

延迟容忍移动无线传感器网络路由策略综述*

李巧勤, 刘明, 曾家智

(电子科技大学 计算机科学与工程学院, 成都 611731)

摘要: 近年来,关于间断连通的延迟容忍移动无线传感器网络(DTMSN)有很多研究,其中最关键的问题之一是路由,因此针对 DTMSN 提出了不同的路由协议。对 DTMSN 路由协议进行分类,着重介绍几种当前具有代表性的路由协议,并对协议的能量效率、服务质量和扩展性等方面进行了分析和比较。最后对 DTMSN 路由协议的进一步研究进行了展望。

关键词: 延迟容忍无线传感器网络; 数据搜集; 路由策略; 队列管理

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2010)05-1611-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.05.003

Survey of routing schemes in delay tolerant mobile sensor networks

LI Qiao-qin, LIU Ming, ZENG Jia-zhi

(School of Computer Science & Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Recently there has been much research work in the area of intermittently connected delay tolerant mobile sensor networks (DTMSN). Routing is one of the most key problems in DTMSN. Therefore, proposed different routing protocols. This paper discussed the classification of routing protocols for DTMSN. Presented a number of representative routing protocols, and analyzed and compared the performance of these protocols, including energy efficiency, quality of service (QoS) and scalability. At last proposed some research directions for future.

Key words: delay tolerant mobile sensor networks; data gathering; routing scheme; queue management

无线传感器网络通常由一定数量的传感器节点和一个或多个数据汇聚点(sink)组成,传感器节点负责感应数据,sink 节点负责收集和处理数据^[1]。目前通用的传感器网络数据收集协议假设在源节点和目的节点之间存在连续的端到端路径,然而这种假设在某些应用场合并不成立。例如,在野生动物生活习性数据搜集或者流行病毒监测等应用场合,通常将传感器节点配置在各个被监测的对象上,这些被监测的对象具有随机移动性,将导致网络的间断连通;另一方面,这些应用通常允许一定程度的数据延迟。这类网络称为延迟容忍移动无线传感器网络(DTMSN)^[2]。

DTMSN 通常包含两种节点:配置在运动物体上的传感器节点和固定在某处进行数据搜集的汇聚点。与传统的传感器网络不同,在 DTMSN 中,传感器节点的运动导致网络拓扑不断改变,或者由于网络节点稀疏部署,源节点到汇聚点之间可能不存在端到端的数据传输路径,传统的无线传感器网络数据传输机制不适用。另一方面,DTMSN 又具有传统传感器网络相同的一些特性,如传输距离短、计算能力和缓存空间有限、电池能量有限且不利于补充等。因此如何有效地进行数据搜集,在能量消耗和传输性能之间达到平衡成为 DTMSN 的首要问题。

1 DTMSN 的路由问题

DTMSN 可以利用节点的移动性进行数据传输。节点产生

或收到其他节点的数据时,若不在汇聚点通信范围且暂时没有合适的节点转发数据,则携带数据;当移动过程中遇到合适的转发节点再进行数据传输,或者遇到汇聚点就直接发送给汇聚点。图 1 显示了在 DTMSN 中如何利用节点的移动性实现数据传输。在 t_1 时刻的拓扑如图 1(a) 所示,节点 1 产生数据,这时节点 1 与节点 3 和 4 有通路,但与 sink 没有直接通路,因此节点 1 可以将数据传送给节点 3 或 4。在 $t_2(t_2 > t_1)$ 时刻的拓扑如图 1(b) 所示,这时节点 3 移动到 sink 的通信范围,可以将来自节点 1 的数据传送到 sink 节点。尽管节点 1 与 sink 没有直接连通,但利用节点的移动性,完成了节点 1 的数据到 sink 的传输。

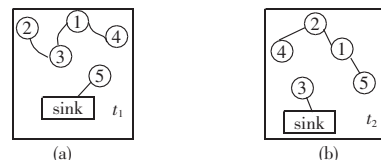


图 1 延迟容忍移动无线传感器网络示例图

DTMSN 的间断连通特性影响了数据传输的可靠性。为了达到一定的数据传输率,通常在源节点需要进行必要的数据复制^[3],即一个数据需要发送多个副本,但这样的复制又会增加传输数据的能量消耗,并且需要占用更大的缓存空间。对缓存空间有限的传感器节点,会因为缓存耗尽而丢弃数据,影响传输性能。因此,为 DTMSN 设计路由策略时需要考虑的主要问题包括选择合适的副本数量、选择合适的下一跳节点转发数据、进行有效的缓存管理。

收稿日期: 2009-10-07; 修回日期: 2009-12-02 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60703114)

作者简介: 李巧勤(1972-),女,重庆人,讲师,博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络、新型网络体系结构(helenli803@163.com);

刘明(1973-),男,副教授,博士,主要研究方向为移动计算、传感器网络技术;曾家智(1939-),男,教授,博导,主要研究方向为新型网络体系结构。

2 DTMSN 路由策略分类

DTMSN 本质上是一种延迟容忍网络(DTN)^[4],同时又具有传统传感器网络的特点,能量和资源都有限,因此在设计路由策略时需同时考虑这两个方面的因素。最基本的 DTMSN 路由机制为直接传输,只有传感器节点移动到汇聚点的通信范围才进行数据传输;或者利用移动转发节点(dataMule)依次搜集各节点产生的数据^[5],并在移动到汇聚点通信范围时进行数据传输。这种机制不需复制数据,能量消耗小,但传输效率取决于节点与汇聚点相遇的概率,传输延迟大,实际应用中使用较少。目前对 DTMSN 的路由研究主要分两大类,即基于泛洪的路由和基于传输概率的路由。

2.1 基于泛洪的路由策略

Vahdat 等人^[6]提出传染路由(epidemic routing)协议。节点有数据需要发送时,以泛洪形式发送给通信范围内的所有节点,这样数据很快在连通的网络范围内传播。当两个节点相遇时,相互从对方节点获取自身还没有的数据。利用节点的移动性,即使源节点和目的节点之间没有直接连接路径,也可实现数据传输。仿真结果表明,在某些特定应用场合,如果节点缓存足够大,传染路由可以转发网络中产生的所有数据;但是传染路由会消耗大量能量,影响网络寿命,并且可能因为竞争降低传输性能。

文献[7]将传染路由与 Infostation^[8]的概念相结合,提出 SWIM(shared wireless infostation model)机制用于搜集海洋中鲸的生物信息。SWIM 的数据转发方法与文献[6]类似,区别在于整个网络系统可以有多个高速数据接收站点作为局部的数据汇聚点,数据可以快速传输到最近的站点,各个站点再协作将数据传输到最终的汇聚点。SWIM 通过适当增加缓存空间,在网络数据传输能力和传输延迟之间达到进一步平衡。

Spyropoulos 等人^[9]结合传染路由与直接路由策略各自的优势,提出 spray-wait 路由机制。在 spray 阶段,源节点首先将产生的数据快速传播给多个不同的转发节点,这个过程具有传染路由快速传播的特点;如果在 spray 阶段没有遇到目的节点,则进入 wait 阶段,每个转发节点携带数据直到遇到目的节点才进行数据传输,这一阶段与直接传输方式相同。作者从理论上分析了如何确定副本的数量,并提出 binary spraying 方法快速分发副本。实验表明,在节点移动频繁的场所,如果合理选择参数,spray-wait 机制可以在副本较少的情况下,以较小的延迟实现有效数据传输。

文献[10]提出可控的泛洪机制以减少能量消耗。假设任何节点都不知道其他节点的位置、状态、移动模式等信息,并且每个节点可以独立控制自己的行为。每个节点计算一个意愿值(willingness),表示该节点愿意参与数据传输和转发的程度。首先提出基本概率(basic probability, BP)方法,利用统一分布概率函数为节点计算转发消息的意愿值。另外还提出其他几种机制以进一步控制泛洪的规模。其中, TTL(time-to-live)用于指定消息被丢弃之前可以转发的次数;消亡时间(kill time)用于指定消息在系统中的绝对生存时间;利用被动治愈(passive cure)机制,目的节点收到消息后,向转发者发送一个特殊的 ACK,以通知该消息的携带者删除该消息。研究表明这些策略在几乎不增加传输延迟的情况下,可以大大减少数据的传输量,并通过比较提出 TTL 和 BP 的结合可以达到最好的性能。

2.2 基于概率的路由策略

基于传输概率的路由策略^[11]与基于泛洪的路由策略不同,中间节点不是盲目地将数据转发给所有邻居节点,而是根据邻居节点到达目的地的概率大小,确定在什么时候选择哪些节点转发数据。根据概率的计算方法不同,又可以分为基于历史数据的转发和基于预测的转发。

2.2.1 基于历史数据的转发

在 ZebraNet 项目中^[12]提出基于历史数据的转发机制。节点的概率值代表节点与汇聚点相遇的可能性大小,概率值的计算基于节点过去与汇聚点相遇的次数。中间节点将数据转发给概率值较大的节点。若某些节点移动频率低或移动局限在小范围,则数据传输的效率较低。

RED 策略^[13]对传输概率的计算采用了改进的基于历史数据的方法。若节点 i 将消息传输给节点 k ,则根据节点 k 的传输概率 ξ_k 计算节点 i 的概率 ξ_i ;若节点 i 在一段时间内没有发生消息传输,则减小传输概率值。公式如下:

$$\xi_i = \begin{cases} (1 - \alpha)[\xi_i] + \alpha\xi_k & \text{transmission} \\ (1 - \alpha)[\xi_i] & \text{timeout} \end{cases} \quad (1)$$

其中:[ξ_i]为节点 i 修改前的传输概率, α 为常数, $0 \leq \alpha \leq 1$ 。另外还利用容错编码(erasure coding)^[14]技术进行消息管理,以提高传输成功率,但在网络中传输大量的分片消息会增加网络的传输能耗。FAD 策略^[15]的传输概率计算方法与 RED 相同,同时根据每个消息的错误容忍(fault tolerance)值进行消息队列的管理,以改善传输效率,但实现较复杂。

文献[16]的自适应数据搜集机制包括消息转发和缓存管理两部分。节点转发概率 P_i 的计算同时考虑节点的相遇概率 M_i 和剩余能量 E_i ,公式如下:

$$P_i = \lambda M_i + (1 - \lambda)E_i \quad (2)$$

其中: λ 为权重参数, $0 \leq \lambda \leq 1$; M_i 代表节点移动过程与 sink 相遇的可能性,其计算方法与文献[13]类似。该机制还引入消息的重要因子,代表消息的重要程度。当节点 i 的消息 m 被转发到节点 j ,则重要因子被降低,计算如下:

$$F_i^m = \frac{P_i}{1 - (1 - P_i)(1 - P_j)} F_i^{m'} \quad (3)$$

其中: $F_i^{m'}$ 为消息 m 更新之前的重要因子值。当重要因子降到预先设定的门限值,则该消息不再被转发,只有等到节点遇到 sink 时才进行数据传输。另外还提出一种主动消息删除机制,以减少能量消耗和有效管理缓存。

对于节点只在局部范围移动或移动频率较低的情况下,文献[9]的 spray-wait 策略传输效率较低。作者进一步提出了 spray-focus 策略,该方法与 spray-wait 的区别在于转发节点不必采用直接传输。每个节点计算与其他节点相遇的概率,若转发节点移动过程中遇到概率大于自己的节点,则进行数据转发,以减少传输延迟。

文献[17]提出基于利用率的路由机制 UDM,通过加权平均计算节点的当前利用率,公式如下:

$$P_{(i,j) - \text{current}} = \alpha P_{(i,j)} + (1 - \alpha)P_{(i,j) - \text{new}} \quad (4)$$

其中: $P_{(i,j)}$ 的值取决于节点 i 和 j 相遇时间长短; α 为权重参数, $0 \leq \alpha \leq 1$ 。两个节点相遇时,将数据转发给利用率高的节点。为了提高数据传输率,UDM 在源节点产生数据的多个副本,并利用本地优化树(图2(a))快速分发各个副本,这比源树算法(图2(b))可以更快地传输副本。数据到达目的地后,目

的节点将发送一个消息表明已经正确接收数据,通知其他节点删除该数据的副本。这样虽然可以减少副本数,但通知消息本身的传输需要消耗额外能量。UDM 还通过将副本表示为核心副本和备份副本实现了简单的存储管理。

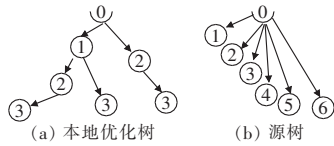


图 2 数据副本分发过程

2.2.2 基于预测的转发

文献[18]提出 SCAR(sensor context-aware routing)策略,基于分析节点的上下文信息,包括节点的相对移动性、与汇聚点之间的位置关系以及电池能量,利用 Kalman filter 预测技术^[19]计算节点的传输概率值。为提高可靠性,源节点产生数据的多个副本,将各个副本分别发送给概率值较高的邻居节点。中间节点在移动过程中,当遇到传输概率大于自身概率的节点,则进行数据传输。SCAR 通过将数据的副本标志为主副本和备份副本实现简单的存储管理。

文献[20]假设每个节点知道汇聚点的位置,并且每次移动之前知道下一个目的地位置,提出移动预测路由机制 MPAD(mobility prediction-based adaptive data delivering)。节点根据当前位置和下一个目的地可以预测计算出到达汇聚点的概率。数据传输基于节点的概率值,节点移动到新的目的地,与邻居节点通过握手交换传输概率值,将数据传输给所有比自身传输概率大的节点。为保证数据到达汇聚点,MPAD 同样需要基于多个副本的数据传输,因此引入队列管理机制,可以丢弃网络中的一些生存时间过长的消息,从而节省网络带宽和能量消耗。

2.2.3 分析与比较

基于泛洪的路由策略能够快速在连通范围内传播数据,因而具有较小的传输延迟,在缓存不受限制的场合具有较高的传输率,但能量消耗大。然而在节点密度较大且缓存受限的情况下,由于缓存的限制会引起大量数据丢失,同时由于节点之间信道竞争影响传输质量,泛洪路由的扩展性较差。对泛洪路由的改进主要是将泛洪规模控制在一定范围,以减少能量消耗。基于概率的路由策略通常限制数据副本的数量,可以有效减少能量消耗,但其传输性能与节点的移动特征有很大关系,在节点移动频率低、移动范围受限的情况下具有较大的传输延迟。另外,节点的位置感知能力、概率计算的准确性也会影响传输性能,可以通过配置 GPS 使节点具有位置感知能力,但这会增加额外的成本。由于副本数量有限,在基于概率的路由协议中通常需要设置有效的缓存管理机制进一步保证传输性能。

根据各种路由策略的转发机制、缓存管理、能量效率、QoS 以及扩展性等进行综合分析和比较,结果如表 1 所示。

表 1 延迟容忍移动无线传感器网络路由策略分析与比较

路由策略	转发机制	能耗	缓存管理	QoS	扩展
文献[5]	直接传输	低	no	传输率高	较差
文献[6]	flooding	高	no	延迟小	差
文献[7]	局部泛洪	较高	no	延迟较小	较差
文献[9]	2-hop	较低	no	延迟较大	差
文献[10]	可控泛洪	较高	yes	延迟较小	较差
文献[12]	历史概率	较低	no	延迟较大	较好
文献[13, 15~17]	历史概率	较低	yes	延迟较大	较好
文献[18]	预测概率	较低	simple	延迟较大	较好
文献[20]	预测概率	较低	yes	延迟较大	较好

3 结束语

本文对现有的 DTMSN 路由策略进行了分析和比较,从资源消耗和传输性能两方面衡量,现有的路由策略都有各自的优缺点。由于资源消耗与传输性能这两者是矛盾的,设计资源受限的 DTMSN 路由协议时,需要同时考虑这两个方面的因素。

目前的路由策略为了保证传输效率,大多采用多副本传输。在能量和缓存空间都有限的传感器网络中,当目标节点已经收到数据时,如何通知中间节点丢弃数据以释放缓存空间和减少能量消耗;而通知消息本身又需要消耗额外的能量,因此两者之间怎样平衡是需要进一步考虑的问题。目前基于概率的路由策略中,通常是假设节点随机移动,而实际应用中传感器节点的运动轨迹通常是有一定规律的。如果能模拟这些节点的运动轨迹,各节点能更好地预测到达汇聚点的概率,即能更有效地选择转发节点,进一步提高数据传输效率。因此如何模拟不同应用场合的节点运动模型将是今后的一个重要研究内容。

参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, SU We-lian, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. Wireless sensor networks: a survey [J]. *Computer Networks*, 2002, 38(4):393-422.
- [2] WANG Yu, WU Hong-yi. DFT-MSN: the delay/fault-tolerant mobile sensor network for pervasive information gathering [C]//Proc of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications. 2006:1-12.
- [3] JAIN S, DEMMER M, PATRA R, et al. Using redundancy to cope with failures in a delay tolerant network [J]. *ACM SIGCOMM Computer and Communication Review*, 2005, 35(4):109-120.
- [4] FALL K. A delay-tolerant network architecture for challenged internets [C]//Proc of Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. New York: ACM Press, 2003:27-34.
- [5] SHAH R C, ROY S, JAIN S, et al. Data mules: modeling and analysis of a three-tier architecture for sparse sensor networks [J]. *Ad hoc Networks*, 2003, 1(2):215-233.
- [6] VAHDAT A, BECKER D. Epidemic routing for partially connected Ad hoc networks [R]. Durham, NC: Department of Computer Science, Duke University, 2000.
- [7] SMALL T, HAAS Z J. The shared wireless infostation model: a new Ad hoc networking paradigm [C]//Proc of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. New York: ACM Press, 2003:233-244.
- [8] IACONO A, ROSE C. Infostations: new perspectives on wireless data networks [R]. New Jersey: Rutgers University, 2000.
- [9] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C S. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the multi-copy case [J]. *IEEE Trans on Networking*, 2008, 16(1):77-90.
- [10] HARRAS K A, ALMEROOTH K C. Controlled flooding in disconnected sparse mobile networks [J]. *Wireless Communication and Mobile Computing*, 2009, 9(1):21-33.
- [11] LINDGREN A, DORIA A, SCHELEN O. Probabilistic routing in intermittently connected networks [J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2003, 7(3):19-20.

- alistic mobility models for VANET [C]//Proc of Wireless Communications and Networking Conference. 2007;2506-2511.
- [14] TraNSLite [EB/OL]. [2009-03-21]. <http://trans.epfl.ch/>.
- [15] Network simulator 2 [EB/OL]. [2009-03-21]. http://nslam.isi.edu/nslam/index.php/user_information.
- [16] GloMoSim [EB/OL]. [2009-03-21]. <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/>.
- [17] QualNet [EB/OL]. [2009-03-21]. <http://www.scalable-networks.com/products>.
- [18] JiST/SWANS [EB/OL]. [2009-03-21]. <http://jist.ece.cornell.edu>.
- [19] OMNeT++ [EB/OL]. [2009-03-21]. <http://www.omnetpp.org>.
- [20] J-Sim [EB/OL]. [2009-03-21]. <http://www.j-sim.zcu.cz/>.
- [21] OPNET technologies [EB/OL]. [2009-03-21]. <http://www.opnet.com/>.
- [22] BARR R, HAAS Z, RENESSE R van. Scalable wireless Ad hoc network simulation [R]//Handbook on Theoretical and Algorithmic Aspects of Sensor, Ad hoc Wireless, and Peer-to-Peer Networks. Boca Raton: CRC Press, 2005; 297-311.
- [23] SCHOCH E, FEIRI M, KARGL F, *et al.* Simulation of Ad hoc networks: NS2 compared to JiST/SWANS [C]//Proc of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops. 2008.
- [24] KARGL F, SCHOCH E. Simulation of MANETs: a qualitative comparison between JiST/SWANS and NS2 [C]//Proc of the 1st International Workshop on System Evaluation for Mobile Platforms. New York: ACM Press, 2007; 41-46.
- [25] SWANS++ [EB/OL]. [2009-03-21]. <http://www.aqualab.cs.northwestern.edu/projects/swans++/>.
- [26] CHOFFNES D R, BUSTAMANTE F E. An integrated mobility and traffic model for vehicular wireless networks [C]//Proc of the 2nd ACM International Workshop on Vehicular Ad hoc Networks. New York: ACM Press, 2005; 69-78.
- [27] MANGHARAM R, WELLER D S, RAJKUMAR R, *et al.* GrooveNet: a hybrid simulator for vehicle-to-vehicle networks [C]//Proc of International Workshop on Vehicle-to-Vehicle Communications. 2006; 1-8.
- [28] PIORKOWSKI M, RAYA M, LEZAMA R, *et al.* TraNS: realistic joint traffic and network simulator for VANETs [EB/OL]. [2009-03-21]. http://icapeople.epfl.ch/panos/trans_mczr.pdf.
- [29] SOMMER C, YAO Zheng, GERMAN R, *et al.* On the need for bidirectional coupling of road traffic microsimulation and network simulation [C]//Proc of the 1st ACM SIGMOBILE Workshop on Mobility Models Networking Research. New York: ACM Press, 2008; 41-48.
- [30] WANG S Y, CHOU C L. NCTUns 5.0 network simulator for advanced wireless vehicular network researches [C]//Proc of the 10th International Conference on Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware. 2009; 375-376.
- [31] GORGORIN C, GRADINESCU V, DIACONESCU V, *et al.* An integrated vehicular and network simulator for vehicular Ad hoc networks [C]//Proc of the 20th European Simulation and Modeling Conference. 2006.
- [32] IBRAHIM K, WEIGLE M C. ASH: application-aware SWANS with highway mobility [C]//Proc of IEEE INFOCOM Workshop on Mobile Networking for Vehicular Environments (MOVE). 2008.
- [33] LIU Bo-jin, KHORASHADI B, DU Hai-ning, *et al.* VGSim: an integrated networking and microscopic vehicular mobility simulation platform [J]. *Communications Magazine*, 2009, 47(5): 134-141.
- [34] BONONI L, Di FELICE M, D'ANGELO G, *et al.* MoVES: a framework for parallel and distributed simulation of wireless vehicular Ad hoc networks [J]. *Computer Networks*, 2008, 52(1): 155-179.
- [35] CONCEIC H, DAMAS L, FERREIRA M, *et al.* Large-scale simulation of V2V environments [C]//Proc of ACM Symposium on Applied Computing. New York: ACM Press, 2008; 28-33.
- [36] GRADINESCU V, GORGORIN C, DIACONESCU R, *et al.* Adaptive traffic lights using car-to-car communication [C]//Proc of the 65th Vehicular Technology Conference. 2007; 21-25.
- [37] NADEEM T, DASHTINEZHAD S, LIAO Chun-yuan, *et al.* TrafficView: traffic data dissemination using car-to-car communication [J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2004, 8(3): 6-19.
- [38] WEGENER A, HELLBRUCK H, WEWETZER C, *et al.* VANET simulation environment with feedback loop and its application to traffic light assistance [C]//Proc of GLOBECOM Workshops. 2008; 1-7.
- [39] SUMO manual [EB/OL]. (2008-02-14) [2009-03-21]. <http://sumo.sourceforge.net/docs/documentation.shtml>.

(上接第 1613 页)

- [12] HUANG P, OKI H, WANG Y. Energy-efficient computing for wildlife tracking: design tradeoffs and early experiences with ZebraNet [J]. *ACM Operating System Review*, 2002, 36(5): 96-107.
- [13] WANG Yu, WU Hong-yi. Replication-based efficient data delivery scheme (RED) for delay/fault-tolerant mobile sensor network (DFT-MSN) [C]//Proc of the 4th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshop. 2006; 485-489.
- [14] WANG Yong, JAIN S, MARTONOSI M. Erasure-coding based routing for opportunistic networks [C]//Proc of ACM SIGCOMM Workshop on Delay-tolerant Networking. New York: ACM Press, 2005; 229-236.
- [15] WANG Yu, WU Hong-yi. Delay/fault-tolerant mobile sensor network (DFT-MSN): a new paradigm for pervasive information gathering [J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2007, 6(9): 1022-1034.
- [16] 孙利民, 熊用平, 马健. 机会移动传感器网络中的自适应数据收集机制 [J]. *通信学报*, 2008, 29(11): 186-193.
- [17] LI Ze, SHEN Hai-ying. Utility-based distributed routing in intermittently connected networks [C]//Proc of the 37th International Conference on Parallel Processing. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008; 604-611.
- [18] PASZTOR B, MUSOLESI M, MASXOLO C. Opportunistic mobile sensor data collection with SCAR [C]//Proc of the 4th IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems. Piscataway: IEEE Press, 2007; 1-12.
- [19] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems [J]. *Journal of Basic Engineering*, 1960, 82(D): 35-45.
- [20] ZHU Jin-qi, CAO Jian-nong, LIU Ming, *et al.* A mobility prediction-based adaptive data gathering protocol for delay tolerant mobile sensor network [C]//Proc of IEEE Global Telecommunications Conference. New Orleans: IEEE Press, 2008; 1-5.