

多 Sink 的无线多媒体传感器网络路由算法

张军强^{1,2}, 王汝传^{1,3}

(1. 南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210003;

2. 南京工业大学 计算机科学与技术学院, 江苏 南京 210009;

3. 江苏省无线传感网高技术研究重点实验室, 江苏 南京 210003)

摘要:随着无线多媒体传感器网络的发展,单 Sink 节点网络逐渐难以满足多媒体信息传输的可靠性和实时性等要求,而多 Sink 节点网络可以有效减少数据平均传输距离、平衡网络整体能耗。针对多 Sink 节点的无线多媒体传感器网络,结合网络的服务质量(QoS)保障要求,提出了基于蚁群优化的 QoS 保障多径路由算法。该算法考虑网络的实时性、带宽、延迟等多 QoS 保障要求,基于改进蚁群算法,以路径的带宽、时延、丢包率及最小剩余能量等作为路径的评价指标,综合考虑 Sink 节点的负载能力,选择质量较高的路径进行数据传输,实现了 QoS 保障的多径路由算法。以 OMNeT++ 和 Matlab 为平台,对所提出的算法进行了仿真实验与分析。仿真结果表明,所提出的算法能有效地平衡网络负载,降低网络丢包率,延长网络生命周期。

关键词:无线多媒体传感器网络;多 Sink;多径路由;服务质量

中图分类号:TP393

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2017)07-0020-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2017.07.005

A Routing Algorithm for Multi-sink Wireless Multimedia Sensor Networks

ZHANG Jun-qiang^{1,2}, WANG Ru-chuan^{1,3}

(1. College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China;

3. Jiangsu High Technology Research Key Laboratory for Wireless Sensor Networks, Nanjing 210003, China)

Abstract: With the development of Wireless Multimedia Sensor Networks (WMSNs), the network of a single sink node is gradually difficult to meet the requirements of real-time and reliability. Multiple sink nodes network can effectively reduce the data average transmission distance and balance networks energy. A multi-path routing algorithm based on ant colony optimization has been proposed for multi-sink WMSNs according to the Quality of Service (QoS) requirements related to various applications, which takes several QoS requirements such as the bandwidth, end-to-end delay, packet loss, reliability and so on into account. Then a multi-path routing algorithm has been constructed with improved ant colony algorithm, which can evaluate a path with several QoS parameters and the capacity of the sink node. The simulations have been conducted with OMNeT++ and Matlab. The results of experiment show that the new algorithm can effectively balance the traffic load, reduce packet loss probability and prolong the network lifetime.

Key words: Wireless Multimedia Sensor Networks (WMSNs); multi sink; multi-path routing; Quality of Service (QoS)

1 概述

无线多媒体传感器网络(Wireless Multimedia Sensor Networks, WMSNs)是由大量的多媒体节点组成的

自组织网络,这些多媒体节点装备有照相机、摄像头、麦克风等传感设备,可以采集语音、图像、视频等多媒体信息,实现全面、精准的复杂环境监测。WMSNs 增

收稿日期:2016-07-05

修回日期:2016-10-20

网络出版时间:2017-04-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61170065, 61202355);江苏省自然科学基金(BK2012436);江苏省科技支撑计划项目(BE2010197, BE2011844);省属高校自然科学研究重大项目(12KJA520002);高校科研成果产业化推进工程项目(JHB2012-7);江苏高校科技创新计划项目(CXZZ12_0479)

作者简介:张军强(1976-),男,博士生,讲师,研究方向为无线传感器网络、数据融合等;王汝传,教授,博导,通信作者,研究方向为无线传感器网络、计算机软件、计算机网络、信息安全、移动代理等。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.tp.20170428.1703.044.html>

强和扩展了传统无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)的应用,可广泛应用于工业控制、环境事件监测、战场军事等领域^[1]。WMSNs 采集和传输声音、图像、视频等多媒体信息,要求网络具有一定的服务质量(Quality of Service, QoS),以满足网络的实时性、带宽、延迟等要求^[2-3]。

多径路由是 WMSNs 路由协议研究重点之一,相比于单径路由,多径路由算法可以在多条传输路径之间优化选择部分或全部路径进行数据传输,平衡网络负载,提高信息传输的可靠性和网络生存期。SAR 路由协议^[4](Sequential Assignment Routing)主要从路径能耗、端端时延及数据包的优先级三方面对路径进行评估,是基于 QoS 感知的多径路由协议。但该协议的全局路由信息维护较为复杂,易导致较大网络能耗,不适用于较大规模的无线传感器网络。文献[5]在传输可靠性和实时性方面提供差异化的 QoS 服务,具有较好的可扩展性。但该协议数据包的多路径计算较为复杂且对于网络能耗考虑较少。针对 WMSNs 网络的特点和 QoS 保障需求,国内外已展开大量研究工作。TPGF^[6](Two-Phase Geographic greedy Forwarding)是基于地理位置的贪心转发路由协议,该协议使用多条路径来传输多媒体数据,实现网络能耗均衡。该协议通过对已发现的多路径进行优化,提供最小时延的 QoS 保障,但未考虑其他 QoS 保障要求。文献[7]以多媒体数据的相关性为基础,对数据进行网内编码,减少传输数据量,再通过多条路径传输以减少网络拥塞。该算法能减少网络能量消耗,满足网络的时延和可靠性保障要求。文献[8]基于图的染色理论和合作博弈论建立节点收益模型,并在该模型基础上建立节点不相交的多径路由算法。该算法可以平衡网络节点能耗,提高数据传输效率。文献[9]建立多径路由进行多媒体视频流传输,根据视频数据的重要性,选择相应路径进行传输,提高了视频传输性能。文献[10]提出了能量感知的实时数据传输路由协议,该协议可以提高数据传输效率,保障网络实时性要求。

文献[4-10]在设计多径路由算法时,均基于单 Sink 节点网络。当单 Sink 节点网络规模较大时,网络中的数据需经由多跳路由将数据传输至 Sink 节点, Sink 附近节点能量消耗过快,易引起网络空洞。极端情况下,单 Sink 节点的失效会引起整个网络崩溃。在多 Sink 节点网络中,传感数据可以传输至较近的 Sink 节点,有效减少传感器节点到 Sink 节点的数据平均传输距离,平衡网络整体能耗。现有文献大多未考虑多 Sink 节点网络情况,不完全适合多 Sink 节点网络,需要根据多 Sink 节点网络结构特点和需求对路由协议进行重新设计或调整。PBR 路由协议[11](Priority

Based Routing)是一种多 Sink 路由协议。该协议综合考虑节点剩余能量和路径传输能耗,使得网络能耗负载均衡,但计算量大,不适合于动态变化的网络。文献[12]提出了多 Sink 路由协议 ORFCE(Optimal Routing in multi-sink sensor networks based on Fuzzy Comprehensive Evaluation),该协议基于模糊综合评价,从路径最小剩余能量、路径平均链路质量、节点到 Sink 的跳数三方面对传输路径进行评估。文献[13]提出了 QoS 感知的机会路由算法(QoS-aware Multi-sink Opportunistic Routing, QMOR),可以减少冗余多媒体数据、增强数据传输效率。文献[14]提出了基于多 Sink 的分布式功率控制算法,可以有效降低网络整体能耗,但其只适用于长链状无线传感器网络。

针对多 Sink 的无线多媒体传感器网络,考虑网络的多 QoS 保障要求,提出了基于多 Sink 的 QoS 多径路由算法(QoS Routing Algorithm for Multi-sink Network, QRAMN)。蚁群算法是基于概率的分布式启发优化算法,具有较强的鲁棒性和容错性,适用于解决 WMSNs 的路由选择问题。QRAMN 算法优先考虑了网络的实时性、带宽、延迟等多 QoS 保障要求,基于改进蚁群算法实现了 QoS 保障的多径路由算法。以 OMNeT++ 和 Matlab 为仿真平台,对提出算法进行了仿真验证与分析。

结果表明,该算法可以有效平衡网络负载,降低网络丢包率,增加网络生命期。

2 网络模型及相关定义

2.1 网络模型

假设 N 个无线多媒体传感器节点(v_1, v_2, \dots, v_N) 在二维平面监测区域内随机部署,节点采用有向感知模型。除多媒体节点外,网络还包含若干能量不受限的 Sink 节点。传感数据到达任何一个 Sink 节点,即表示数据传输成功。网络具有以下性质:

(1) 所有节点同构,初始能量相同。

(2) 所有节点均为全功能节点,可进行数据采集与数据转发。

(3) 在该封闭平面周边部署多个 Sink 节点负责数据汇聚, Sink 节点不可移动。

(4) 网络可表示为带权有向图 $G(V, E)$, 其中, V 表示网络中所有节点的集合,包括全部传感器节点与所有 Sink 节点; E 为节点间所有通信链路的集合。

(5) 路径是从源节点到 Sink 节点一跳或多跳的路径序列集合, $p = (v_{ch}, v_a, v_b, \dots, s)$ 表示一条从源节点 v_{ch} 到 Sink 节点 s 的路径。

2.2 能耗模型

网络能耗模型如式(1)及式(2)所示。

$$E_{TX}(k, d) = kE_{elec} + k\varepsilon_{amp}d^2 \quad (1)$$

$$E_{RX}(k) = kE_{elec} \quad (2)$$

其中, E_{TX} 表示无线通信模块发送 k bits 数据的能耗模型; E_{RX} 表示接收 k bits 数据时的能耗模型, 在接收数据时, 不需要考虑功率放大产生的能耗; E_{elec} 表示发送与接收电路单位能耗; ε_{amp} 表示发送放大电路单位能耗; d 表示收发节点间距离。

2.3 问题定义

在网络模型基础上, 有以下定义。

定义 1: Sink 节点负载能力 U_s 。

网络部署完成后, 每个传感节点与较近 Sink 节点建立传输路径。为了平衡 Sink 节点的处理能力, 每个 Sink 节点最多只能与若干普通节点建立传输路径, 称为 Sink 节点负载能力。

定义 2: 链路 QoS 参数^[15]。

路径表示从源节点到 Sink 节点的路径序列集合。以带宽、时延、丢包率、路径最小剩余能量、节点跳数作为路径的主要 QoS 参数, 定义如下:

$$B(p) = \min\{B(i), i \in p\} \quad (3)$$

$$D(p) = \sum_{i \in p} D(i) \quad (4)$$

$$L(p) = 1 - \prod_{i \in p} L(i) \quad (5)$$

$$E(p) = \min\{E(i), i \in p\} \quad (6)$$

其中, $B(p)$ 、 $D(p)$ 、 $L(p)$ 、 $E(p)$ 分别表示路径 p 的带宽、时延、丢包率及路径中最小能量节点的剩余能量。

数据采集节点到 Sink 节点的距离越短, 网络的能量消耗越少, 因此, 多媒体节点到 Sink 节点的跳数是表达链路质量的重要参数, 以 $H(p)$ 表示路径 p 的节点跳数。在建立多径路由过程中, 链路的 QoS 参数均有相应的约束条件, 以满足网络的基本要求。约束条件如式(7)所示:

$$\begin{aligned} B(p) &\geq B_{\min}, D(p) \leq D_{\max}, E(p) \geq E_{\min} \\ L(p) &\leq L_{\max}, H(p) \leq H_{\max} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, B_{\min} 为网络的最小带宽; D_{\max} 为网络的最大时延; L_{\max} 为网络的最大丢包率; E_{\min} 为节点的最小剩余能量; H_{\max} 为网络允许的最大节点跳数。

定义 3: 链路质量评价函数 $f(p)$ ^[15]。

依据路径评价中的 QoS 参数, 链路质量评价函数定义如下:

$$\begin{aligned} f(p) &= \gamma^b[B(p) - B_{\min}] + \gamma^d[D_{\max} - D(p)] + \\ &\gamma^l[1 - L(p)] + \gamma^e[E(p) - E_{\min}] + \\ &\gamma^h[H_{\max} - H(p)] \end{aligned} \quad (8)$$

其中, γ^b 、 γ^d 、 γ^l 、 γ^e 、 γ^h 分别表示带宽、时延、丢包率、剩余能量和节点跳数的权重因子。

3 算法描述

蚁群算法模拟蚂蚁觅食过程, 是一种基于概率的分布式启发优化算法, 具有较强的鲁棒性和可扩展性, 适用于解决无线传感器网络的路由选择这类分布式问题。

3.1 人工蚂蚁数据结构

对于给定的网络部署方案, 每个传感器节点一个或多个 Sink 节点建立数据传输路径, 以优化蚁群算法建立 QoS 感知的多 Sink 路由。算法采用 2 种蚂蚁类型: 前向蚂蚁 (Forward ANT, FANT) 和返回蚂蚁 (Backward ANT, BANT)。FANT 负责从传感节点出发进行路径搜索, 到达任何一个 Sink 节点为止。BANT 从 Sink 节点返回源节点, 更新全局信息素。

FANT 主要由三部分构成, 包括节点跳数、遍历节点 ID 表和当前链路的 QoS 参数值。当前跳数为 FANT 从传感节点出发, 到达任何一个 Sink 节点所经历的跳数。为避免 FANT 产生长时间的无效寻路, 设定 FANT 的最大跳数限制, 作为 FANT 的生存期限 (Time To Live, TTL)。当 FANT 的跳数达到最大跳数限制, 则该 FANT 自动失效。遍历节点 ID 表包括 FANT 所访问的节点 ID 列表。当 FANT 到达某一节点时, 比较节点 ID 和已访问节点表, 避免形成回路。当前链路的 QoS 参数值如定义 2 所示, 主要包括 FANT 所经历节点形成链路的网络带宽、延迟、丢包率、最小剩余能量及节点跳数。

BANT 沿 FANT 的路径返回。BANT 数据结构主要包括返回路径表和链路评价质量。返回路径表是对应 FANT 已访问节点表的逆置。链路评价质量为链路评价函数的计算值, 依此更新全局信息素。

3.2 工作过程

网络工作时, 首先初始化网络参数, 主要参数包括每个节点的 FANT 数量及 Sink 节点负载能力 U_s 等。网络中的传感节点发送数据时, 查找路由表, 找出满足条件的路径进行数据传输。若路由表未找到合适路径, 则执行算法以建立多径路由。该算法主要包括两个阶段: 首先是传感节点发送 FANT 到 Sink 节点执行路由发现, 其次是 FANT 到达 Sink 节点后, 生成相应 BANT 进行信息素的全局更新。

基于蚁群优化的多 Sink 无线多媒体传感器网络路由由算法步骤如下:

(1) 传感节点的初始化。

主要包括传感节点的人工信息素和多径路由表的初始化。

(2) 节点生成并派出 FANT。

每个传感节点产生若干 FANT, 初始化 FANT 并派出执行路径搜索。FANT 的初始化包括设置 FANT 的

生存期限、FANT 已访问节点表等。

(3) 计算并更新 FANT。

当中间节点接收到 FANT 时,根据式(3)~式(6)计算并更新 FANT 节点链路的 QoS 参数值。FANT 的数据结构主要包括当前跳数、遍历节点 ID 表及 QoS 参数值。节点当前跳数超过 FANT 的生存期限时,该 FANT 自动失效。

(4) 更新链路信息素。

FANT 由 v_i 到达 v_j 后,依据式(9)更新链路信息素:

$$\tau(v_i, v_j) \leftarrow (1 - \sigma)\tau(v_i, v_j) + \sigma\tau_0 \tag{9}$$

其中, σ 介于 0~1 之间; τ_0 为信息素初始值。

(5) Sink 节点检查 FANT 并发送 BANT。

当 FANT 到达任何一个 Sink 节点,需计算并检验三项内容。第一步是检查当前关关节点数是否小于等于 Sink 节点负载能力,若当前 Sink 节点的关关节点数已超过其负载能力,丢弃并终止该 FANT,否则执行下一步。第二步是根据式(7)判断该 FANT 是否满足网络的 QoS 参数要求。若满足限制条件,继续执行下一步,否则终止该 FANT。第三步是计算路径评价函数,若不满足路径评价最低要求,丢弃并终止该 FANT。对满足条件的 FANT,生成相应 BANT,沿 FANT 路径返回。

(6) 更新全局信息素。

BANT 到达节点 v_u 后,更新链路信息素,节点 v_i 到节点 v_u 的信息素更新如下:

$$P_i(u) = \begin{cases} (1 - \rho)\tau(v_i, v_u) + \rho f(p), & v_u \in v_{\text{pass}} \\ (1 - \rho)\tau(v_i, v_u), & v_j \notin v_{\text{pass}} \end{cases} \tag{10}$$

其中, ρ 为信息素的挥发速度。

(7) 更新节点路由表。

BANT 返回源节点后,更新源节点的路由表。

4 仿真实验

4.1 参数配置

仿真实验平台采用的是 Matlab 和 OMNeT++。OMNeT++使用模块化组件,便于定义网络拓扑结构。网络节点数量设置为 50~200,采用随机部署方式,节点初始能量为 36 J。每个数据包的长度为 128 Byte。链路丢包率随机变化范围设定为[0,0.4]。链路带宽随机变化范围为[50,200] kbps。网络最大时延为 5 s。其余主要参数配置如表 1 所示。

4.2 算法性能比较

选择文献[11]提出的 PBR 算法作为 QRAMN 算法的仿真对比数据。首先从网络生命期、网络平均丢

包率两方面比较算法性能,然后通过实验分析 Sink 节点数量对网络生存期的影响。以上实验各进行 10 次,结果取平均值。

表 1 参数设置

参数	值
网络规模	300 m×300 m
节点数量	50~200
Sink 节点数量	1~4
节点感知半径/m	10
节点通信半径/m	20
感知偏向角/°	60
节点初始能量/J	36(3 batteries)

这里的网络生命期定义为网络开始运行到第 1 个节点死亡之间的时间。图 1 表示传感器节点数为 100 和 200 时的网络生命期,其中 Sink 节点数量设置为 3, Sink 节点负载能力设置为 50。

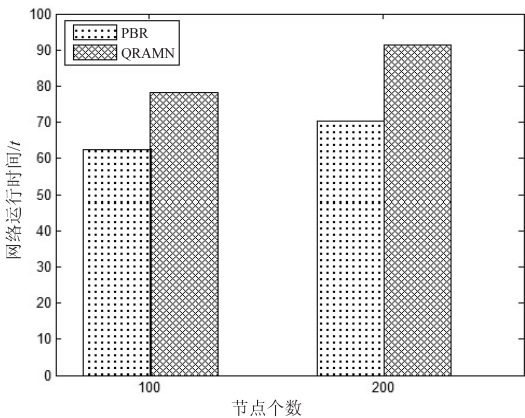


图 1 网络生命期

从图 1 可以看出,在传感器节点数量为 100 和 200 时,QRAMN 算法的网络生命期均高于 PBR 算法。PBR 算法从节点剩余能量和路径传输能耗出发进行路由发现,使得网络能耗负载较均衡,但其未考虑无线多媒体传感器的 QoS 感知要求及链路质量,且节点计算量较大,导致网络生命期较短。QRAMN 算法基于蚁群优化,依据多 QoS 参数对链路质量进行计算,从而选择若干最优链路进行数据传输,有效均衡网络节点能耗,提高了网络生命期。

网络丢包率是指单位时间内发送但未到达 Sink 节点的数据包数量与总发送数据包数量的比率,丢包率越高表明网络的可靠性越差。在某些应用中,为保证多媒体数据的分辨率或可恢复性等,要求网络的丢包率限制在一定范围内。QRAMN 算法与 PBR 算法的网络平均丢包率如图 2 所示。

从图 2 可以看出,随着网络运行时间的延长,失效节点增多,QRAMN 算法与 PBR 算法的网络平均丢包

率均逐渐变大,但 QRAMN 算法的网络平均丢包率明显低于 PBR 算法。由于 QRAMN 算法在建立多径路由过程中,考虑了多约束的 QoS 参数及节点跳数限制,选择质量较高的路径进行数据传输,降低了数据传输过程的丢包率,提高了网络的数据包交付率。

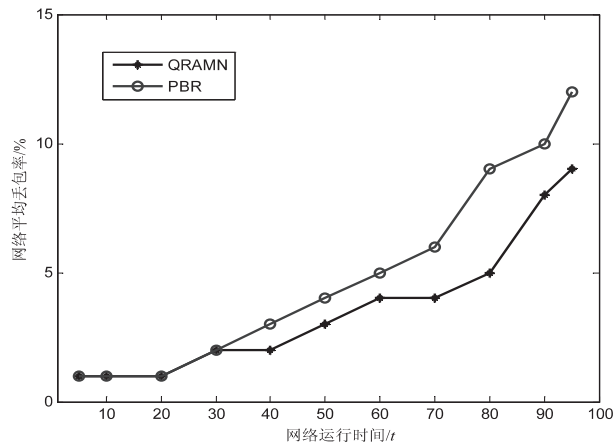


图 2 网络平均丢包率

Sink 节点数量变化对网络生存期的影响如图 3 所示。

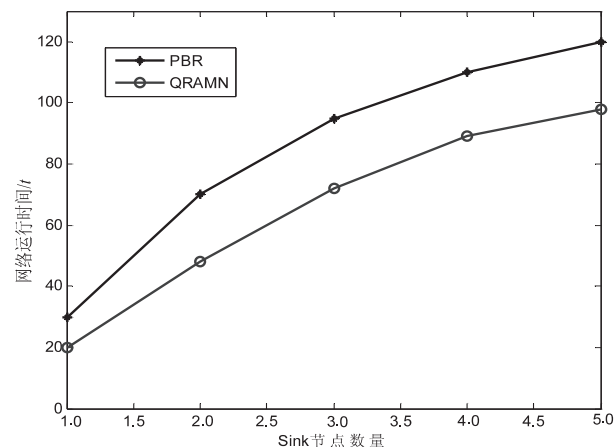


图 3 Sink 节点数量与网络寿命

从图 3 可以看出,当 Sink 节点数量从 1 增至 3 时,两种算法的网络生命期均有显著提高。Sink 节点从 3 增至 5 时,网络生命期的增长趋势变得缓慢。结果表明,当网络中 Sink 节点个数增加,传感节点到 Sink 节点的平均跳数变少,数据传输的能耗减少,网络生命期增加;当 Sink 节点个数到达一定数量时,Sink 节点数对网络生命期的影响逐渐降低。由于 Sink 节点的部署需要较大代价,所以,在实际应用中,Sink 节点的个数与网络需求应达到一定的平衡。

5 结束语

针对多 Sink 节点的无线多媒体传感器网络,提出了基于改进蚁群算法的 QoS 保障多径路由算法。仿真实验表明,该算法性能良好,可以满足应用相关的多约束 QoS 要求,具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Melodia T, Chowdhury K R. A survey on wireless multimedia sensor networks[J]. Computer Networks, 2007, 51 (4): 921-960.
- [2] Almalkawi I T, Zapata M G, Alkaraki J N, et al. Wireless multimedia sensor networks: current trends and future directions [J]. Sensors, 2010, 10 (7): 6662-6717.
- [3] Ehsan S, Hamdaoui B. A survey on energy-efficient routing techniques with QoS assurances for wireless multimedia sensor networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 14 (2): 265-278.
- [4] Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, et al. Protocols for self-organization of a wireless sensor network [J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7 (5): 16-27.
- [5] Felemban E, Lee C G, Ekici E. MMSPEED: multipath multi-speed protocol for QoS guarantee of reliability and timeliness in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5 (6): 738-754.
- [6] Shu L, Zhang Y, Wang Y, et al. TPGF: geographic routing in wireless multimedia sensor networks [J]. Telecommunication System, 2010, 44 (1): 79-95.
- [7] Dai R, Wang P, Akyildiz I F. Correlation-aware QoS routing with differential coding for wireless video sensor networks [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2012, 14 (5): 1469-1479.
- [8] 孙仁科, 丁恩杰, 阮娜, 等. WMSNs 节点不相交多路径 QoS 路由算法 [J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41 (6): 999-1004.
- [9] 曹啸, 王汝传, 黄海平, 等. 无线多媒体传感器网络视频流多路径路由算法 [J]. 软件学报, 2012, 23 (1): 108-121.
- [10] Rhee S, Choi H Y, Lee H J, et al. Power-aware data transmission for real-time communication in multimedia sensor networks [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014 (2): 1-12.
- [11] Meng M, Xu H, Wu X, et al. PBR: priority based routing in multi-sink sensor networks [C]//Proceedings of international conference on wireless networks. Las Vegas: CSREA Press, 2007: 380-386.
- [12] Yuan T, Xu J, Zhang J, et al. Optimal routing in multi-sink sensor networks based on fuzzy comprehensive evaluation [C]//International conference on system science, engineering design and manufacturing informatization. [s. l.]: IEEE, 2011: 250-254.
- [13] Shen H, Bai G W, Tang Z, et al. QMOR: QoS-aware multi-sink opportunistic routing for wireless multimedia sensor networks [J]. Wireless Personal Communications, 2014, 75 (2): 1307-1330.
- [14] 夏旭, 陈志刚, 曾锋, 等. 基于多 Sink 的长链状无线传感器网络功率控制算法 [J]. 传感技术学报, 2015, 28 (6): 920-926.
- [15] 孙仁科. 无线多媒体传感器网络 QoS 路由优化算法研究 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2013.