



基于最小费用最大流的无线多媒体传感网多路径路由算法^{*}

陈友荣¹, 周骏华², 王章权¹, 任条娟¹

(1. 浙江树人大学信息科技学院 杭州 310015; 2. 杭州中威电子股份有限公司 杭州 310012)

摘要:为了解决多媒体数据的实时传输和网络生存时间优化问题,提出基于最小费用最大流的无线多媒体传感网多路径路由算法(MRAMCMF)。MRAMCMF分析了数据传输能耗、节点剩余能量和最小数据传输时延,提出了新的权值函数,并利用最小费用最大流算法构建多路径的数据路由方案。所有多媒体传感节点沿着多个传输路径将数据传输到sink节点。仿真结果表明,该算法能延长网络生存时间,降低和平衡节点能耗,降低数据传输时延,在一定的条件下,比Ratio_w算法和TPGF算法更优。

关键词:无线多媒体传感网;网络生存时间;最小费用最大流;数据传输时延

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.12.008

Multi-Path Routing Algorithm Based on Minimum Cost Maximum Flow for Wireless Multimedia Sensor Network

Chen Yourong¹, Zhou Junhua², Wang Zhangquan¹, Ren Tiaojuan¹

(1. College of Information Science and Technology, Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310015, China;

2. OB Telecom Electronics Co., Hangzhou 310012, China)

Abstract: There are real-time transmission problem of multimedia data and network lifetime optimization problem in wireless multimedia sensor networks. In order to solve the problems, multi-path routing algorithm based on minimum cost maximum flow (MRAMCMF) was proposed. MRAMCMF analyzed energy consumption of data transmission, node remaining energy and minimum data transmission delay, proposed a new weighting function, and used the minimum cost maximum flow algorithm to construct the multi-path routing scheme. All multimedia sensor nodes transmitted data to sink node along the paths. Simulation results show that MRAMCMF can prolong network lifetime, reduce and balance node energy consumption, and reduce data transmission delay. Under certain conditions, MRAMCMF outperforms Ratio_w and TPGF.

Key words: wireless multimedia sensor network, network lifetime, minimum cost maximum flow, data transmission delay

1 引言

无线多媒体传感器网络(wireless multimedia sensor network, WMSN)是一种采集和处理图像、视频、音频等多媒体数据的新型传感器网络。WMSN的多媒体传感节点配

置摄像头、麦克风和其他传感器,具有计算、存储和通信能力。它能够自组织形成无线传感网,协作采集和处理周边环境中的多媒体数据,最后经多跳路由将数据传输到监控中心。监控中心对所得的各种数据进行记录、分析和显示,实现全面而有效的多媒体数据监测^[1,2]。

^{*} 浙江省自然科学基金资助项目 (No.LY14F030006, No.LY13F010013, No.LQ12F03014), 浙江省公益性技术应用研究计划项目 (No.2014C33108)



WMSN 为传统的多媒体监控系统提供了新的实现手段。它能有效克服传统监控系统部署成本高、组网不灵活、维护麻烦等不足。WMSN 还继承了无线传感网的优点,能够感知网络覆盖区域中的多样化数据,具有灵活和丰富的功能扩展性。因此,在战场监控、交通监控、安全敏感区域监控、智能家居、目标跟踪、公共安全监测等多个应用领域中,WMSN 都具有非常广阔的应用前景^[3]。但是,WMSN 的产业化发展仍存在一定的困难,面临包括带宽需求高、节点能耗高、多媒体数据传输实时要求、QoS (quality of service, 服务质量)要求等方面的挑战。由于 WMSN 应用的环境条件复杂,大多不允许对失效节点进行电池更换,同时多媒体传感节点的能耗明显大于传统传感节点,因此一些传统无线传感网的通信算法不适合 WMSN,缩短了网络生存时间,需要开发支持能耗低且网络生存时间高的通信算法。网络生存时间的优化是 WMSN 面临的主要挑战之一。多媒体数据(尤其是音视频)对传输的时延、同步要求很高,WMSN 应用应具有较强的多媒体数据传输能力。但是目前 WMSN 的带宽资源和 CPU 处理能力有限,能否有效解决多媒体数据的实时传输问题,是 WMSN 实用化的关键^[4]。

目前,许多学者在传统无线传感网的路由算法方面已取得一些成果。如参考文献[5]提出比例权值路由 Ratio_w (ratio weight routing) 算法。该算法考虑链路能耗和节点剩余能量,构建链路权值函数,并根据 dijkstra 算法寻找每个节点到 sink 节点的权值最小路径,构建最短路径树。最终所有节点沿着最短路径树传输数据。参考文献[6]针对具有 EH (energy-harvesting, 能量采集) 节点的无线传感器网络,提出生存时间最大化的分簇路由算法。该算法引入能代替簇头且充电的 EH 节点,计算 EH 节点的最优位置。根据簇头能耗和节点到簇头的能耗,提出能最大化网络生存时间的多个簇头选择和分簇方法。所有传感节点将数据汇聚到簇头节点,簇头节点数据通过 EH 节点中继给 sink 节点。但是在 WMSN 中,节点传输速率有限且多媒体数据量大。只是沿着一条路径传输数据会造成较高的数据传输时延,造成枢纽节点能耗过高且过早失效,缩短了网络生存时间。因此这些算法不适应无线多媒体传感网。

一些学者从最优化方面研究无线多媒体传感网的路由算法。参考文献[7]针对 WMSN 的特点,考虑数据处理功率,提出误差失真不等式约束、流量约束和能量约束等约束条件,建立网络优化模型。采用次梯度算法求解该模型,获得最优解。参考文献[8]分析时延约束和流量约束,建立

平衡生存时间、效用和时延的优化模型。对该优化模型进行分析,引申出 3 个子问题——时延最小化问题、生存时间最大化问题、效用和功率分配的平衡子问题,并采用最优化方法求解。参考文献[9]研究无线多媒体传感器生存时间最大化的基于两跳簇结构的图像传输方案。在该方案中,采用多个中继节点压缩和转发图像,从而减少摄像头节点和簇头节点的能耗。建立网络生存时间优化模型,提出摄像头节点发送半径自适应方法和基于普通传感节点剩余能量的图像压缩任务分配方法,平衡节点能耗。参考文献[7~9]都建立网络优化模型,采用各种方法求解。但是这些算法实现较复杂,收敛速度慢,其最优方案的计算工作量较大,需要消耗一定的节点能量。

另一些学者从多路径路由方面研究无线多媒体传感网的路由算法。参考文献[10]提出无线多媒体传感网的两阶段地理贪婪转发(two-phase geographical greedy forwarding, TPGF) 算法。TPGF 算法根据节点的位置坐标寻找可绕过孔洞的数据转发路径,选择最小跳数路径传输数据。多次运行 TPGF 算法能发现多条不相交路径。参考文献[11]考虑节点的剩余能量、本地链路的可靠性和节点间的距离,构造从传感节点到 sink 节点的多条不相交路径。选择一些高可靠性的路径发送数据分组的多个副本,则可确保数据分组端到端传输的可靠性。参考文献[10]和参考文献[11]虽然能找到多条不相交的路径,但是都没有同时考虑网络生存时间和数据传输时延。

因此针对上述存在的问题,在总结相关参考文献的基础上,提出基于最小费用最大流的无线多媒体传感网多路径路由算法(multi-path routing algorithm based on minimum cost maximum flow for wireless multimedia sensor network, MRAMCMF)。在该算法中,采用图论方法研究 WMSN 的路由问题,寻找权衡网络生存时间和数据传输时延的多条路径,降低节点能耗和数据传输时延,提高网络生存时间。

2 能耗和时延模型

2.1 能耗模型

在 WMSN 中,节点可分成标量传感节点、多媒体传感节点和 sink 节点。标量传感节点负责执行简单的任务,如转发其他节点的数据和采集标量数据,数据处理要求不高,因此标量传感节点 i 经过距离 d_{ij} 发送和接收 g_{ij} 比特数据的能耗分别定义为 $E_{Tx}(g,d)$ 和 $E_{Rx}(g)$ ^[12],即:

$$E_{Tx}(g,d) = g_{ij}E_{elec} + g_{ij}\epsilon_{fs}d_{ij}^{\gamma} \quad (1)$$

$$E_{Rx}(g) = g_{ji} E_{elec} \quad (2)$$

其中, E_{elec} 表示每比特电路能耗, d_{ij} 表示无线发送节点 i 和接收节点 j 间的距离, $\varepsilon_{fs} d_{ij}$ 表示依赖放大器模型的每比特放大器能耗, $\gamma \in [2, 4]$ 表示数据在传输过程中的损耗系数。

考虑到数据传输过程中的超时重发、分组丢失等出错情况, 标量传感节点的总能耗为:

$$E_i = E_{Tx}(g, d) + E_{Rx}(g) \\ = \left(\sum_{j \in N(i)} g_{ji} E_{elec} + \sum_{j \in N(i)} (g_{ij} E_{elec} + g_{ij} \varepsilon_{fs} d_{ij}^\gamma) \right) / (1 - P_e) \quad (3)$$

其中, P_e 表示数据分组传输的出错率, $N(i)$ 表示发送节点 i 的单跳最大通信范围内所有可能的接收节点集合。

多媒体传感节点除了考虑无线通信能耗外, 仍需要采集和处理数据量大的图像、视频、音频等多媒体数据, 因此需要考虑数据处理能耗。根据功率、速度和失真模型^[7], 数据处理能耗为:

$$E_{Pe}(S) = \left(-\frac{\ln(D_i / \sigma^2)}{\phi S_i} \right)^{3/2} \quad (4)$$

其中, D_i 表示多媒体数据的处理失真度, S_i 表示多媒体数据的感知速率, σ 表示多媒体数据的平均输入方差, ϕ 表示数据处理效率系数。多媒体传感节点的总能耗为:

$$E_i = E_{Pe}(S) + E_{Tx}(g, d) + E_{Rx}(g) \\ = \left(\sum_{j \in N(i)} (g_{ij} E_{elec} + g_{ij} \varepsilon_{fs} d_{ij}^\gamma) + \sum_{j \in N(i)} g_{ji} E_{elec} \right) / \\ (1 - P_e) + \left(-\frac{\ln(D_i / \sigma^2)}{\phi S_i} \right)^{3/2} \quad (5)$$

2.2 时延模型

在 WMSN 中, 传输路径的端到端时延指从多媒体传感节点开始感知一帧多媒体数据到该帧数据全部到达 sink 节点的时间, 由多媒体传感节点的时延和该帧传输路径中每一个中继节点的时延组成。多媒体传感节点的时延主要由感知时延 t_{sense} 、设备启动和初始化时延 t_{on} 、数据处理时延 t_{proc}^s 、排队时延 t_{queue}^s 、发送和重传数据时延 $(t_{tx} + t_{retx})$ 组成。每一个中继节点的时延由数据处理时延 t_{proc}^j 、排队时延 t_{queue}^j 、发送和重传数据时延组成^[13]。沿着某一条路径传输的帧时延为:

$$t_{delay}^P = [t_{sense} + t_{on} + t_{proc}^s + t_{queue}^s + t_{tx} + t_{retx}] + \sum_{j \in H} t_j \quad (6)$$

其中, H 表示传输路径 P 上所有中继节点的集合, t_j 表示中继节点 j 的时延, 具体表示为:

$$t_j = t_{proc}^j + t_{queue}^j + t_{tx} + t_{retx}, j \in H \quad (7)$$

其中, t_{sense} 、 t_{on} 、 t_{proc}^s 、 t_{queue}^j 和具体的硬件平台有关, 当硬件平台确定, 其值也确定。排队时延 t_{queue} 由网络负载大小和队列长度决定。当网络未拥塞时, 则不考虑中继节点的排队时延, 只考虑一帧数据在多媒体传感节点的排队时延, 即:

$$t_{queue}^s = g_f / R_i \quad (8)$$

其中, g_f 表示一帧多媒体信息的比特数, R_i 表示多媒体传感节点 i 的数据传输速率。发送时延与传输距离 d_{ij} 有关, 即:

$$t_{tx} = d_{ij} / s_f \quad (10)$$

其中, s_f 表示无线电的传输速率, 2.4 GHz 频段的无线电传输速率为 3×10^8 m/s。重传时延为:

$$t_{retx} = t_{tx} P_e / (1 - P_e) \quad (11)$$

假设从传感节点 i 到 sink 节点有 m 条路径, 则定义传感节点 i 的数据传输时延为所有路径时延的最大值, 即 $\max_m(t_{delay}^P)$ 。

3 算法原理

针对 WMSN 的实际应用场景, 假设其具有以下特点。

- 所有标量传感节点、多媒体传感节点和 sink 节点的位置固定不变。
- 所有节点可通过 GPS 模块或采用 RSSI 定位等定位方法获得自身的位置坐标。
- sink 节点和传感节点的能量有限, 但是 sink 节点的电池可更新或充电。
- 网络中多媒体传感节点只负责多媒体数据的感知和发送, 不转发其他节点的数据。标量传感节点负责标量数据的感知和发送, 同时可转发其他节点的数据。
- 所有同一类型的节点具有统一的性能 (如感知速率、最大通信距离、初始能量、能耗参数等), 具有统一的能耗模型。

在 WMSN 中, 多媒体传感节点需要传输自身感知的大量多媒体数据。如果只选择到 sink 节点的一条路径, 则会造成数据传输时延过大和网络节点能耗的不均衡, 即枢纽节点能量消耗过快而其他节点能量消耗较慢。因此, 针对上述问题, MRAMCMF 采用图论的方法寻找从多媒体传感节点到 sink 节点的多条路径, 但是需要解决以下两个问



题:第一个问题是如何设定能提高网络生存时间且降低节点能耗和数据传输时延的链路权值;第二个问题是如何根据链路的权值,寻找到 sink 节点的多条路径。以下具体分析上述两个问题。

3.1 链路权值的设定

算法的目标是提高网络生存时间、降低节点能耗和数据传输时延。因此,在选择转发接收节点时,除了考虑链路的能耗外,还需要考虑接收节点的剩余能量和最小数据传输时延。定义新的链路权值函数如下:

$$w_{ij} = [C_{ij}(d_{ij})]^\alpha \left[\frac{1}{Re(j)} \right]^\beta [t_j]^\theta \quad (12)$$

其中, w_{ij} 表示发送节点 i 和接收节点 j 间的链路权值, $Re(j)$ 表示接收节点 j 的剩余能量, t_j 表示接收节点 j 的最小数据传输时延, α, β, θ 为正常数, 分别称为能耗因子、接收节点剩余能量因子、接收节点最小时延因子, $C_{ij}(d_{ij})$ 表示发送节点 i 和接收节点 j 间的链路单位能耗。根据能耗模型可知:传感节点 i 与 j 之间传输单位比特数据的链路能耗为:

$$C_{ij}(d_{ij}) = C_{ji}(d_{ij}) = (2 \times E_{elec} + \varepsilon_{fs} \times d_{ij}^\gamma) / (1 - P_e) + \delta \times E_{pe} \quad (13)$$

其中, δ 表示多媒体传感节点的标志符号。如果是多媒体传感节点, δ 为 1; 否则为 0。

传感节点 i 发送单位比特数据给 sink 节点的链路能耗为:

$$C_{is}(d_{is}) = (E_{elec} + \varepsilon_{fs} \times d_{is}^\gamma) / (1 - P_e) + \delta \times E_{pe} \quad (14)$$

由式(12)可知,根据权值函数,多媒体传感节点选择权值较小的路径发送数据,降低了节点的能耗,同时避免一些剩余能量较少的节点过多地承担数据中继任务,平衡了节点能耗,从而延长了网络生存时间。多媒体传感节点选择多条路径发送数据,降低了数据传输时延。

3.2 最小费用最大流算法

网络流理论是图论中一类常见的理论,主要针对许多包含了流量的系统,例如有数据流的无线传感网系统、有车辆流的公路系统、有信息流的控制系统、有水流的供水系统、有现金流的金融系统等,具有广泛的应用前景。

在 WMSN 中,每一个多媒体传感节点采集数据量大的多媒体数据。为了在尽可能短的时间内将多媒体数据发送给 sink 节点,需要根据网络最大流方法计算数据路由方案。但是网络最大流方法只是考虑数据传输的流量最大化,其传输方案不唯一,而且没有考虑节点的能耗和数据

传输时延。因此为了降低节点能耗和数据传输时延,除了考虑链路的传输容量外,还在每一条链路上引入了费用(即权值)。在保证最大流的前提下,寻找一个能降低节点能耗和数据传输时延的最小费用最大流。

首先给出可行流、增广路和增广路费用的定义。满足链路流量限制条件(式(15))和平衡条件(式(16))的网络流 f , 称为可行流。

$$0 \leq f(i, j) \leq c(i, j), L(i, j) \in L \quad (15)$$

$$\sum_{j \in N(i)} f(i, j) - \sum_{j \in N(i)} f(j, i) = \begin{cases} |f|, & i \in V_s \\ 0, & i \notin V_s, V_t \\ -|f|, & i \in V_t \end{cases} \quad (16)$$

其中, V_s 表示传感节点, V_t 表示 sink 节点, $c(i, j)$ 表示发送节点 i 到接收节点 j 的链路容量, $f(i, j)$ 表示发送节点 i 到节点 j 的流量, L 是所有通信链路的集合, $L(i, j)$ 是发送节点 i 到接收节点 j 的无线链路, 表示可行流的流量, 即传感节点的净流出流量, 或 sink 节点的净流入流量。当从 V_s 到 V_t 的一条路径 P 满足以下两个条件: 一是所有和路径正方向一致的前向链路 $L(i, j), 0 \leq f(i, j) < c(i, j)$; 二是所有和路径反方向一致的后向链路, $0 \leq f(i, j) < c(i, j)$, 则称 P 是关于可行流 f 的一条增广路。考虑当沿着一条可行流 f 的增广路 P , 以改进量 $\varphi=1$ 调整 f , 得到新的可行流 f' (显然 $|f'|=|f|+1$), 新可行流增加的费用就是该增广路 P 的费用, 即:

$$r(f') - r(f) = \sum_{L(i, j) \in P^+} r(i, j) - \sum_{L(i, j) \in P^-} r(i, j) \quad (17)$$

其中, $r(f)$ 表示可行流 f 的费用, $r(i, j)$ 表示发送节点 i 到接收节点 j 的链路费用。

最小费用最大流算法的基本思路是寻找费用最小的增广路, 沿着该增广路调整可行流为最大流, 更新容量网络的伴随网络。反复寻找费用最小的增广路, 直至不存在增广路。针对无向连通图, 寻找最小费用增广路的方法如下: 构造容量网络的伴随网络 $W(f)$, 即顶点拓扑不变, 并定义 $W(f)$ 中链路的权值为:

$$W(i, j) = \begin{cases} -r(i, j), & f(i, j) = 0 \text{ 且 } 0 < f(j, i) \leq c(j, i) \\ r(i, j), & 0 \leq f(i, j) < c(i, j) \text{ 且 } f(j, i) = 0 \\ +\infty, & f(i, j) = c(i, j) \end{cases} \quad (18)$$

其中, 长度为 ∞ 的链路可在 $W(f)$ 中略去。在伴随网络 $W(f)$ 中, 寻找关于 f 的最小费用增广路, 等价于寻找从 V_s 到 V_t 的最短路径, 可采用分布式 Bellman-ford 算法计算

最短路径^[4]。

该算法能寻找从多媒体传感节点到 sink 节点的所有可能路径,但是有些路径能耗大,选择该路径传输会提高节点能耗。因此在 MRAMCMF 中,最多寻找 N_p 条路径的最小费用最大流。如果网络中存在多个多媒体传感节点,则各个多媒体传感节点的数据传输路径间可能存在多个重复路径,即重复路径中部分链路同时出现在多个多媒体传感节点的传输路径中。由于标量传感节点的数据传输速率有限,重复路径中的枢纽节点不能中继所有多媒体传感节点的数据,因此统计每一个重复路径的重复次数,将该重复路径的带宽资源分摊到多个多媒体传感节点中,修改每一个多媒体传感节点在重复路径上所有链路的流量,最终获得无线多媒体传感网的数据路由方案。

4 算法实现

MRAMCMF 循环执行以下步骤,直到第 1 个传感节点能量耗尽。

(1) sink 节点采用洪泛(flooding)方式获知所有传感节点的位置坐标、自身地址、剩余能量等信息后,执行 MRAMCMF。

(2) 通过式(12),计算所有链路的权值。 $m=0, k=0$,初始化所有多媒体传感节点的可行流。开始计算多媒体传感节点 m 的最小费用最大流。

(3) 若第 $k-1$ 迭代计算的最小费用流为 $f_m(k-1)$,则构造伴随网络 $W(f_m(k-1))$ 。

(4) 在 $W(f_m(k-1))$ 中寻求从多媒体传感节点 m 到 sink 节点的最短路径。若不存在最短路径,则跳到步骤(6);若存在最短路径,则跳到步骤(5)。

(5) 获得相应的最小费用增广路 P ,通过式(19)计算改进量 φ 。根据改进量 φ ,通过式(20)对 $f_m(k-1)$ 进行调整, $k=k+1$ 。

$$\varphi = \min \left\{ \min_{p^+} (c(i, j) - f_{ij}^m(k-1)), \min_{p^-} (f_{ij}^m(k-1)) \right\} \quad (19)$$

$$f_{ij}^m(k) = \begin{cases} f_{ij}^m(k-1) + \varphi, & (i, j) \in P^+ \\ f_{ij}^m(k-1) - \varphi, & (i, j) \in P^- \\ f_{ij}^m(k-1), & (i, j) \notin P \end{cases} \quad (20)$$

(6) $f_m(k-1)$ 是多媒体传感节点 m 的最小费用流。当完成所有多媒体传感节点的最小费用最大流计算,跳到步骤(7);否则, $m=m+1$,跳到步骤(3),开始新的节点计算。

(7) 判断每一个多媒体传感节点的数据传输路径中是否存在重复路径。如果存在,统计每一个重复路径的重复次数,将每一个多媒体传感节点在重复路径上所有链路的流量除以重复次数,获得无线多媒体传感节点的数据路由方案。sink 节点将数据路由方案通知其他节点。所有节点根据数据路由方案传输数据。

(8) 当 sink 节点收集一段时间的数据后,重新跳到步骤(1)。

MRAMCMF 的时间复杂度主要由 M 个多媒体传感节点的最小费用最大流计算的时间复杂度和链路权值计算的时间复杂度组成。最小费用最大流计算是采用 Bellman-ford 算法计算最短路径。Bellman-ford 算法的时间复杂度是 $O(|V|^3)$,其中 $|V|$ 表示网络中节点的数量,则最小费用最大流计算的时间复杂度是 $O(M|V|^3)$ 。链路权值的计算就是计算网络中所有链路的权值,即它的时间复杂度是 $O(|V|^2)$ 。总之,MRAMCMF 的时间复杂度是 $O(|V|^2 + M|V|^3)$,即 $O(M|V|^3)$ 。

5 仿真实现和分析

5.1 仿真参数设置

与多媒体传感节点相比,标量传感节点的感知数据量小,虽然消耗一定的通信能耗,但是不太影响各算法的网络生存时间、节点能耗和数据传输时延比较。因此,在仿真中,不考虑标量传感节点的感知数据处理、通信等能耗,不考虑数据融合、信息查询分组收发等能耗,只考虑多媒体数据的无线通信和处理能耗。选择表 1 中参数,在 MATLAB 软件上编写 M 程序,实现 Ratio_w 算法、TPGF 算法和 MRAMCMF。计算和分析算法的数据收集周期(data gathering cycle, DGC)、平均节点能耗和数据传输时延。定义 DGC 为 sink 节点成功收集所有多媒体传感节点的一帧多媒体数据所需要的时间。定义网络生存时间为当第 1 个节点能量耗尽时 DGC 的个数,平均节点能耗为当第 1 个节点能量耗尽时所有节点的总能耗除以节点的数量和 DGC 个数^[15]。数据传输时延为所有多媒体传感节点传输多媒体数据到 sink 节点的时延平均值。

5.2 权值函数参数的选择

研究权值函数(式(12))中参数 α, β, θ 值的选择对网络生存时间和数据传输时延的影响。选择 50 个传感节点(其中 1 个 sink 节点、5 个多媒体传感节点和 44 个标量传感节点)和表 1 中相关仿真参数,从 $\{0.1, 0.4, 0.7, 1, 3, 5\}$ 集合

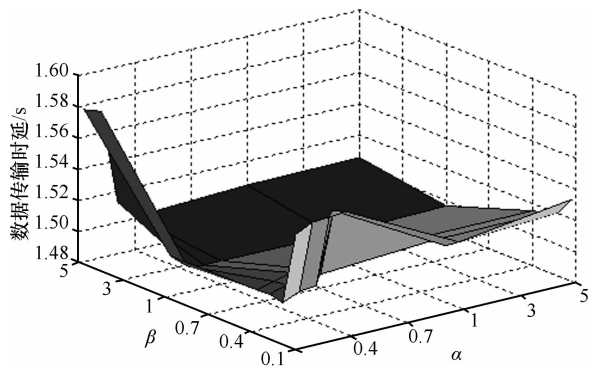


表 1 仿真参数

参数	取值
每比特电路能耗 E_{elec}	50 nJ/bit
每比特放大器能耗 ϵ_{fs}	100 pJ/bit/m ²
多媒体数据感知速率 S_i	0.1 Mbit/s
一帧多媒体信息的数据量 g_i	100 KB
数据损耗系数	2
节点最大通信距离 d_{max}	200 m
多媒体数据的处理失真度 D_i	100
多媒体数据的平均输入方差 σ	3 500
数据处理效率系数 ϕ	55.54 W ^{3/2} /(Mbit·s ⁻¹)
链路通信容量	250 kbit/s
多媒体传感节点个数 M	5
感知时延 t_{sense}	33 ms/帧
设备启动和初始化时延 t_{on}	1.2 s
数据处理时延 t_{proc}	100 ms/帧
数据分组传输的出错率 P_e	0.1
最大传输路径个数 N_p	10
正方形仿真区域的边长	500 m
传感节点的初始能量 E	100 J

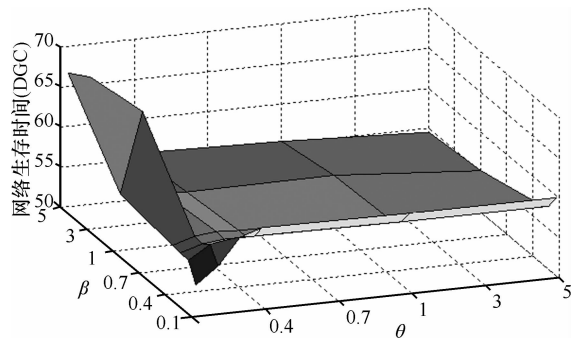
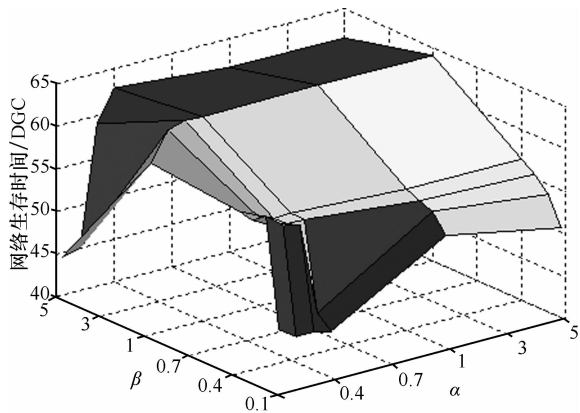
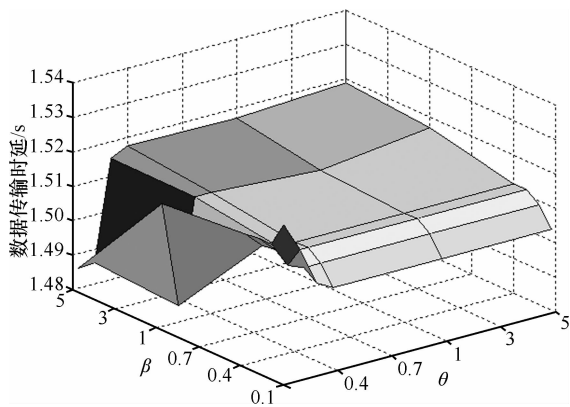
中分别选择 α 、 β 、 θ 值,计算所有组合的仿真结果。分析仿真结果可知:当 α 、 β 和 θ 取中间值时,网络生存时间较大,数据传输时延较小。为了方便说明,固定权值函数中某个参数,分析其他两个参数对仿真结果的影响,获得参数取值规律。

以 $\theta=0.4$ 为例,仿真结果如图 1 和图 2 所示。当 θ 一定, α 趋向于 1, β 趋向于 3 时,网络生存时间达到最大值,数据传输时延达到最小值。这是因为:当 β 和 θ 一定, $\alpha \geq 1$ 时,在权值函数中链路能耗占主要部分,因此 α 越大,网络生存时间和数据传输时延基本不变化。当 β 和 θ 一定, $\alpha \leq 1$ 时, α 越小,越削弱了链路能耗的作用,网络生存时间

图 2 $\theta=0.4$ 时 α 和 β 参数对数据传输时延的影响

变小,数据传输时延变大。同理,当 α 和 θ 一定, $\beta \geq 3$ 时,随着 β 变大,网络生存时间变小,数据传输时延变大。当 α 和 θ 一定, $\beta \leq 3$ 时, β 越小,由于节点的剩余能量对权值函数的影响降低,造成节点能耗分布越不均衡,因此网络生存时间越小,数据传输时延越大。

以 $\alpha=1$ 为例,仿真结果如图 3 和图 4 所示。当 α 一定, β 趋向于 3, θ 趋向于 0.4 时,网络生存时间达到最大值,数据传输时延达到最小值。这是因为:当 α 和 β 一定, $\theta \geq 0.4$ 时,在权值函数中节点最小数据传输时延占主要部分,当 $\theta=0.1$ 时,网络最小数据传输时延对权值函数的影响不足,

图 3 $\alpha=1$ 时 β 和 θ 参数对网络生存时间的影响图 1 $\theta=0.4$ 时 α 和 β 参数对网络生存时间的影响图 4 $\alpha=1$ 时 β 和 θ 参数对数据传输时延的影响

只有 $\theta=0.4$ 时,路径选择时会尽量选择能提高网络生存时间,降低数据传输时延的多条路径,从而提高了网络生存时间,降低了数据传输时延。

综上所述,在 MRAMCMF 中,选择适当的参数(如 $\alpha=1$ 、 $\beta=3$ 和 $\theta=0.4$)能延长网络生存时间和降低数据传输时延。

5.3 算法仿真结果

在算法仿真中选择节点数量 20、sink 节点坐标(400, 400)、多媒体传感节点坐标(50, 50)和表 1 中相关参数,获得图 5 所示的节点分布和传输路径。如图 5 所示,由于传输速率有限,多媒体传感节点将多媒体数据通过多条路径传输到 sink 节点,有利于减少 WMSN 的数据传输时延。而且 MRAMCMF 充分利用具有中继功能的标量传感节点能量,提高网络生存时间。

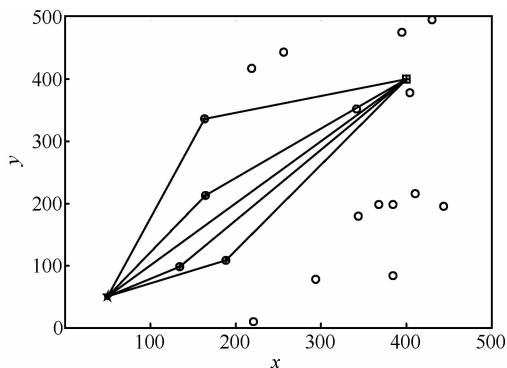


图 5 20 个的节点分布和传输路径

为了验证算法的有效性,采用表 1 中的相关仿真参数和 sink 节点固定坐标(250,250),随机均匀产生 49、59、69、79、89、99 个其他节点的位置坐标。选择 $\alpha=1$ 、 $\beta=3$ 和 $\theta=0.4$ 。针对每一种节点数量,随机产生 20 个不同网络拓扑,分别计算 Ratio_w 算法、TPGF 算法和 MRAMCMF 的网络生存时间、平均节点能耗和数据传输时延,并作为这些算法的仿真结果值。

如图 6 可知,MRAMCMF 的网络生存时间(DGC 个数)最长,TPGF 算法次之,Ratio_w 算法的网络生存时间最短。这是因为:在 Ratio_w 算法中,每一个多媒体传感节点只选择一条路径传输多媒体数据。由于多媒体数据量大,完成一帧数据传输后,在该路径上节点能耗较多而其他节点能耗较少。这导致节点能耗的不均衡,枢纽节点过早失效,因此网络生存时间最短。TPGF 算法选择多条不相交路径传输数据,但是传输路径选择没有考虑节点剩余能量,其网

络生存时间也不理想。MRAMCMF 综合考虑了链路能耗、接收节点的剩余能量和最小数据传输时延,能寻找到最多 N_p 条路径的最小费用最大流,尽可能多地传输多媒体数据,避免剩余能量较小节点承担过多的数据中继任务而失效,从而提高了网络生存时间。

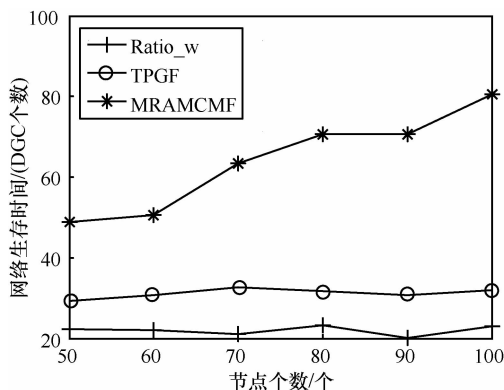


图 6 网络生存时间比较

如图 7 可知,MRAMCMF 的平均节点能耗最低。这是因为:为避免节点能量过早耗尽而死亡,MRAMCMF 在一些路径选择上选择链路能耗较低的路径传输数据,降低了数据传输的节点能耗,且避开了剩余能量低的节点,提高了网络生存时间,因此降低了平均节点能耗。

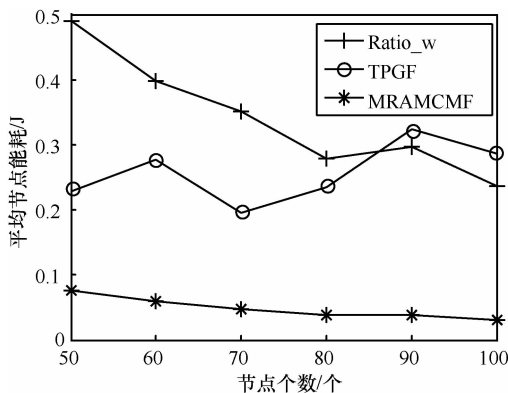


图 7 平均节点能耗比较

如图 8 所示,MRAMCMF 的节点剩余能量方差最低、TPGF 算法次之。MRAMCMF 和 TPGF 算法相差不大,但远远优于 Ratio_w 算法。这是因为:MRAMCMF 采用最小费用最大流算法,能获得最多 N_p 条路径,充分利用标量传感节点的能量参与多媒体数据路由,均衡节点能耗。

如图 9 所示,MRAMCMF 的数据传输时延最小,TPGF

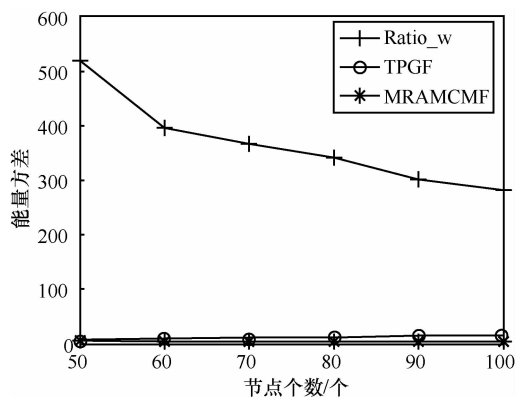


图8 节点剩余能量方差比较

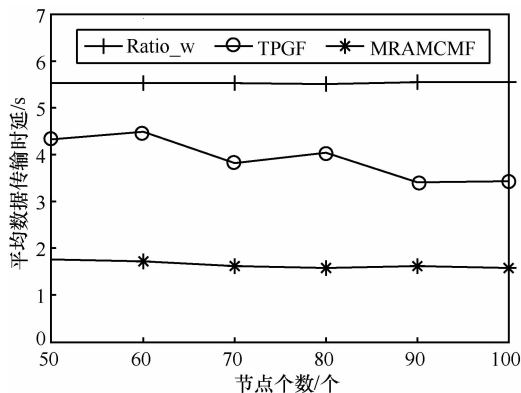


图9 数据传输时延比较

算法次之、Ratio_w 的数据传输时延最大。这是因为：MRAMCMF 采用新的权值函数，采用最小费用最大流算法，选择多条路径同时参与多媒体数据的传输，这在链路传输速率有限的无线多媒体传感网中，能提高多媒体数据的传输速率，降低数据传输时延。

总之，在无线多媒体传感网中，MRAMCMF 能延长网络生存时间，降低和平衡节点能耗，降低数据传输时延，比 Ratio_w 算法和 TPGF 算法更优。

6 结束语

本文研究基于最小费用最大流的无线多媒体传感网多路径路由算法。首先研究能耗模型和时延模型，其次构造了基于链路能耗、节点剩余能量、节点最小数据传输时延等多个参数的权值函数，引入了最小费用最大流算法构造多条路径。最后仿真分析能耗因子、接收节点剩余能量因子、时延因子对网络生存时间和数据传输时延的影响，仿真比较 Ratio_w 算法、TPGF 算法和 MRAMCMF。

在 MRAMCMF 中，sink 节点需要收集所有传感节点的

剩余能量、位置坐标等信息，将计算所得结果通知其他节点。MRAMCMF 的时间复杂度较高，需要一定的迭代时间才能收敛。因此，将研究无线多媒体传感网的分布式路由算法。所有传感节点不断与周围邻居节点交换自身信息，根据周围节点的信息建立多路径路由的网络生存时间和数据传输时延优化模型，采用图论方法或最优化方法求解优化模型，获得到 sink 节点且能提高网络生存时间和降低数据传输时延的多条较优路径。所有多媒体传感节点沿着计算获得的多个路径将数据传输到 sink 节点。

参考文献

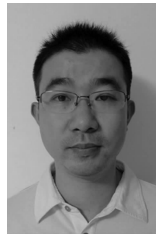
- 1 Akyildiz I F, Melodia T, Chowdhury K R. A survey on wireless multimedia sensor networks. *Computer Networks*, 2007, 51 (4): 921~960
- 2 Akyildiz I F, Melodia T, Chowdhury K R. Wireless multimedia sensor networks: applications and testbeds. *Proceedings of the IEEE*, 2008, 96(10): 1~18
- 3 周灵, 王建新. 无线多媒体传感器网络路由协议研究. *电子学报*, 2011, 39(1): 149~156
- 4 黄曼, 程良伦. 一种 QoS 保证的 WMSNs 实时路由协议. *传感技术学报*, 2011, 24(9): 1341~1346
- 5 朱艺华, 沈丹丹, 吴万登等. 无线传感器网络优化生存时间的动态路由算法. *电子学报*, 2009, 37(5): 1041~1045
- 6 Zhang P, Xiao G, Tan H P. Clustering algorithms for maximizing the lifetime of wireless sensor networks with energy-harvesting sensors. *Computer Networks*, 2013, 57(14): 2689~2704
- 7 He Y F, Lee I, Guan L. Distributed algorithms for network lifetime maximization in wireless visual sensor networks. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2009, 19(5): 714~718
- 8 Muhammad T, Ronan F. Optimal utility lifetime and delay-robustness tradeoff in wireless multimedia sensor networks. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Optimal Utility Lifetime and Delay-Robustness Tradeoff in Wireless Multimedia Sensor Networks, Cape Town, South Africa, 2010: 1~5
- 9 Zuo Z, Lu Q, Luo W. A two-hop clustered image transmission scheme for maximizing network lifetime in wireless multimedia sensor networks. *Computer Communications*, 2012, 35(1): 100~108
- 10 Shu L, Zhang Y, Zhou Z B, et al. Transmitting and gathering streaming data in wireless multimedia sensor networks within expected network lifetime. *Mobile Network Application*, 2008, 13(3): 306~322

- 11 Wang X, Yang T. ERM: energy-efficient and reliability-ensured multipath routing for WMSNs. *Chinese Journal of Electronics*, 2011, 20(2): 329~332
- 12 任条娟, 杨海波, 陈友荣. sink 节点移动的无线传感网生存时间优化算法. *传感技术学报*, 2012, 25(5): 683~690
- 13 Fapojuwo A O, Alejandra C T. Energy consumption and message delay analysis of QoS enhanced base station controlled dynamic clustering protocol for wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(10): 5366~5374
- 14 王桂平, 王衍, 任嘉辰. 图论算法理论、实现及应用. 北京: 北京大学出版社, 2011
- 15 陈友荣. 无线传感网生存时间优化算法的研究. 浙江工业大学博士学位论文, 2011

[作者简介]



陈友荣, 男, 博士, 浙江树人大学信息科技学院讲师, 主要研究方向为无线传感网、物联网。



周骏华, 男, 杭州中威电子股份有限公司工程师, 主要研究方向为无线传感网、嵌入式系统。



王章权, 男, 浙江树人大学信息科技学院副教授, 主要研究方向为无线传感网、控制技术。



任条娟, 女, 浙江树人大学信息科技学院教授, 主要研究方向为无线传感网、车联网。

(收稿日期: 2014-08-05)

(上接第 54 页)

- 6 Volodymyr V, Kindratenko, Pedro T. Trends in high-performance computing. *Computing in Science and Engineering*, 13(3): 92~95
- 7 Rajkumar B, Chee S Y, Srikumar V, *et al.* Cloud computing and emerging IT platforms: vision, hype, and reality for delivering computing as the 5th utility. *Future Generation Computer Systems*, 25(6): 599~616
- 8 Venugopalan R, Emin G S. Beehive: O(1) lookup performance for power-law query distributions in peer-to-peer overlays. *Proceedings of the 11th Symposium on Networked Systems Design and Implementation*, San Francisco, USA, 2004: 99~112
- 9 Giuseppe D, Deniz H, Madan J, *et al.* Dynamo: amazon's highly available key-value store. *SOSP*, Stevenson, USA, 2007: 205~220
- 10 The ns-3 network simulator. <http://www.nsnam.org/>, 2011
- 11 John K, David B, Yan C, *et al.* OceanStore: an architecture for global-scale persistent Storage. *Proceedings of International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, Cambridge, USA, 2000: 190~201
- 12 Antony I T R, Peter D. Storage management and caching in PAST, a large-scale, persistent peer-to-peer storage utility. *Proceedings of the ACM Symposium on Operating Systems*

Principles, Banff, Canada, 2001: 188~201

- 13 Van J, Diana K S, James D T, *et al.* Networking named content. *Proceedings of ACM CoNEXT*, Rome, Italy, 2009: 1~12
- 14 Alexander A, Llya M, Zhang L X. ndnSIM: NDN Simulator For NS-3 Project. Tech Rep, 2012
- 15 Wang J Z, Eric O, Peng C Y, *et al.* Implementing instant messaging using named data. *Proceedings of AINTEC*, Bangkok, Thailand, 2010: 40~47

[作者简介]



雷凯, 男, 北京大学副研究员、硕士生导师, 北京大学互联网信息工程研发中心常务副主任, 信息工程学院院长助理, YOCSEF 深圳学术委员, 主要研究方向为计算机网络、命名数据网络(NDN)、大数据处理技术等。

袁梦, 女, 北京大学信息工程学院硕士生, 主要研究方向为命名数据网络、分布式网络系统等。

(收稿日期: 2014-09-26)