统的技术难以建模和求解。

现代优化技术成为解决上述困境的有效手段。现代优化技术是一类新兴的基于概率搜索的启发式算法。典型的现代优化算法有遗传算法(Genetic Algorithm, GA)^[6]、粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)^[9]、蚁群优化(Ant Colony Optimization, ACO)^[7]、差分进化算法(Differential Evolution, DE)^[8]和分布估计算法(Estimation of Distribution Algorithm, EDA)^[29]等。现代优化算法的思想都起源于自然界的生物进化和社会自组织行为,如 GA 起源于“优胜劣汰”的生物进化原理,PSO 起源于飞鸟的觅食行为和群体认知行为,而 ACO 则起源于蚂蚁的群体觅食行为。一般来说,现代优化算法求解优化问题具有如下几个优点:(1)算法的结构简单,易于使用,不需要专业的领域知识;(2)不要求待解决问题具有可微、可导等特性,具有广泛的通用性;(3)算法具有较强的全局搜索能力,适合求解 NP-难的复杂优化问题;(4)算法基于种群,可以同时提供多个候选解。现代优化算法的上述特性使之成为解决无线传感器网络中的复杂优化问题的有效方法。

本文将综述和探讨现代优化算法在无线传感器网络中 5 个主要领域的应用现状,包括传感器节点的定位问题、网络节点的部署优化问题、网络覆盖优化问题、网络路由优化问题和数据融合问题。同时,本文根据当前的应用现状分析了现代优化算法在求解无线传感器网络应用的优点和缺点,探讨了该研究领域的未来发展趋势。

2 现代优化技术在 WSN 定位优化的应用

定位是无线传感器网络许多应用的基础环节。最简单的定位方法是单独给每个传感器配置一个 GPS 定位部件。然而由于无线传感器网络的传感器节点数量非常庞大,上述方法需要太高的造价。因此,目前常用的定位方法是根据少数节点的位置信息以及节点之间的距离信息等估计网络中所有节点位置。如图 2 所示,设 $D(x, y)$ 为待定位节点。若它与周围不共线的 3 个已知点 $A(x_1, y_1)$ 、 $B(x_2, y_2)$ 、 $C(x_3, y_3)$ 的距离分别为 d_1 、 d_2 、 d_3 。则可以通过式(1)精确求解 D 的坐标:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_3) & 2(y_1 - y_3) \\ 2(x_2 - x_3) & 2(y_2 - y_3) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_1^2 - x_3^2 + y_1^2 - y_3^2 + d_3^2 - d_1^2 \\ x_2^2 - x_3^2 + y_2^2 - y_3^2 + d_2^2 - d_1^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

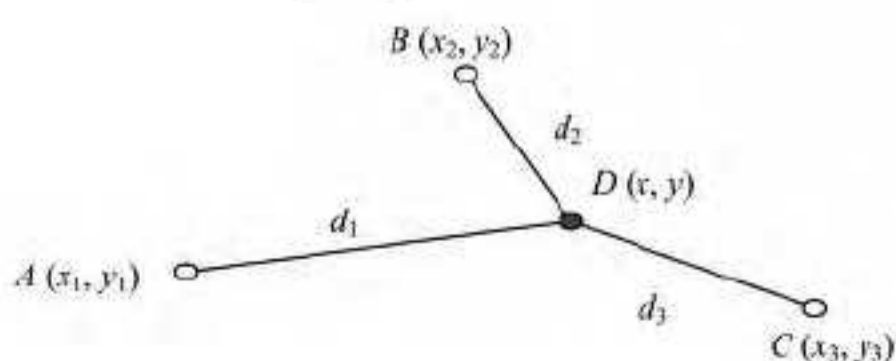


图 2 无线传感器网络的节点定位示意图

目前,传统的确定性定位方法主要包括基于测距的定位技术(如三边测量法、三角测量法和极大似然估计法^[1]等)和

测距无关的定位技术(如质心法^[10]和 DV-Hop 法)。随着无线传感器网络应用环境的多样化和复杂化,客观存在的测量误差以及大量的限制条件使得传统定位技术面临越来越大的挑战,许多学者尝试借助现代优化算法来求解复杂的定位问题。如, Yun 等人^[13]提出了分别基于遗传算法和神经网络方法的定位方案,并通过仿真实验与传统的定位算法对比,结果证明了两种方案的有效性。Niewiadomska 等人^[12]分析了半定规划、模拟退火和随机优化法求解无线传感器定位问题的特性,并做了实验比较。Gopakumar 等人^[14]提出了基于禁忌搜索(Tabu Search, TS)和 PSO 的分布式定位技术。仿真结果表明,TS 和 PSO 比传统的定位算法具有更高的定位精度。Low 等人则提出一种粒子群算法来求解网络连通性弱的稀疏无线传感器网络的定位问题,取得了很好的仿真结果。随着现代优化算法的快速发展,采用改进的现代优化算法来进一步提高无线传感器网络定位精度和速度仍是一个有重要意义的研究课题。

3 现代优化技术在 WSN 部署优化的应用

节点部署是一个设计无线传感器网络的重要环节,因为它影响到网络的建造成本、网络的可靠性和监测性能。图 3 所示为在一个城市中部署传感器监控交通情况的示意图。它要求将最少数量的传感器部署在交通道路上,实现对整个监控区域的覆盖,同时保证传感器和数据处理中心之间的连通性。这是一个典型的无线传感器网络部署优化问题。由于该问题是 NP-难的复杂优化问题而且问题规模较大,传统的搜索算法无法求解。Hu 等人提出一种粒子群算法来求解该问题取得了良好的效果^[30]。在实际的应用中,无线传感器网络的部署往往会涉及多个目标的优化,如成本、寿命和安全性等。由于现代优化算法是基于种群的算法,可以同时保持多个候选解,因此,现代优化算法非常适合于求解多目标的无线传感器网络的部署问题。如 Zhong 等人将网络的寿命和建造成本作为优化目标,采用改进的进化算法优化无线传感器网络的中继节点部署问题^[24]。Oh 等人^[23]则对网络中包含不同类型传感器节点的部署策略进行研究,提出了一种基于遗传算法的多目标优化技术来优化传感器节点的类型以及部署位置。文献^[26]则对采用多目标进化算法优化无线传感器网络的节点部署的工作进行了综述。此外,无线传感器网络的移动部署也成为当今的一个研究热点。如匡林爱与蔡自兴^[25]对无线传感器网络的移动部署进行了研究,提出一种基于 GA 的移动部署算法,其目标是最大化网络的覆盖率同时最小化节点的移动距离。

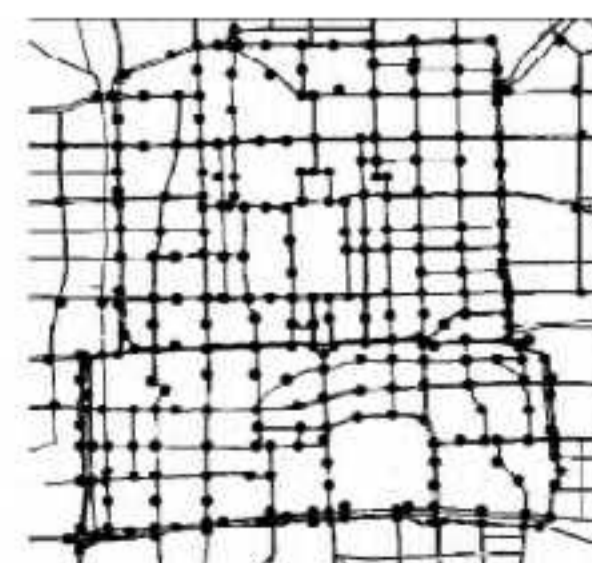


图 3 城市交通监控中的无线传感器网络节点部署示意图

无线传感器网络的部署问题对算法的实时性要求不高,而且涉及多个优化目标。因此,借助机器学习技术和数学方法设计具有较强全局搜索能力的多目标进化算法来求解无线传感器网络的部署问题,是一个具有重要现实意义的研究课题。

4 现代优化技术在 WSN 覆盖优化的应用

无线传感器网络的应用环境通常比较恶劣,如深海、高危和高温地带等。因此,我们常常采用飞机撒播的方式在检测区域中随机部署大量的传感器节点。由于撒播的随机性,网络中会存在大量冗余的传感器节点。如何充分利用冗余节点实现网络全覆盖和寿命最大化是当前无线传感器网络研究领域的热点课题。典型的方法是将所有传感器节点划分成多个子集轮流工作。图 4 所示为一个具有 5 个传感器和 3 个监测目标的网络。如果 5 个传感器同时工作,则网络的寿命为 1。如果将这 5 个传感器分成图 4 所示的 4 个集合,并让每个集合工作特定时间,网络寿命可以延长到 3.5。由此可见,通过对传感器节点的覆盖优化可以大大延长网络的寿命。由于节点覆盖划分优化是 NP-难的复杂优化问题,现代优化技术成为有效的求解方法。如, Lai 等人^[19]提出一种基于遗传算法的技术并将其用于优化节点覆盖问题,仿真结果显示该遗传算法可以有效找到问题近似最优解。Hu 等人^[20]进一步提出了基于遗传算法的混合技术,其在优化无线传感器网络的覆盖优化问题时显示出更好的求解性能。Lin 等人^[21]则对同时包含不同网络节点的异构网络的覆盖优化展开研究,提出基于蚁群算法的求解方案。Zhong 等人^[22]则提出基于蚁群算法的覆盖优化技术。其核心思想是首先激活一个可以完成覆盖的传感器集合,并使其它传感器处于睡眠状态。当网络中一个传感器耗尽能量后,立刻从其邻域激活相应的后备传感器,以保证网络的全覆盖。仿真结果显示,该算法可以有效提高无线传感器网络的总寿命。

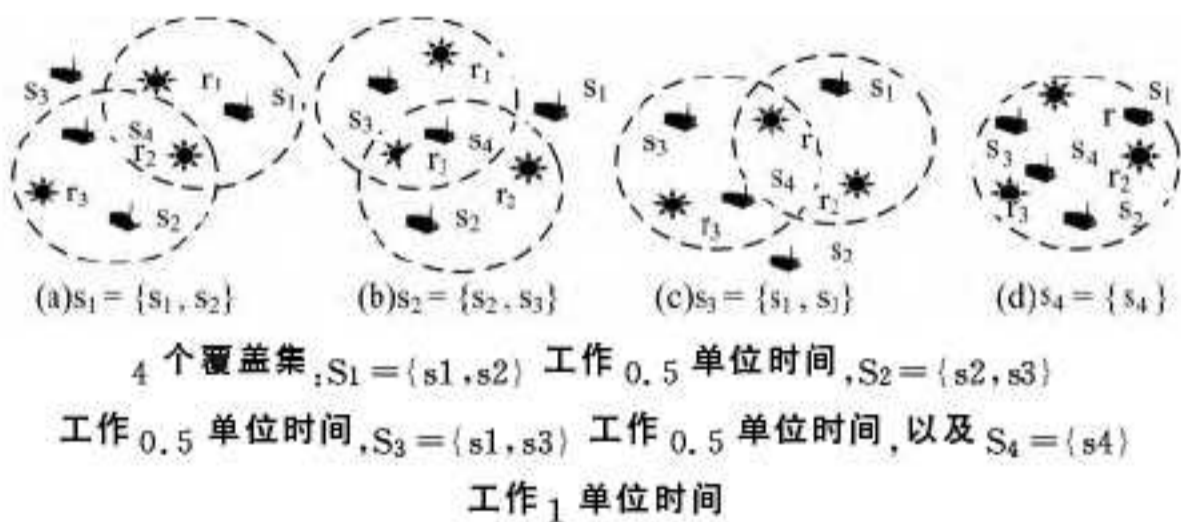


图 4 无线传感器网络的分层覆盖示意图

此外,网络的覆盖范围、网络的寿命以及网络的可靠性是重要但互相冲突的因素。因此,设计高效的多目标进化算法同时优化多个互相冲突的目标,给决策者提供高质量的候选解,将是无线传感器网络覆盖优化的未来发展趋势之一。

5 现代优化技术在 WSN 路由优化的应用

无线传感器网络的数据通信需要消耗大量的能量。因此,优化无线传感器网络的路由策略是提高无线传感器网络工作寿命的有效手段。目前常用的无线传感器网络路由技术是基于分层的路由策略,如图 5 所示。其核心思想是将网络

中的传感器节点划分为多个簇,并给每个簇指派一个收集簇内传感器数据的类头(Cluster-header)。类头最终将收集到的数据传输到数据处理中心(Base station)。如何划分簇以及如何指派类头是一个复杂的 NP-难优化问题。Heinzelman 等人^[32]提出了一种基于模拟退火策略的技术来搜索最优的聚类策略和类头。Latiff 等人^[31]则采用粒子群优化算法来求解该问题。Guru 等人^[17]进一步考察了多个改进的粒子群优化算法对该问题的求解性能。此外, Hu 等人提出一种直接构建从传感器节点到数据处理中心的路由树^[29]的方法,他们作者充分利用网络中有大量冗余节点的特性,采用蚁群算法搜索出近似最优的路由树集合,以达到延长网络寿命的目的。此外, Xue 等人^[18]则同时考虑网络的能耗以及延迟,提出一种基于多目标差分算法的路由优化策略,为网络设计的决策者提供多种可选的路由方案。

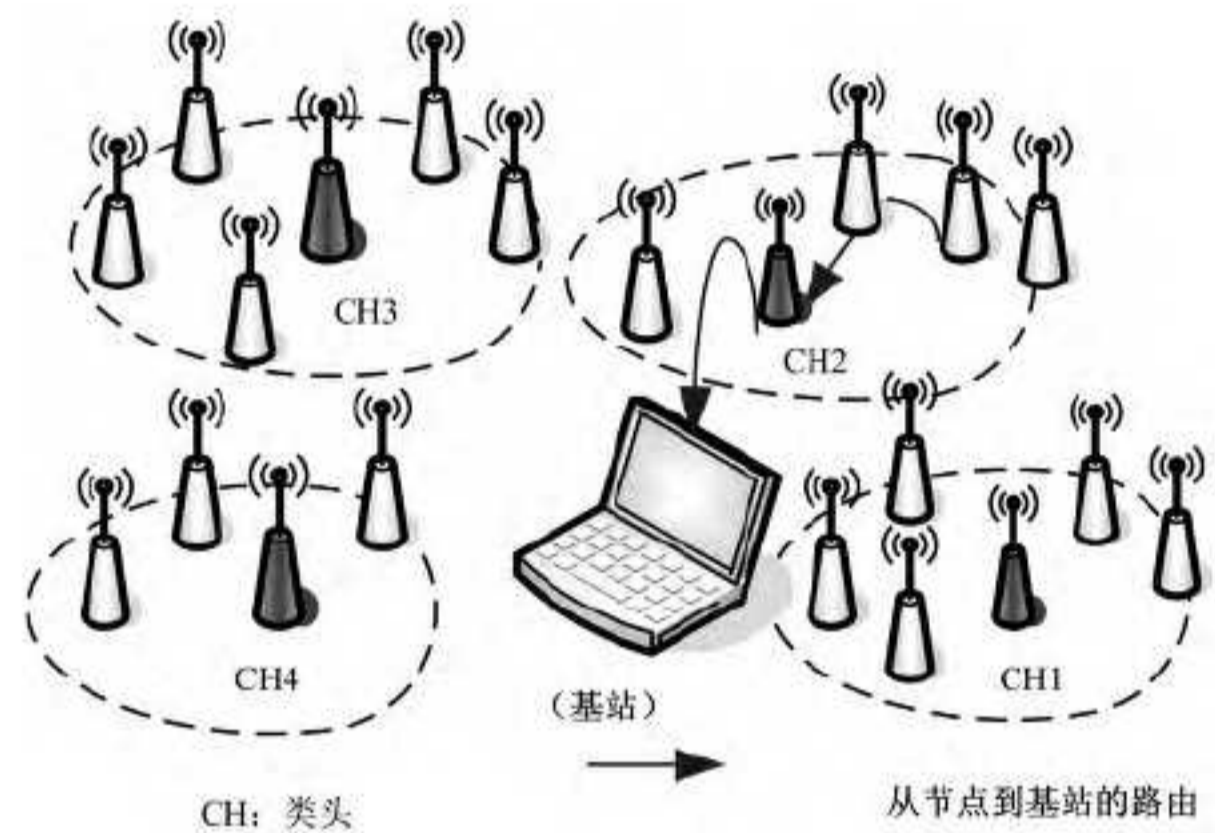


图 5 无线传感器网络的路由优化示意图

无线传感器网络的路由优化问题通过建模通常可以转化为典型的组合优化问题。现代优化算法如 GA 和 ACO 在求解大量的组合优化问题中表现出非常优秀的性能。因此,借鉴成功的应用经验,将现代优化算法应用于求解无线传感器网络的路由优化问题是一个值得研究的课题。

6 现代优化技术在 WSN 数据融合的应用

大规模的无线传感器网络会导致大量的数据传输,从而缩短网络的寿命。数据融合技术是通过分析和合并来自不同传感器的数据,来减少数据流量,增强感应信息的可靠性和准确性的过程。无线传感器网络的一个主要应用是检测事件的发生。其过程通常首先由传感器将感应到的带有噪音的信息传送到数据融合节点,然后由数据融合节点分析和融合收集到的数据,并传送给后续的节点。信息融合技术提高了网络的寿命,但同时也可能会降低网络的性能。如图 6 所示为一个典型的数据融合应用场景,其中传感器根据感应信息和自身阈值做 0,1 决策,并将决策输出到邻节点,最终传送到基站。优化传感器节点自身的阈值以及传送的路径可以减少网络的能耗,同时提高网络的监测准确性。Veeramachaneni 等人^[15]提出了一种混合 ACO 和 PSO(ABC-PSO)的技术。其中,ACO 用于寻找最佳的传输路径,而 PSO 则用于优化各个节点的阈值。此外, Wimalajeewa 等人^[16]采用 PSO 对网络的能量分配进行优化,从而使数据融合错误的概率减少到一定

的阈值,同时最小化网络能量的消耗。

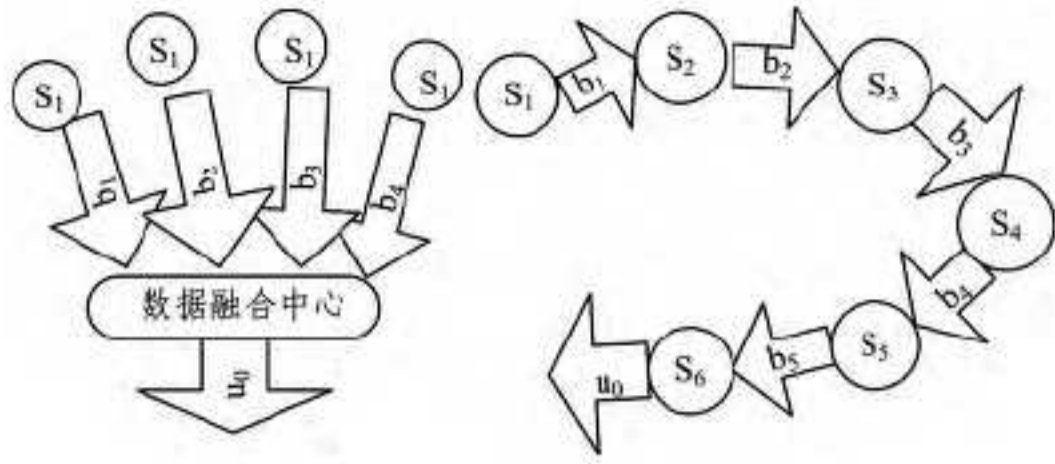


图6 无线传感器网络的数据融合示意图

结束语 无线传感器网络改变了人类与物理世界的信息交互方式,是对人类生活方式有重大影响的新兴 IT 技术。无线传感器网络由于具有规模庞大,节点的计算资源受限,网络拓扑动态不确定等特性,在实际的应用中常常遇到复杂的优化问题,比如节点定位问题和部署优化问题等等。这些复杂的优化问题通常难以用传统的技术进行建模和求解。作为一门新兴的启发式搜索算法,现代优化算法成为解决无线传感器网络中众多复杂优化问题的有效手段。本文综述了现代优化技术在无线传感器网络 5 个重要领域的应用现状,包括节点定位问题、部署优化问题、覆盖优化问题、路由优化问题和数据融合问题。

随着现代优化技术和无线传感器网络技术的快速发展,现代优化技术在无线传感器网络的应用将更加广泛和深入。从目前的发展情况来看,未来这个领域的研究趋势如下:

- 1) 结合机器学习技术和数学方法等技术,改进现有的现代优化算法在求解无线传感器网络中复杂优化问题的求解质量和效率。
- 2) 基于现代优化算法,设计更加高效的和跨层优化算法,从而进一步提高无线传感器网络的性能。
- 3) 采用并行分布式计算技术提高现有的现代优化算法的实时响应能力,推动现代优化算法在无线传感器网络中的实际应用。

参 考 文 献

[1] 宋文. 无线传感器网络技术与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007

[2] Puccinelli D, Haenggi M. Wireless sensor networks: applications and challenges of ubiquitous sensing[J]. IEEE Circuits and Systems Magazine, 2005, 5(3): 19-31

[3] 王福豹, 史龙, 任丰原. 无线传感器网络中的自身定位系统和算法[J]. 软件学报, 2005, 16(15)

[4] Chang J H, Tassiulas L. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(4): 609-619

[5] Hou Y T, Shi Y, Sherali H D, et al. On energy provisioning and relay node placement for wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(5): 2579-2590

[6] Michalewicz Z. Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs[M]. New York: Springer-Verlag, 1994

[7] Dorigo M, Stutzle T. Ant Colony Optimization[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 2004

[8] Storn R M, Price K V. Differential evolution-A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. J. Global Optimization, 1997, 11: 341-359

[9] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [C] // Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks, 1995: 1942-1948

[10] Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. Density Adaptive Algorithms for Beacon Placement in Wireless Sensor Networks [C] // IEEE ICDCS 2001. April 2001

[11] Niculescu D, Nath B. DV Based Positioning in Ad hoc Networks [J]. Kluwer Journal of Telecommunication Systems, 2003

[12] Niewiadomska-Szynkiewicz E, Marks M. Optimization schemes for wireless network localization [J]. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2009, 19(2): 291-302

[13] Yun S, Lee J, Chung W, et al. A soft computing approach to localization in wireless sensor networks [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(4): 7552-7561

[14] Gopakumar A, Jacob L. Performance of some metaheuristic algorithms for localization in wireless sensor networks [J]. International Journal of Network Management, 2009, 19(5): 355-373

[15] Veeramachaneni K, Osadciw L A. Swarm intelligence based optimization and control of decentralized serial sensor networks [C] // Proceedings of the IEEE Swarm Intelligence Symposium, 2008: 1-8

[16] Wimalajeewa T, Jayaweera S K. Optimal power scheduling for correlated data fusion in wireless sensor networks via constrained PSO [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2008, 7(9): 3608-3618

[17] Guru S, Halgamuge S, Fernando S. Particle swarm optimizers for cluster formation in wireless sensor networks [C] // Halgamuge S K, ed. Proceedings of the International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), 2005: 319-324

[18] Feng Xue, Sanderson A, Graves R. Multi-Objective Routing in Wireless Sensor Networks with a Differential Evolution Algorithm [C] // IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 2006 (ICNSC' 06). 2006: 880-885

[19] Lai C-C, Ting C-K, Ko R-S. An effective genetic algorithm to improve wireless sensor network lifetime for large-scale surveillance applications [C] // Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'07). 2007: 3531-3538

[20] Hu Xiao-min, et al. Hybrid Genetic Algorithm Using a Forward Encoding Scheme for Lifetime Maximization of Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2010, 14(5): 766-781

[21] Lin Y, Zhang J, et al. An Ant Colony Optimization Approach for Maximizing the Lifetime of Heterogeneous Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, (99): 1-13

[22] Zhong J H, Zhang J. Energy-efficient local wake-up scheduling in wireless sensor networks [C] // IEEE Congress on Evolutionary Computation 2011. June 2011: 2280-2284

[23] Oh Shao-chong, et al. Multiobjective optimization of sensor network deployment by a genetic algorithm [C]// IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2007) . Sept. 2007; 3917-3921

[24] Zhong Jing-hui, Zhang Jun. A multi-objective memetic algorithm for relay node placement in wireless sensor network[C]// Proceedings of the 13th annual conference companion on Genetic and evolutionary computation (GECCO 2011). July 2011; 150-169

[25] 匡林爱, 蔡自兴. 基于遗传算法的无线传感器网络重新部署方法[J]. 控制与决策, 2010, 25(9): 1329-1332

[26] Marks M. A Survey of Multi-Objective Deployment in Wireless Sensor Networks[M]. Journal of telecommunications and information technology, 2010

[27] Lloyd L E, Xue G. Relay Node Placement in Wireless Sensor Networks [J] . IEEE Transactions on Computers, 2007, 56(1): 134-138

[28] Hu Xiao-min, Zhang Jun. Ant Routing Optimization Algorithm

for Extending the Lifetime of Wireless Sensor Networks[C]// Proc. IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics. Istanbul, Turkey, Oct. , 2010; 738-744

[29] Larrañaga P, Lozano J A. Estimation of Distribution Algorithms: A new Tool for Evolutionary Computation[M]. Kluwer Academic Publishers, 2002

[30] Hu J, Song J, Zhang M, et al. Topology optimization for urban traffic sensor network[J]. Tsinghua Science & Technology, Apr 2008, 13(2): 229-236

[31] Latiff N M A, Tsimenidis C C, Sharif B S. Energy-aware clustering for wireless sensor networks using particle swarm optimization[C]// Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). 2007: 1-5

[32] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]// Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. 2000(2)

(上接第 325 页)

例 2 FSK Tone 检测

在对海事通讯中无线接收的键控频移音(FSK Tone)检测时,由于背景噪声的干扰,传统的基于跟踪 FFT 频谱主峰是否高于一个预定值^[6]的方法有时会失效。而且阈值的选取对于算法的影响如图 2 所示,PAR 提高导致 FAR 同时升高。

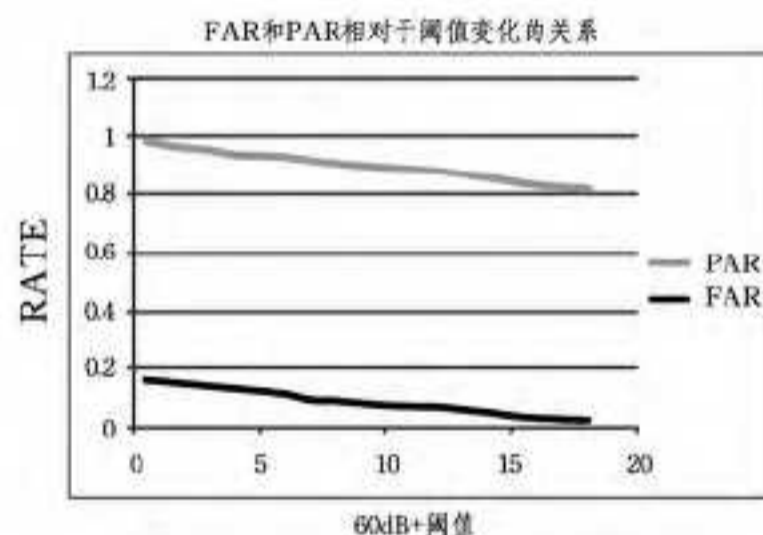


图 2 FSK Tone 检测阈值选取对 PAR 和 FAR 的影响

增加一个前处理方案:

- (1) 在 FFT 域中提取功率谱的包络线;
- (2) 基于包络线计算除最高点以外所有峰的平均值和根方差;
- (3) 如果最高点处的峰值与平均值的差值大于根方差的一半,那么进入传统的阈值方法流程。

在本例中 A' 筛选出满足特殊结构的信号帧进入传统阈值判断流程,比仅仅使用传统阈值方法 A 显然具有更强的信号推断的充分性,因此有

$$p(E|A) < p(E|A')$$

从而导致在 FAR 尽量小的条件下得到较高的 PAR。实验时创建了一个由无线设备接收超过 300 个小时的 FSK 音的数据库,并且基于接收机各调整参数和不同的天气情况,该数据库表现了非常不同的信号噪声比,以便保证在尽可能严苛的情形下进行算法验证。表 2 列出了实验结果。

表 2 FSK Tone 检测叠加前处理的性能比较

	检测率	虚警率
主峰阈值(A)	90.5%	2.3%
主峰阈值(A')	98.0%	0.1%

结束语 本文通过检测率 PAR 和虚警比 FAR 之间的定量关系,列出了它们之间隐藏的间接矛盾。还讨论了一个在 FAR 尽量小的条件下满足较高的 PAR 的策略,并且在心电图 QRS 检测和 FSK Tone 检测中得到了验证。顺便指出,本文的分析框架是建立在算法设计的迭代式开发模式之下的,即考虑的出发点是基于现有版本如何叠加独立的新处理模块来提升算法的精度和可靠性。

参考文献

[1] Amirmehrabi, Hamid, Viswanathan. A New Distributed Constant False Alarm Rate Detector[OL]. <http://opensiuc.lib.siu.edu/ece-articles/37>, 1997

[2] Esfahani S N, Mahdi S. Statistical Models For Constant False Alarm Rate Threshold Estimation in Sound Source Detection System, University of Kentucky Master's Theses [OL]. <http://uknowledge.uky.edu/gradschool-theses/46>, 2010

[3] Jorge A, Basilio M, Torres G A, et al. Detection of Pornographic Digital Images [J]. International Journal of Computers, 2011, 5(2): 298-305

[4] Chesnokov Y C, Nurekh D. Individually Adaptable Automatic QT Detector [J]. Computers in Cardiology, 2006, 33: 337-340

[5] Goldberger A L, Lan A. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet; Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals [J]. Circulation, 2000, 101(23): 215-220

[6] Chan Y-T, Q Ma. Evaluation of various FFT Methods for Single Tone Detection and Frequency Estimation; Engineering Innovation, Voyage of Discovery[C]// IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 1997. St. Johns, Nfld, IEEE, 1997, 1: 211-214