





























$$O(n_k^2 + h \times n_k).$$

而从算法 1 易知:在逗留节点的通信区域内,寻找采集节点所需的时间复杂度是  $O(n)$ .因此,在  $t$  棵最短路径树上,构造树高为  $h$  的限高树的时间复杂度为

$$\sum_{k=1}^t (O(n_k^2 + h \times n_k) \times O(n)),$$

其中,  $n_k$  表示第  $k$  个最短路径树中的节点数量.显然,构造限高树的最差时间复杂度为  $O(n^3)$ .

- DC-Collection 算法的第 3 阶段,优化限高树.

算法 2 的第 1 步~第 3 步是节点更新信息并选取存活次数最小的节点,第 4 步~第 22 步是将瓶颈节点的子孙转移到满足转移条件的节点,最大化限高树的网络生命周期.所以,优化限高树所需的时间复杂度是  $O(n^2)$ .

- DC-Collection 算法的第 4 阶段,采用 Christofides algorithm<sup>[18]</sup>计算数据收集路径长度.

在最坏的情况下,网络中的所有节点都不能与其他节点进行通信.此时,网络中的所有节点将在数据收集路径上.由于 Christofides algorithm 最坏情况下的时间复杂度是  $3/2 \times O(n^3)$ ,所以在最坏情况下,计算数据收集路径长度所需的时间复杂度是  $O(n^3)$ .

综上所述,在最坏情况下,DC-Collection 算法的时间复杂度为  $O(n^2) + O(n^3) + O(n^2) + O(n^3)$ .即,整个算法的时间复杂度为  $O(n^3)$ .证毕. □

#### 4.4 约束跳数和延迟之间的关系

**定理 3.** 在 WSN 中,约束跳数越大,DC-Collection 算法所选取的逗留节点数越少.这样,移动数据收集器获得较短数据收集路径长度的概率越大,使得移动数据收集器能够以高概率获得更短的数据收集延迟.

证明:假设目标监视区域的面积为  $M \times M$ ,节点的通信半径为  $r$ .易知,目标监视区域内两个对角顶点的距离最大且该距离为  $\sqrt{2} \times M$ .由此可以计算得出,网络中的节点至多经过  $k = \lceil \sqrt{2} \times M / r \rceil$  跳即可将数据转发给根节点.此外,我们定义:如果节点能够与根节点之间通信,则称该节点为 1 跳节点;如果节点至少需要通过 2 跳才能将其数据转发到根节点,则称该节点为 2 跳节点.依次类推.如图 2 所示,最右边的  $d_0$  为最短路径树的根节点,  $d_i$  为  $i$  跳节点 ( $1 \leq i \leq k$ ).

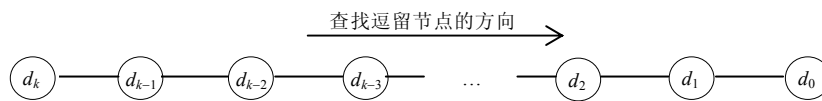


Fig.2 An analytic instance of the relationship between constrained hop-numbers and delay

图 2 约束跳数和延迟关系的分析图例

在利用移动数据收集器收集数据的 WSN 中,移动数据收集器收集一轮数据所需要的时间(即延迟)包括两部分:一是各采集节点收集数据的时间;二是移动数据收集器按照规划好的路径行走所需时间.然而根据以往的研究,WSN 中数据包的发送速度大约是几百米每秒<sup>[14]</sup>,而在实际应用中,典型的移动系统的移动速度大约在  $0.1 \sim 2\text{m/s}$ <sup>[14,15]</sup>,故在数据收集过程中,可以忽略约束跳数对延迟的影响.因此,本文的延迟主要由数据收集路径长度决定.

为了便于描述约束跳数与延迟的关系,我们不妨先假设最短路径树的拓扑结构如图 2 所示.显然,当约束跳数  $h$  增大时,所选取的逗留节点越靠近根节点  $d_0$ ;而且选取的逗留节点数量也越少.推广到一般情形,网络中通常存在多个  $d_i$  跳节点被选为逗留节点.为简化证明过程,不妨假设这些处于  $d_i$  跳的逗留节点之间的路径长度是以  $d_i \times r$  (根节点与  $d_i$  跳逗留节点之间的距离)为半径的圆周长,即  $L_i = 2\pi \times (d_i \times r)$ ,且数据收集路径长度为  $\sum_{i=1}^k L_i \times P_i$ .其中,  $P_i$  的取值为 0 或 1,且  $P_i = 1$  表示在  $d_i$  跳有逗留节点,  $P_i = 0$  表示在  $d_i$  跳没有逗留节点.显然,数据收集路径长度会随着约束跳数的增加而减少.

综上所述,在移动数据收集器移动速度固定的情况下,约束跳数越大,算法所选取的逗留节点数越少.这样,移动数据收集器获得较短数据收集路径长度的概率越大,使得移动数据收集器能够以高概率获得更短的数据

收集延迟.证毕. □

### 5 仿真实验与结果分析

本文所提出的 DC-Collection 算法主要关注于如何解决网络中数据传输路由的选择和建立问题.此外,我们假设 MAC 层有可靠的包传输机制,网络层的丢包和拥塞控制问题可以得到较好的解决.由于 MATLAB 能够快速建立可视化的原型系统并进行算法性能分析,满足我们的实验仿真要求,所以我们选择在 MATLAB 平台上进行仿真实验.

约束跳数、通信半径以及节点密度是影响算法性能(即,网络生命周期和数据收集路径长度)的主要因素,为了评估和分析本文所提出的 DC-Collection 算法的性能,本节将对提出的 DC-Collection 算法与 SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法和 LBCDG<sup>[11]</sup>算法进行一系列的仿真实验,进而验证 DC-Collection 算法的性能.由于节点感知数据能耗和计算能耗可以忽略不计<sup>[20]</sup>,此外,在每轮数据收集过程中,节点只接收并广播发送一次数据请求消息,这些数据请求消息小且数量不大,故其消耗的能量也可以忽略不计,所以在 WSN 中,数据包的发送和接收所消耗的能量成为主要的通信能耗.为使 DC-Collection 算法、SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法以及 LBCDG<sup>[11]</sup>算法能够进行公平的对比,节点采用固定发射功率.节点进行通信时,发送数据所消耗的能量大约是接收数据所消耗能量的 2 倍<sup>[21]</sup>.此外,在 LBCDG<sup>[11]</sup>算法中,节点直接将数据发送给簇头.为测量约束跳数  $h$  对网络性能的影响以及进行公平的实验对比,我们对 LBCDG<sup>[11]</sup>算法进行拓展,使得节点能够通过多跳的方式将数据转发给簇头.仿真实验中所使用的部分实验参数见表 2.节点的能量消耗主要用于发送数据和接收数据,所以在整个数据收集过程只考虑节点发送和接收数据的能量消耗.实验的结果均是算法执行 20 次后的平均结果

Table 2 Experimental paramaters

表 2 实验参数

目标监视区域的面积	200×200m <sup>2</sup>
节点的初始能量	[0.5,1]J
数据包的大小	128bit
发送 1bit 数据的能量消耗	100nJ/bit
接收 1bit 数据的能量消耗	50nJ/bit

#### 5.1 约束跳数对网络生命周期和数据收集路径长度的影响

本小节将在一个随机确定的网络实例中,测试约束跳数  $h$  在不同取值时对 DC-Collection 算法、SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法以及 LBCDG<sup>[11]</sup>算法性能的影响.假设在目标监视区域内随机部署 200 个节点,节点的通信半径为 30m,其他实验参数见表 2.我们分别测试约束跳数  $h$  为 1,2,3,4,5 时,DC-Collection 算法、SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法以及 LBCDG<sup>[11]</sup>算法的网络生命周期和数据收集路径长度.实验结果如图 3(a)、图 3(b)所示.

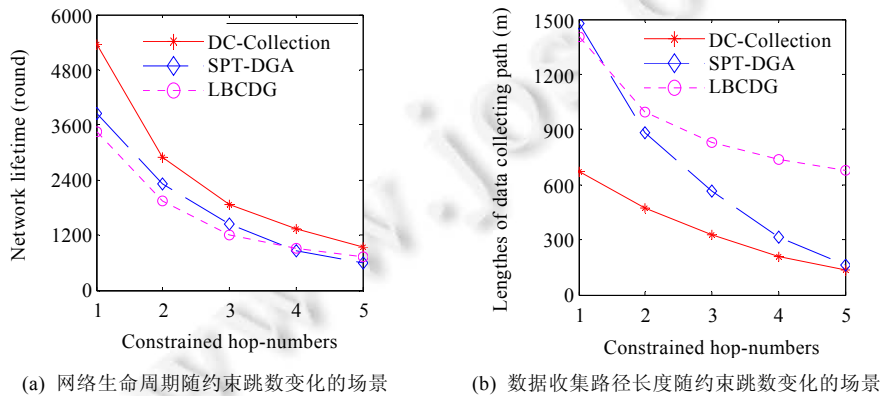


Fig.3 Scene with different constrained hop-numbers

图 3 约束跳数变化的场景

从图 3(a)可知:随着约束跳数  $h$  的不断增大,各算法的网络生命周期都在不断减小,且 DC-Collection 算法获得较大的网络生命周期.主要有两个方面的原因.

- (1) 随着约束跳数  $h$  的增大,限高树上的节点数量也随之增加,导致节点的能量消耗增加,进而缩短了网络生命周期;
- (2) 在 DC-Collection 算法中,在逗留节点通信区域内所选取的采集节点,其子孙节点到达采集节点的跳数一般小于  $h$ ,使得限高树上的节点数量较少,而且 DC-Collection 算法对限高树进行优化,有利于均衡节点的能量消耗;然而 SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法没有进行优化,而且在 LBCDG<sup>[11]</sup>算法中节点随机选取簇头转发数据,没有考虑邻居节点的能量,不利于均衡节点的能量消耗.

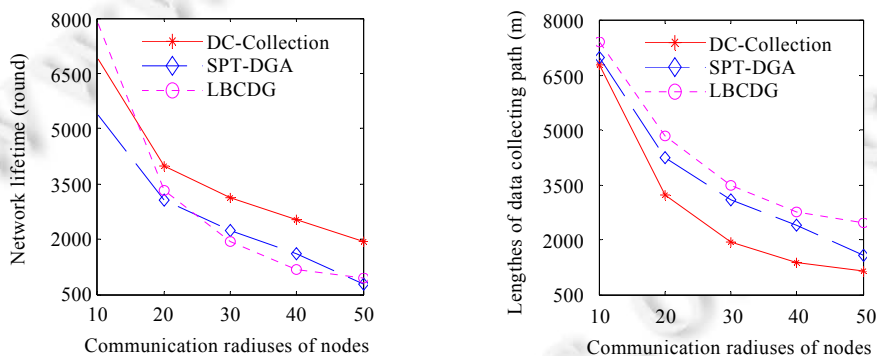
以上这些因素,使得 DC-Collection 算法获得比 SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法以及 LBCDG<sup>[11]</sup>算法更大的网络生命周期.

从图 3(b)可知:随着约束跳数  $h$  的不断增大,各算法的数据收集路径长度都在不断减小,且 DC-Collection 算法获得较短的数据收集路径长度.主要有两个方面的原因.

- (1) 随着约束跳数  $h$  的增大,各算法所选取的逗留节点数量不断减少,有利于缩短数据收集路径长度;
- (2) 在 DC-Collection 算法中,在逗留节点通信区域内选取部分节点为采集节点,使得更多的节点从最短路径树上移除.这样,DC-Collection 算法选取的逗留节点的数量比 SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法和 LBCDG<sup>[11]</sup>算法更少,从而获得较短的数据收集路径长度.

## 5.2 通信半径对网络生命周期和数据收集路径长度的影响

本小节将在目标监视区域的面积、约束跳数、节点数量固定的条件下,测试在节点的通信半径发生变化时,网络生命周期和数据收集路径长度的变化情况.假设约束跳数  $h=2$ ,节点的数量  $n=200$ ,且在目标监视区域内随机部署,其他实验参数见表 2.我们在网络中分别测试节点的通信半径为 10,20,30,40 和 50m 时,DC-Collection 算法、SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法以及 LBCDG<sup>[11]</sup>算法的网络生命周期和数据收集路径长度.实验结果如图 4(a)、图 4(b)所示.



(a) 网络生命周期随节点的通信半径变化的场景

(b) 数据收集路径长度随节点的通信半径变化的场景

Fig.4 Scene with different communication radiuses of nodes

图 4 节点通信半径变化的场景

从图 4(a)可知:节点的通信半径在 10m 时,LBCDG<sup>[11]</sup>算法获得了较高的网络生命周期;但当节点的通信半径在 20m~50m 之间不断增大时,DC-Collection 算法获得了比 SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法和 LBCDG<sup>[11]</sup>算法更大的网络生命周期.主要有 3 个原因.

- (1) 随着节点的通信半径的增大,DC-Collection 算法和 SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法所构造的限高树以及 LBCDG<sup>[11]</sup>构造簇中的节点数量往往会随之增加.这样,根节点(采集节点)或簇头需要转发较多的数据,从而缩短了各算法的网络生命周期;
- (2) 与 SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法相比,DC-Collection 算法在逗留节点的通信范围内选取较多节点作为采集节点,且



以这些采集节点为根的限高树通常拥有较少节点,有利于保存节点的能量.此外,DC-Collection 算法的第 3 阶段对限高树进行了优化操作,有利于延长网络生命周期,最终使得 DC-Collection 算法能够获得比 SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法更长的网络生命周期;

- (3) 对于 LBCDG<sup>[11]</sup>算法,节点在约束跳数( $h=2$ )范围内随机选取一个簇头并将数据转发给它.节点的通信半径越大,簇头通常需要转发的数据越多,而且节点转发数据时没有考虑邻居节点的能量水平,容易造成节点的能量消耗不均衡,从而缩短了网络生命周期.

以上这些因素,使得 DC-Collection 算法获得了比 SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法和 LBCDG<sup>[11]</sup>算法更大的网络生命周期.

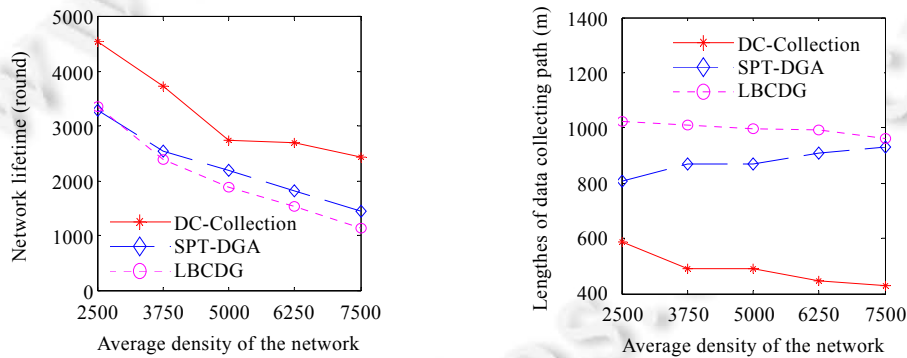
从图 4(b)可以看出:随着节点通信半径的不断增大,各算法的数据收集路径长度均在不断减少,且 DC-Collection 算法获得了比 SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法及 LBCDG<sup>[11]</sup>算法更短的数据收集路径长度.主要有两个方面的原因.

- (1) 随着节点通信半径的增大,各算法所选取的逗留节点数量不断减少,使得各算法能够以高概率获得较短的数据收集路径长度;
- (2) 在 DC-Collection 算法中,随着节点通信半径的不断增大,在逗留节点内能够选取更多节点作为采集节点,使得更多的节点从最短路径树上移除.

与 SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法和 LBCDG<sup>[11]</sup>算法相比,DC-Collection 算法所选取的逗留节点数量要少得多,使得 DC-Collection 算法能够以高概率获得比 SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法和 LBCDG<sup>[11]</sup>算法更短的数据收集路径长度.

### 5.3 网络平均密度对网络生命周期和数据收集路径长度的影响

在固定面积的目标监视区域内,网络平均密度与网络中节点数量成正比.所谓的网络平均密度是指节点数量与目标监视区域面积的比值.本节将在目标监视区域的面积、约束跳数、节点的通信半径固定的条件下,通过改变节点数量获得不同网络的平均密度,并在不同网络平均密度下,测试网络生命周期和数据收集路径长度的变化情况.假设约束跳数  $h=2$ ,节点的通信半径  $r=30\text{m}$ ,节点在目标监视区域内随机部署,其他实验参数见表 2.我们分别测试网络平均密度为 2 500,3 750,5 000,6 250 和 7 500 个/ $\text{km}^2$  时,DC-Collection 算法、SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法以及 LBCDG<sup>[11]</sup>算法的网络生命周期和数据收集路径长度.实验结果如图 5(a)、图 5(b)所示.



(a) 网络生命周期随网络平均密度变化的场景

(b) 数据收集路径长度随网络平均密度变化的场景

Fig.5 Scene with different average density of the network

图 5 网络平均密度变化的场景

由图 5(a)可知:随着网络平均密度的不断增大,各算法的网络生命周期均在不断地减小,且 DC-Collection 算法获得了比 SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法和 LBCDG<sup>[11]</sup>算法更大的网络生命周期.主要有 3 个原因.

- (1) 随着网络平均密度的增大,单位面积内的节点数量通常会增多.这样,DC-Collection 算法和 SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法所构造的限高树以及 LBCDG 算法<sup>[11]</sup>构造簇中的节点数量往往会随网络平均密度的增大而增加,使得根节点(采集节点)或簇头需要转发较多的数据,从而缩短了各算法的网络生命周期;
- (2) SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法没有对限高树进行优化.此外,对于 LBCDG<sup>[11]</sup>算法,节点在约束跳数( $h=2$ )范围内随机

选取一个簇头,并将数据转发给它.这样,能量较低的簇头可能转发较多数据而过快耗能量,缩短了网络生命周期.然而,DC-Collection 算法所构造的限高树的高度通常小于  $h$ ,且对限高树进行优化操作,有利于延长网络生命周期.

以上这些因素,使得 DC-Collection 算法获得比 SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法以及 LBCDG<sup>[11]</sup>算法更大的网络生命周期.

由图 5(b)可知:随着网络平均密度的增加,各算法的数据收集路径长度均在不断地减少,且 DC-Collection 算法获得了比 SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法以及 LBCDG<sup>[11]</sup>算法更短的数据收集路径长度.主要有两个方面的原因.

- 一方面,网络平均密度越大,单位面积内拥有节点数量越多的概率越大.这样,各算法所构造的限高树或簇中的节点数量往往会随网络平均密度的增大而增加,选取靠近 Sink 的节点作为逗留节点或簇头的概率也随之增大,从而缩短了各算法的数据收集路径长度;
- 另一方面,DC-Collection 算法充分利用采集节点在移动数据收集器的通信范围内,采集节点可以将接收到的数据以及自身感知的数据发送给移动数据收集器这一特性,使得它所选取的逗留节点数量比 SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法和 LBCDG<sup>[11]</sup>算法得到的逗留节点数量更少.所以,DC-Collection 算法获得了比 SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法和 LBCDG<sup>[11]</sup>算法更短的数据收集路径长度.

## 6 结 论

在大规模的无线传感器网络中收集数据,不仅需要节省节点的能量消耗,而且还需要考虑降低数据收集的延迟.如何有效地均衡节点的能量消耗和最小化数据收集延迟,是一个 NP-hard 问题.通过对数据收集模型进行分析,本文提出一种节能省时的数据收集协议 DC-Collection 来解决这个问题.仿真实验结果表明:与 SPT-DGA<sup>[13]</sup>算法和 LBCDG<sup>[11]</sup>算法相比,无论是在约束跳数、节点的通信半径,还是在节点的数量发生变化的情况下,DC-Collection 算法在网络生命周期和数据收集路径长度方面均有较大的优势.

DC-Collection 算法是一种集中式的算法.在构造最优限高树时,DC-Collection 算法需要预先利用移动节点获取全网中的节点的分布信息,这个过程需要消耗较多的能量用于节点间的通信和协调.因此,我们下一步的工作将研究采用分布式算法构造限高树以及选取逗留节点.与此同时,在构造限高树和选取逗留节点时,将考虑更多的参数(如节点的能量等),使得算法更好地应用于真实环境.

## References:

- [1] Wang Y, Wu HY. DFT-MSN: The delay/fault-tolerant mobile sensor network for pervasive information gathering. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Press, 2006. 1–12. [doi: 10.1109/INFOCOM.2006.272]
- [2] Guo LJ, Beyah R, Li YS. SMITE: A stochastic compressive data collection protocol for mobile wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Press, 2011. 1611–1619. [doi: 10.1109/INFOCOM.2011.5934953]
- [3] Sugihara R, Gupta RK. Optimal speed control of mobile node for data collection in sensor networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2010,9(1):127–139. [doi: 10.1109/TMC.2009.113]
- [4] Kinalis A, Nikolettseas S, Patroumpa D, Rolim J. Biased sink mobility with adaptive stop times for low latency data collection in sensor networks. In: Proc. of the IEEE GlobeCom. New York: IEEE Press, 2009. 1–6. [doi: 10.1109/GLOCOM.2009.5425600]
- [5] Konstantopoulos C, Pantziou G, Gavalas G, Mpitziopoulos A, Mamalis B. A rendezvous-based approach enabling energy-efficient sensory data collection with mobile sinks. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2012,23(5):809–817. [doi: 10.1109/TPDS.2011.237]
- [6] Takaishi D, Nishiyama H, Kato N, Miura R. Towards energy efficient big data gathering in densely distributed sensor networks. IEEE Trans. on Emerging Topics in Computing, 2014,99:1–10. [doi: 10.1109/TETC.2014.2318177]
- [7] Zhang XW, Dai HP, Xu LJ, Chen GH. Mobility-Assisted data gathering strategies in WSNs. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013,24(2):198–214 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4349.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2013.04349]
- [8] Olariu S, Stojmenovic I. Design guidelines for maximizing lifetime and avoiding energy holes in sensor networks with uniform distribution and uniform reporting. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Press, 2006. 1–12. [doi: 10.1109/INFOCOM.2006.296]

- [9] Shah RC, Roy S, Jain S, Brunette W. Data mules: Modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks. In: Proc. of the ACM SNPA. New York: IEEE Press, 2003. 30–41. [doi: 10.1109/SNPA.2003.1203354]
- [10] Chen GH, Li CF, Ye M, Wu J. An unequal cluster-based routing protocol in wireless sensor networks. Wireless Networks, 2009, 15(2):193–207. [doi: 10.1007/s11276-007-0035-8]
- [11] Zhao M, Yang YY. A framework for mobile data gathering with load balanced clustering and MIMO uploading. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Press, 2011. 2759–2767. [doi: 10.1109/INFCOM.2011.5935108]
- [12] Ma M, Yang YY, Zhao M. Tour planning for mobile data-gathering mechanisms in wireless sensor networks. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2013,62(4):1472–1483. [doi: 10.1109/TVT.2012.2229309]
- [13] Zhao M, Yang YY. Bounded relay hop mobile data gathering in wireless sensor networks. IEEE Trans. on Computers, 2012,61(2): 265–277. [doi: 10.1109/TC.2010.219]
- [14] Xing GL, Wang T, Jia WJ, Li M. Rendezvous design algorithms for wireless sensor networks with a mobile base station. In: Proc. of the ACM MobiHoc. New York: ACM Press, 2008. 231–240. [doi: 10.1145/1374618.1374650]
- [15] Pon R, Batalin MA, Gordon J, Kansal A, Liu D, Rahimi M, Shirachi L, Yu Y, Hansen M, Kaiser WJ, Srivastava M, Sukhatme G, Estrin D. Networked infomechanical systems: A mobile embedded networked sensor platform. In: Proc. of the IEEE IPSN. New York: ACM/IEEE Press, 2005. 376–381. [doi: 10.1109/IPSIN.2005.1440952]
- [16] Ma M, Yang YY. Data gathering in wireless sensor networks with mobile collectors. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2008. 1–9. [doi: 10.1109/IPDPS.2008.4536269]
- [17] Guo ST, Wang C, Yang YY. Mobile data gathering with wireless energy replenishment in rechargeable sensor networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Press, 2013. 1932–1940. [doi: 10.1109/INFCOM.2013.6566993]
- [18] An HC, Kleinberg R, Shmoys DB. Improving christofides' algorithm for the  $s$ - path TSP. In: Proc. of the ACM STOC. New York: ACM Press, 2012. 875–886. [doi: 10.1145/2213977.2214055]
- [19] Wu Y, Wang C, Fahmy S, Shorff NB. On the construction of a maximum-lifetime data gathering tree in sensor networks NP-completeness and approximation algorithm. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Press, 2008. 1–9. [doi: 10.1109/INFCOM.2008.80]
- [20] Heinzelman WR, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: Proc. of the IEEE HICSS. New York: IEEE Press, 2000. 1–10. [doi: 10.1109/HICSS.2000.926982]
- [21] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In: Proc. of the ACM MobiCom. New York: ACM Press, 2000. 56–67. [doi: 10.1145/345910.345920]

#### 附中文参考文献:

- [7] 张希伟,戴海鹏,徐力杰,陈贵海.无线传感器网络中移动协助的数据收集策略.软件学报,2013,24(2):198–214. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4349.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2013.04349]



梁俊彦(1979—),男,广西南宁人,博士,教授,主要研究领域为无线传感器网络.



陈宁江(1975—),男,博士,教授,CCF 高级会员,主要研究领域为网络分布式计算.



邹绍军(1987—),男,博士生,主要研究领域为无线传感器网络,数据中心网络.



李韬(1986—),男,博士后,主要研究领域为信息物理系统.