

WSANs 中基于跳步数自适应的路由算法

张光胜¹, 郭渊博², 徐振阳¹, 窦文华¹

(1. 国防科学与技术大学计算机学院, 湖南长沙 410073; 2. 解放军信息工程大学电子技术学院, 河南郑州 450052)

摘要: 无线传感反应网络是由大量传感节点和少量(可移动)资源丰富的反应节点构成. 传感节点负责收集外部环境信息, 而反应节点对外部环境实施相应的操作. 本文分析节点能量消耗模型, 求解出理想条件下单条路径上总能耗最小时的最优跳步数. 在此基础上, 提出了一种跳步数自适应的路由算法 HAR, 用来实现数据收集的实时需求与能量消耗之间的平衡. 仿真实验表明: HAR 算法在平衡能量消耗与时间延迟的性能上优于 HBMECT 算法, 而且能较好地适用于反应节点移动的情形.

关键词: 无线传感反应网络; 实时; 能量高效; 路由

中图分类号: TP212.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 01-0013-05

A Hop-adaptive Routing Algorithm for Wireless Sensor and Actor Networks

ZHANG Guang-sheng¹, GUO Yuan-bo², XU Zhen-yang¹, DOU Wen-hua¹

(1. Department of Computer Science, National University of Defense and Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

2. School of Electronic Science and Engineering, PLA University of Information Engineering, Zhengzhou, Henan 450052, China)

Abstract: Wireless sensor and actor networks (WSANs) are composed of a large number of sensors and a small number of (mobile) resource-rich actors. Sensors gather information about the physical phenomenon, while actors take decisions and then perform appropriate actions upon the environment. The paper analyzes the model of energy consumption, and solves the optimal number of hops when the total energy consumption in a path is minimal under the ideal condition. After that, a hop-adaptive routing algorithm (HAR) is proposed to realize the balance between the real-time requirement of data collection and the total energy consumption of the network. The extensive simulations show that, HAR algorithm is advantage to HBMECT algorithm with the balance of real-time and energy-consuming, and it adapts to the case of mobile actor.

Key words: wireless sensor and actor networks; real-time; energy-efficient; routing

1 引言

无线传感反应网络(Wireless Sensor and Actor Networks, WSANs)是由部署在监测区域内大量低成本、低功耗、具备感知、数据处理、存储和无线通信能力的传感节点, 以及少量具备处理和通信能力, 并能主动对外部环境实施操作, 且能量资源丰富(更长的电池寿命或者恒定电源)的反应节点通过自组织方式形成的网络, 其目的是由传感节点协作地采集、处理和传输网络覆盖区域中被感知对象的信息, 反应节点根据传感节点感知信息对外部环境实施相应的操作. 这种将功能强大的反应节点添加到传感器网络所形成的新型网络——无线传感反应网络, 极大地增强了传感器网络的应用能力, 具有更为广阔的应用前景, 如战场监视系统、核生化攻击检测系统、工业控制、家庭自动化系统和环境监测系统、健

康监测以及资产跟踪等^[1,2].

与 WSNs 相比, WSANs 具有如下特点^[2]: (1) 存在异类节点: 与传感节点不同, 反应节点能够主动对外部环境实施操作, 并且具有丰富的能源(更长的电池寿命或者恒定电源)、较强的计算和通信能力; (2) 追求实时需求: WSANs 中多数应用都有实时要求; (3) 存在多种协调: 为了提供高效的检测和反应, 分布式的局部协调机制是必要的, 如传感节点与传感节点协调、传感节点与反应节点协调、反应节点与反应节点协调; (4) 具有移动特性: 节点, 特别是反应节点, 可能是移动的.

在文献[3]中, Melodia 等提出构建传感节点至反应节点之间的数据聚合树方法, 以在满足数据收集时限条件下减少能量消耗. 在文献[4]中, Ngai 等提出一种数据聚合与优先级发送顺序相结合的事件报告框架. 在文献[5]中, Ngai 等提出了一种数据聚合与优先级调度队列

相结合的可靠事件报告框架.在文献[6]中,Melodia 等研究了反应节点移动带给 WSNs 协调和通信的难题,提出将限制反应节点的位置更新区域与传感节点预测反应节点位置相结合的机制,以减少位置更新的通信开销,同时通过调整发送功率方式以实现能量消耗与时间延迟的平衡.在文献[7]中,Yuan 等提出传感节点分簇和构建簇首节点至反应节点之间最短路径树方法,实现事件信息的收集.在文献[8]中,Xu 等提出了跳步数受限条件下反应节点的选择模型,并用整数线性规划描述问题,最后提出一种分布式的近似算法.

文献[3~5,7]都是采用数据聚合技术来降低能耗.但在传感节点的数据关联度低或数据聚合代价过高的应用中,如火山监测,这种技术将不再适用.此外除文献[6]外,其它文献均没有考虑反应节点移动带给数据收集的影响,但文献[6]采用固定发送距离的方式,没有因为反应节点移动而对发送距离进行动态调整.

考虑 WSNs 反应节点移动对数据收集影响和传感节点能量低的特点,引入跳步数阈值 H 来刻画 WSNs 应用实时性这一重要特性,提出了跳步数自适应的路由算法(Hop-Adaptive Routing Algorithm, HAR).在 HAR 算法中,传感节点尝试查找这样的反应节点集,在满足跳步数约束的前提下,构造从事件区内的源节点至该集合中相应的反应节点最小能量路径,使数据包能够以一种能量高效的方式进行传送.仿真结果表明,HAR 算法具有良好的平衡能量消耗与时间延迟的性能.

2 跳步数自适应的路由算法

2.1 前提假设

本研究做了如下假设:(1)每个节点能够获取自己的位置,节点位置可通过配备 GPS 接收器^[9]获得,或由定位服务器^[10]来提供;(2)使用全向天线;(3)网络中同类节点具有相同的能力,反应节点通信半径可任意调整,可与区域内任意节点进行通信.

2.2 能量消耗模型分析

在介绍算法之前,我们先分析在理想条件下传输数据消耗能量最小时所需的跳步数.采用文献[11]中的能量消耗模型:

$$E_{Tx} = E_{elec} \times l + \beta \times d^\alpha \times l \quad (1)$$

$$E_{Rx} = E_{elec} \times l$$

在该模型中, E_{Tx} 为节点向距离为 d 的节点发送 l bit 数据的能耗, E_{Rx} 为节点接收数据的能耗,它与距离无关,只与数据量有关.其中, E_{elec} 为无线通信电路的能耗, α 为周边环境的路径损耗系数,通常取[2,5], β 为常量.

对于一个转发节点,接收 l bit 并转发至距离为 d

的下一节点所需的能量消耗 $P_{relay}(d)$:

$$P_{relay}(d) = 2 \times E_{elec} \times l + \beta \times d^\alpha \times l \quad (2)$$

实时性是 WSNs 应用的一个重要特性,为此我们引入一个跳步数阈值 H 以刻画实时需求.

给定源节点 S 、反应节点 A 以及 S 与 A 之间的距离 D .考虑 WSNs 实时性的要求,源节点 S 发送 l bit 数据给反应节点 A 最多允许 $(H-1)$ 个转发节点(即最大跳步数为 H),下面来分析如何选取转发节点,使得从 S 至 A 路径上所有节点的总能耗最小.

我们先假定在 S 和 A 之间有 $K-1$ 个转发节点,如图 1 所示,则节点的总能耗为

$$P_{S \rightarrow A} = \sum_{i=1}^K P_{relay}(d_i) - E_{elec} \times l \quad (3)$$

由于源节点 S 不需要接收数据,同时反应节点 A 的接收能量与中间转发节点的个数无关,是固定的,因此我们将忽略项 $E_{elec} \times l$.

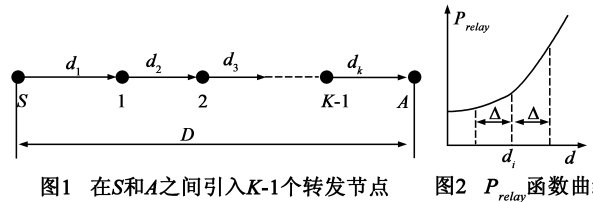


图1 在S和A之间引入K-1个转发节点 图2 P_{relay} 函数曲线

定理 1 给定源节点 S 、反应节点 A 和转发节点的个数 $(K-1)$.设 S 与 A 之间的距离为 D ,则当每跳距离 $d_i (1 \leq i \leq K)$ 都等于 D/K 时, $P_{S \rightarrow A}$ 最小.

如图 2 所示, $P_{relay}(d)$ 为严格的凸函数,由 Jensen 不等式可直接得出结论.而且对于任意 $(\Delta > 0)$,当 $d_i - \Delta \geq 0$ 时,有 $P_{relay}(d_i + \Delta) - P_{relay}(d_i) > P_{relay}(d_i) - P_{relay}(d_i - \Delta)$.

推论 1 给定源节点 S 、反应节点 A , S 与 A 之间的距离为 D ,当 $P_{S \rightarrow A}$ 最小时,或者没有转发节点,或者有 $K_{opt} - 1$ 个等距离的转发节点,其中 K_{opt} 完全由 D 决定.

定理 2 最佳跳步数 K_{opt} 总是取下列两个值中的一个:

$$K_{opt} = \left\lfloor \frac{D}{d_{char}} \right\rfloor \text{ 或者 } \left\lceil \frac{D}{d_{char}} \right\rceil \quad (4)$$

其中距离 d_{char} 被称为特征距离(characteristic distance),与距离 D 无关,可由下式计算得到:

$$d_{char} = \alpha \sqrt{\frac{2 \times E_{elec}}{\beta(\alpha - 1)}} \quad (5)$$

证明 由推论 1 可知,当 $P_{S \rightarrow A}$ 最小时,存在 $K_{opt} - 1$ 个等距离的转发节点,即相邻发送与接收节点之间的距离 d_i 均相等(用 d 统一表示,显然 $d = D/K_{opt}$).由于发送的 bit 数并不影响最佳跳步数的求解,因此在下式中只考虑发送 1 bit 时的能量消耗.

$$\begin{aligned}
P_{S \rightarrow A} &= \sum_{i=1}^K P_{relay}(d_i) - E_{elec} \\
&= K(2 \times E_{elec} + \beta d^\alpha) - E_{elec} \\
&= K(2 \times E_{elec} + \beta \left(\frac{D}{K}\right)^\alpha) - E_{elec}
\end{aligned}$$

将 $P_{S \rightarrow A}$ 对 K 求导, 并令 $P'_{S \rightarrow A} = 0$, 可求得最佳的跳步数:

$$K_{opt} = \sqrt[\alpha]{\frac{\beta(\alpha-1)}{2 \times E_{elec}}} D = \frac{D}{\sqrt[\alpha]{\frac{2 \times E_{elec}}{\beta(\alpha-1)}}} = \frac{D}{d_{char}}$$

由于跳步数只能为整数, 所以最佳跳步数 K_{opt} 总是取下列两个值中的一个:

$$K_{opt} = \left\lfloor \frac{D}{d_{char}} \right\rfloor \text{ 或者 } \left\lceil \frac{D}{d_{char}} \right\rceil \quad (6)$$

考虑 $P_{S \rightarrow A}$ 对 K 的二阶导数

$$P''_{S \rightarrow A} = \alpha(\alpha-1) D^\alpha K^{-\alpha}$$

由于 α 取值为 $[2, 5]$, 而且 $K > 0$, 所以 $P''_{S \rightarrow A} > 0$. $P_{S \rightarrow A}$ 也是一个凸函数, 当 $K > K_{opt}$ 时, K 偏离 K_{opt} 越大, $P_{S \rightarrow A}$ 增加越快.

K_{opt} 是理想化的最佳跳步数, 它要求所有的转发节点均位于源节点至反应节点的线段上且每跳距离相等, 这在节点随机部署的环境下是不现实的. 此外, 还必须考虑传感节点的通信距离 r . 当 $r \leq d_{char}$ 时, 跳步数 H 的选取并没有意义. 因为跳步数的增加, 一方面会增加时间延迟, 另一方面并不能减少网络的总能耗; 当 $r > d_{char}$ 时, 所选取的跳步数 H 越逼近 K_{opt} , 越能够降低网络总能耗. 在给定跳步数阈值 H 时, 采用下式来修正 H 值:

$$H = \begin{cases} \left\lceil \frac{D}{r} \right\rceil, & \text{当 } r \leq d_{char} \text{ 时} \\ \min\{K_{opt}, H\}, & \text{当 } r > d_{char} \text{ 时} \end{cases} \quad (7)$$

2.3 算法设计

源节点与反应节点间的距离越近, 越有助于降低反应节点接收到数据报告的延迟. 当有多个反应节点时, 事件区域内的源节点只需依据自己和反应节点的位置信息, 确定自己的目标节点, 并通过地理位置路由将数据包发送给目标节点.

在给定跳步数 H 后, 由定理 1 可知: 每跳距离均相等时路径上的总能耗最小, 因此我们算法的思想就是使每跳的距离长尽可能与 D_{sd}/H 相近, 以达到减少网络总能耗的目的.

为了满足跳步数阈值 H 约束, 我们修改了地理位置路由算法, 在数据包中增加两个字段: 整形字段 Hops, 用于记录数据包到达目标节点需要的跳步数; 浮点字段 Dist, 用于记录每跳距离, 每跳距离应尽量与 Dist 相接近. 算法步骤如下:

Step1 确定部署的网络环境后, 确定能量消耗模型中所对应的参数 α, β . 用式(5)计算出每个传感节点的 d_{char} 值.

Step2 当传感节点探测到事件时, 节点用预先设置的跳步数阈值 H 和式(6)计算出实际跳步数 h , 再由到目标节点的距离计算出每跳距离 D_{sd}/h , 并分别设置在数据包中的 Hops 和 Dist 字段, 然后将数据包发送到下一跳节点.

Step3 选择转发节点. 当节点 i 生成或接收到一个数据包时, 它先提取数据包内的信息 Dist 和跳步数 H_i (即 Hops 字段值). 然后, 确定是否存在这样的邻居节点集 T : 这些节点位于以目标节点 d 为中心、以 $(H_i - 1) * Dist$ 为半径的圆内.

如果集合 T 不为空, 节点 i 将从集合 T 中选择距离最近的节点 j 作为自己的转发节点, 即节点 j 满足: $d_{jd} < d_{id}$, 且 $d_{ij} < d_{ik}, \forall k \in T, k \neq j$. 如果集合 T 为空, 则选择最接近目标节点 d 的邻居节点作为转发节点.

在转发前, 将跳步数 H_i 减 1.

重复 step3 直到最后一跳.

图 3 显示查找转发节点的策略图. 在集合 T 非空时, 如图 3(a) 所示, 节点 i 有两个邻居节点 m 和 j 位于集合 T 中, 当 $d_{im} < d_{ij}$ 时, 则节点 i 将选择节点 m 作为下一跳的转发节点. 在集合 T 为空时, 如图 3(b) 所示, 节点 i 将选择最接近目标节点 d 的节点 j 作为转发节点.

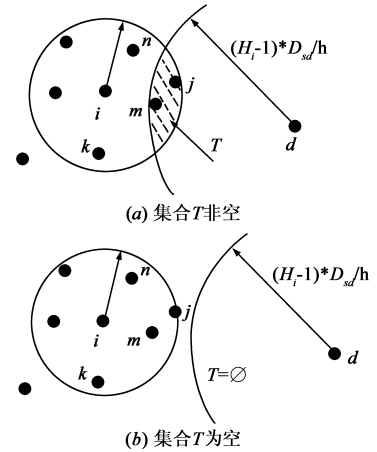


图3 选择转发节点的策略

为了避免反应节点移动所造成的不间断地信息广播, 我们引入一个距离阈值(记为 D_r): 当移动距离超过距离阈值时, 反应节点才将自己的位置更新消息广播给周边的传感节点. 当距离阈值过小时, 位置更新比较频繁, 将会产生大量的消息开销. 当距离阈值过大时, 将会出现过多消息传送失败情形. 在后面的实验中, 距离阈值基于传感节点的传输距离确定.

Step4 选择最后一跳. 为了避免反应节点移动造成的传感节点消息报告的失败, 我们对算法中选择最

后一跳时增加约束:当最后一跳距离不大于传感节点的通信半径与距离阈值的差值时,传感节点才能将数据包直接发送给反应节点,否则必须通过其它节点进行转发.如图4所示,传感节点的通信距离为 r , D_r 为传感节点的通信距离与距离阈值的差值,即 $(r - D_r)$.虚三角形表示反应节点 a 上次位置更新时的位置,实三角形为当前位置,并且两个三角形之间的距离 d 小于距离阈值 D_r .由于反应节点 a 移动的距离 d 小于距离阈值 D_r ,因此它并不需要广播自己的位置信息.在传感节点 i 中,仍记录着节点 a 上次更新时的位置,认为节点 a 是自己的通信范围内,可以将数据包直接发送给节点 a .但实际上,反应节点 a 已不在传感节点 i 的通信范围之内了.因此节点 i 只能通过节点 m, j 或者 k 转发,而不能将数据包直接发送给节点 a .

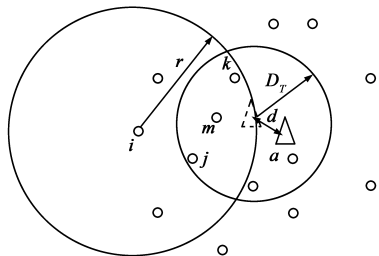


图4 传感节点最后一跳的选择策略

当传感节点的通信半径 $r > d_{char}$ 且跳步数阈值 $H < K_{opt}$ 时,可为不同类型事件设置不同的跳步数阈值 H ,还可起到区分服务的目的.

3 性能评估

为了检验和分析 HAR 算法性能,我们将其与 HBMECT 算法^[8]进行比较分析.我们在 J-Sim^[12]下实现了 HAR 算法和 HBMECT 算法. HBMECT 算法采用了跳步数固定的路由机制.在一个 $200\text{m} \times 200\text{m}$ 的区域中,随机布撒着 200 个传感节点.传感节点最大通信距离为 40m,带宽为 250 kbit/s.

表 1 仿真参数

部署区域	$200 \times 200 \text{ m}^2$
传感节点	200 个
最大通信距离	40 m
带宽	250 kbit/s
包长	56 字节
报告速率	1 个/s
仿真时间	400 s

传感节点每秒发送一个长度为 56 bytes 的数据包,队列长度设为 20 个包. MAC 层采用 IEEE 802.11 协议.我们将多次随机拓扑实验结果求均值,其中每种拓扑仿真实验为 400 秒.能量模型中的参数设置: $E_{elec} = 50 \text{ nJ/bit}$, $\beta = 100 \text{ pJ/bit/m}^a$, $\alpha = 2.5$.由式(5)可算出 $d_{char} \times 13.48\text{m}$.仿真参数见表 1.

图 5、图 6 为平均能量消耗和平均延迟随跳步数阈值变化的曲线图.事件区域内的传感节点将探测到的数据报告给反应节点.事件区域是一个半径为 40m 的圆,

在部署区域右侧 $100\text{m} \times 200\text{m}$ 内随机选择,但整个事件区域均在部署区域内.反应节点放置在部署区域左侧中央.图 5、图 6 中表示不同节点密度下的仿真结果.当传感节点个数为 200 时约有 23 个节点在事件区域内,而在传感节点个数为 400 时,则约有 46 个.在这两种不同密度情形下,算法在平均能量消耗和平均延迟上的变化趋势是一致的.在节点密度较低时, HAR 算法与 HBMECT 算法的平均能量消耗开始随跳步数阈值增加而降低,同时平均延迟增加,但在跳步数阈值大于 12 之后, HAR 算法的性能趋于平稳,平均能量消耗和平均延迟基本不变.而 HBMECT 算法在平均延迟上仍继续增加,并且在平均能量消耗上也逐步增加.这与前面的理论分析是一致的,当跳步数超过最优跳步数时,能量消耗并不能降低,反而会增加.当节点密度较大时,源节点至反应节点路径将更趋向理想条件下的最优路径,从而降低节点的平均能量消耗,同时密度增加导致数据包传送冲突的增加,导致延迟增加.

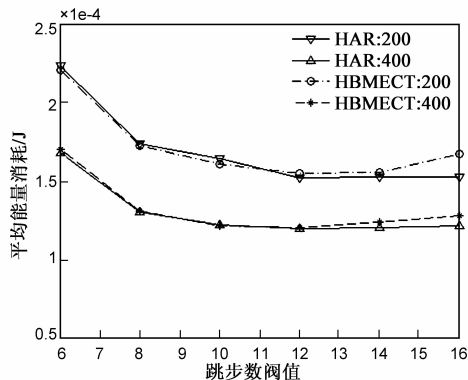


图5 平均能量消耗随跳步数阈值变化的曲线图

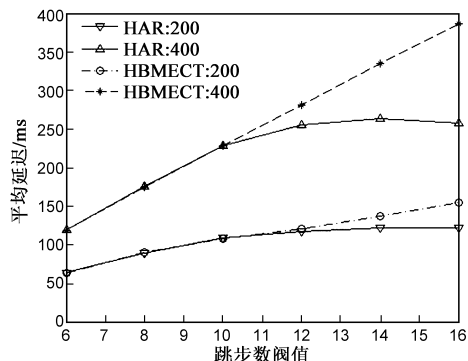


图6 平均延迟随跳步数阈值变化的曲线图

下面我们将测试反应节点移动对 HAR 和 HBMECT 算法的影响.图 7、图 8 为平均能量消耗和平均延迟随移动节点速度变化的曲线图.将两种算法的跳步数阈值设为 8,反应节点采用随机方式移动.从图 7、图 8 中可以看出,尽管随机移动的最大速度不同,但 HAR 算法在平均能量消耗和平均延迟上均优于相对应的 HBMECT 算法.这是由于反应节点移动使源节点至反应节

点的距离不断改变,致使最优跳步数也发生变化的原因,而采用跳步数固定的 HBMECT 算法无法对这种变化做出调整,导致其性能不如 HAR 算法.

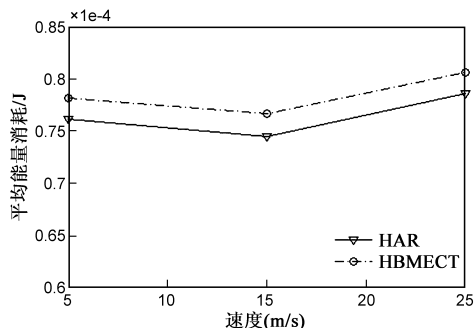


图7 平均能量消耗随速度变化的曲线图

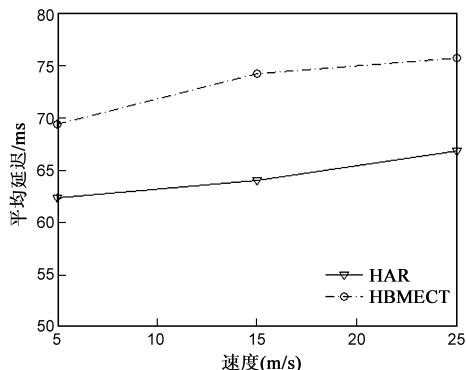


图8 平均延迟随速度变化的曲线图

4 结论

本文针对 WSANs 应用的实时需求和传感节点能量低的特性,提出跳步数自适应的路由算法 HAR. 通过设定源节点到目的反应节点的跳步数,在降低平均能量消耗的同时保证数据收集仍然满足实时需求. 通过能量消耗模型的分析,得出适合采用跳步数调整能量消耗和时间延迟平衡的条件. 为了适应反应节点移动, HAR 算法采用动态调整跳步数机制,以保持性能的平衡. 仿真实验表明: HAR 算法能够较好地调整能量消耗与时间延迟之间的平衡,而且还适用于反应节点移动的情形.

参考文献:

- [1] I F Akyildiz, W Su, Y Sankarasubramaniam, E Cayirci. Wireless sensor networks: a survey[J]. Computer Networks (Elsevier) Journal, 2002, 38(4): 393 - 422.
- [2] I F Akyildiz, I H Kasimoglu. Wireless sensor and actor networks: research challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2004, 2(4): 351 - 367.
- [3] Tommaso Melodia, Dario Pompili, Vehbi C Gungor, Ian F Akyildiz. A distributed coordination framework for wireless sensor and actor network[A]. Proceedings of ACM MobiHoc'05[C]. Urbana-Champaign, Illinois, USA, 2005.
- [4] E C H Ngai, M R Lyu, J Liu. A real-time communication

framework for wireless sensor-actuator networks[A]. Proc. of the IEEE Aerospace Conference[C]. Big Sky, Montana, U. S., Mar 2006.

- [5] Edith C H Ngai, Yangfan Zhou, Michael R Lyu, Jiangchuan Liu. Reliable reporting of delay-sensitive events in wireless sensor-actuator networks[A]. MASS06, Third IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems[C]. October 9 - 12, 2006, Vancouver, Canada.
- [6] T Melodia, D Pompili, I F Akyildiz. A communication architecture for mobile wireless sensor and actor networks[A]. Proceedings of IEEE SECON 2006[C]. Reston, VA, September 2006.
- [7] H Yuan, H Ma, H Liao. Coordination mechanism in wireless sensor and actor networks[A]. 1st IEEE Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences (IMSCCS 2006), vol. 2 [C]. 2006. 627 - 634.
- [8] Xu Z Y, Zhang G S, Dou W H, Fu Q. A hop-bounded single-actor selection algorithm for wireless sensor and actor networks[A]. Proceeding of the 2006 International Conference on Communications and Mobile Computing, IWCMC'06[C]. Canada, 2006. 1067 - 1072.
- [9] J G McNeff. The global positioning system[A]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. vol. 50 [C]. Mar 2002. 645 - 652.
- [10] Jinyang Li, J Jannotti, D S J De Couto, D R Karger, R Morris. A scalable location service for geographic ad hoc routing [A]. Proc. of. ACM MobiCom[C]. August 2000.
- [11] M Bhardwaj, T Garnett, A Chandrakasan. Upper bounds on the lifetime of sensor networks[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Communications, vol. 3 [C]. Helsinki, Finland, June 2001. 785 - 790.
- [12] J-Sim[OL]. <http://www.j-sim.org/>.

作者简介:



张光胜 男, 1970 年出生于河南商城, 1992 年毕业于西北工业大学宇航工程系, 1995 年毕业于国防科技大学电子技术系. 博士, 高级工程师. 主要从事计算机网络与通信、软件工程、仿真、网络安全等领域的研究.
E-mail: gszhang@nudt.edu.cn

郭渊博 男, 1975 年出生于陕西周至, 博士, 河南郑州解放军信息工程大学电子技术学院 401 教研室副教授, 主要研究领域为信息安全与信息可生存性, 出版专著 2 部, 在重要学术期刊发表论文 20 余篇.

徐振阳 男, 1977 年出生于江苏徐州, 国防科学与技术大学计算机学院博士研究生, 主要研究领域为传感器网络、传感反应网络.

窦文华 男, 1946 年出生于山西运城, 国防科学与技术大学计算机学院教授, 博士生导师, 主要研究领域为传感器网络、传感反应网络、光网络、多媒体网络和网络安全.