

基于数据融合的 WMSNs 最小能耗实时路由算法*

周灵¹, 龙滩¹, 王建新²

(1. 佛山科学技术学院 计算机系, 广东 佛山 528000;
2. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 为了在无线多媒体传感器网络 WMSNs 通信中提供 QoS 支持, 研究了 WMSNs 最小能耗实时路由算法问题。首先, 定义了数据融合的概念及其在路由设计中的作用, 在此基础上设计了一个最小能耗实时路由算法 LERTR, 用于构造 WMSNs 最小能耗实时路由树。该算法首先使用 ADH 算法生成一棵最小能耗路由树; 若时延不满足要求, 则通过合并最小时延路径来产生一个满足时延约束的路由树。仿真实验表明: LERTR 算法生成的路由树在保障时延约束的情况下, 具有很好的能耗代价值。

关键词: 无线多媒体传感器网络; 路由算法; 数据融合; 实时; 最小能耗

中图分类号: TP 393.02 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2013) 06-0064-04

Least Energy Real-time Routing Algorithm Based on Data Aggregation in WMSNs

ZHOU Ling¹, LONG Tan¹, WANG Jianxin²

(1. Department of Computer, Foshan University, Foshan 528000, China;

2. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to provide real-time communication in wireless multimedia sensor networks (WMSNs), the QoS-supported routing algorithm is addressed. Theoretically, data aggregation is defined and its advantages in QoS routing are introduced. Based on it, a least energy real-time routing algorithm (LERTR) is presented to construct the delay-constrained routing tree in WMSNs. In LERTR, a least energy routing tree is constructed by average distance heuristic (ADH), and then, if the path delay can't meet the delay upper bound, a shortest delay path which is computed by Dijkstra's algorithm will be merged into the existing routing tree to meet the delay upper bound. Finally, the simulation results verify the correctness of the algorithm in some degree.

Key words: WMSNs; routing algorithm; data aggregation; real-time; least energy consumption

无线多媒体传感器网络 (Wireless Multimedia Sensor Networks, WMSNs) 将信息量大、内容丰富的图像、音频和视频等多媒体信息引入到环境监测活动中, 实现了全方位、细粒度、精确的信息监测。作为一个无线多跳多媒体通信网络, 由于多媒体数据传输量大, 节能问题尤为突出, 如何最小化能耗并延长网络生存期是一个重要的挑战。同时,

多媒体通信网络还具有很强的服务质量 (Quality of Server, QoS) 控制要求, 比如提供实时通信。最后, 由于 WMSNs 独特的音频、视频、图像等多媒体数据流模型, 其数据处理、网络通信也比传统的无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, WSNs) 有更高的要求^[1-2]。

由于多媒体应用数据服务种类众多, 本文只考

* 收稿日期: 2013-04-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61103203)

作者简介: 周灵 (1972 年生), 男; 研究方向: 无线多媒体传感器网络; E-mail: cszhouling@sohu.com

虑有 QoS 控制要求的多媒体数据路由通信问题。对于这种类型的通信, 其 QoS 控制路由算法必须保障: ① 从 WMSNs 通信服务质量方面考虑, 要求路由具有 QoS 保障, 典型的是满足一定的时延要求的实时通信; ② 从网络资源管理和优化的角度考虑, 要求优化网络资源管理, 主要是最小化网络代价; 典型的是最小化网络能耗, 最大化网络生存期, 延长监测网络的寿命。要同时对两者进行优化, 即 QoS 控制的最小能耗路由问题。

本文引入一个优秀的最小代价启发式算法 ADH (Average Distance Heuristic)^[3], 将其扩展到时延受限的最小能耗实时路由领域, 设计了一个时延约束的最小能耗实时路由算法 LERTR (Least Energy Real-time Routing Algorithm)。该算法首先考虑数据融合路由树的能量消耗最优化; 若某路径时延超过约束条件, 则启动最小时延路径计算, 用最小时延路径代替该路径。最后通过仿真实验与两个典型的算法 SPEED、Kemal 进行了性能比较。

1 QoS 路由与数据融合

定义 1 WMSNs 最小能耗路由问题: 给定网络 $G(V, E)$ 、汇聚节点 D 和信号源结点集 S , 求解一棵覆盖 $S \cup D$ 的生成树 T , 使得树 T 的能耗代价满足式:

$$\text{Cost}(T) = \min \{ \text{Cost}(T) = \sum_{v \in S} \sum_{e \in P(D, v)} \text{Cost}(e) \},$$

称这个问题为 WMSNs 最小能耗路由问题。这个问题的解 T 为 $S \cup G$ 的最小能耗树 (Least-Energy Tree, 简称 LET)。

定义 2 时延约束的 WMSNs 最小能耗路由问题: 给定网络 $G(V, E)$ 、汇聚节点 D 、信号源结点集 S 和时延上限 Δ_{delay} , 求解一棵覆盖 $S \cup D$ 的生成树 T , 使得树 T 的能耗代价和时延满足式:

$$\text{Cost}(T) = \min \{ \text{Cost}(T) = \sum_{v \in S} \sum_{e \in P(D, v)} \text{Cost}(e) \}$$

$$\text{s. t. Delay}(P(s, v)) \leq \Delta_{\text{Delay}}$$

$$\text{Delay}(P(s, v)) = \sum_{e \in P(D, v)} \text{Delay}(e)$$

$$(\forall v \in D, P(s, v) \in T)$$

称这个问题为时延约束的 WMSNs 最小能耗路由问题。这个问题的解 T 为 $S \cup D$ 的时延约束最小能耗树, 即时延约束的 Steiner 树。

根据 WMSNs 通信能耗模型可知^[4]: $E_{\text{consumption}} = \beta k d^2$, 即能耗主要与两个因素有关: 无线通信距离 d 和数据传输量 k 。可以利用网内数据处理技术, 即数据融合技术, 进行网内数据处理, 去除冗

余信息, 从而有效地节省能量消耗, 起到延长网络寿命的作用^[5-6]。

定义 3 数据融合 (Data Aggregation or Data Fusion): 指在数据采集、处理、传输过程中, 将多份数据进行合并从而得到更有效、更符合需求的数据处理策略。

在 WMSNs 中, 路由主要是众多的多媒体传感器节点对汇聚节点的数据转发以及管理节点对监测区域众多传感器节点的数据查询, 其特点是多对一 (n to 1) 或者一对多 (1 to n) 的通信。因此, 其 QoS 路由的本质是构造一棵以汇聚节点为根的数据转发树。如果和传统数据路由的一对多 (1 to n) 特性相比较, 容易发现, 基于数据融合的数据转发树是一棵反向组播树。因此, QoS 路由的目的主要是进行数据融合树的构建, 即反向组播树的构建。

2 LERTR 算法设计

文献 [3] 对最小代价树算法作了客观的评价。经典的三个算法是 KMB 算法、MPH 算法、ADH 算法。KMB 算法是由 Kou 等人提出的求解 Steiner 树算法, 其复杂度为 $O(m \times n^2)$, 在 DCLC 问题研究中, 最早被扩展为解决 DCLC 问题的著名 KPP 算法; MPH 算法复杂度是 $O(mn^2)$, 但通常情况下生成树的费用要小于 KMB 生成树的费用; 已经被扩展为 DCMPH 算法来解决 DCLC 问题。ADH 是一个经典的求解 Steiner 树问题的启发式算法, 具有很好的代价性能, 其计算复杂度为 $O(n^3)$ 。

LERTR 算法的基本思想: 先利用 ADH 算法低代价的特性, 计算一棵低代价的路由树 T ; 若 T 不满足时延约束 Δ , 则通过 Dijkstra 最短路径树算法, 以时延作为测度计算最小时延路径树 T_{Delay} , 并通过合并最小时延路径, 得到一棵满足特定时延约束的低代价路由树。由于合并路径时树可能出现环路, 引入了消环过程。和近期同类算法相比, LERTR 算法偏重于提高算法的代价性能, 同时满足较严格的时延约束, 因而具有较好的 QoS 控制性能^[7-8]。

具体地, 其算法过程描述如下:

步骤 1: 运用 Dijkstra 最短路径树算法, 以 D 为根计算到所有信息源结点 m 的最小时延树 T_{Delay} , 判断是否存在满足时延 Δ 的树, 若 $\text{delay}(\cdot) > \Delta$, 退出。

步骤 2: 置 T 的初始集合为属于 S 集合的分离节点集, $k = m$ 。

步骤 3: 计算 $f(v) = \min \{ d(v, V_i) + d$

$(v, V_j) \mid V_i, V_j$ 为任意两棵分离的树的节点集}, 对于 $v \in V$, 若 $f(v)$ 最小, 则通过 v 将 T_i 和 T_j 连接起来, 其连接路径为 $P(v, V_i)$ 和 $P(v, V_j)$ 。

步骤 4: 修改集合 T 和节点集, $k = k - 1$ 。

步骤 5: 重复步骤 3、4, 直到 $k = 1$, 完成 ADH 树的计算。

步骤 6: 判断时延约束。对 $\forall n \in S$, 若 $\text{delay}(\cdot) > \Delta$, 将路径 $\text{Path}(n, G) \in T_{\text{Delay}}$ 加入 T ; 若形成环路, 启用消环过程, 改变其父结点。

步骤 7: 重复步骤 6, 直到全部目的结点都满足时延约束。

算法伪代码描述如下:

Input: $G(V, E, \text{Cost}, \text{Delay}), D, S, \Delta$

Output: A delay-constrained Steiner tree T

DCMPH (Graph, G, S, D, Δ)

1) $T_{\text{Delay}} \leftarrow \text{Dijkstra}(G, D, S, \Delta)$

2) If $\text{Delay}(T_{\text{Delay}}) > \Delta$ then return Null

3) $Q \leftarrow S$ /* Q 为信号源节点队列

4) $T \leftarrow D$ /* 初始化路由树 T

5) Computing the routing tree T by ADH algorithm for all the node $i \in Q$

6) For each m_i in Q

7) If 信号源 m_i 到树 T 时延小于 Δ then

8) $T \leftarrow T \cup \{m_i \text{ 到在树 } T \text{ 中的低能耗路径}\}$

9) Else

10) $T \leftarrow T \cup \{m_i \text{ 在树 } T_{\text{Delay}} \text{ 中到汇聚节点 } D \text{ 的最小时延路径}\}$

11) If there exists a loop then removing Loop

12) End If-else

13) End for

14) Return T

3 仿真实验

根据无线传感器网络随机仿真模型来验证 LERTR 算法的正确性和有效性^[9-10]。无线结点分布在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的矩形区域随机产生网络拓扑图, 无线节点通信半径假定为 $R = 12 \text{ m}$ 。时延上限设为较小的值 0.04 s 和 0.06 s , 与实际情况比较接近。仿真时进行数据融合, 在每个无线链路上传送单位数据量大小的数据包。具体的仿真参数见表 1。

实验时, 每个数据测量点对 10 个随机网络拓扑进行测试, 每个网络测量 100 次, 共计 1 000 次, 取其平均值作为测量值; 同时, 与两个典型的

表 1 仿真参数表

Table 1 The simulation parameters

参数	描述	值
$L * L$	仿真区域面积	100 m * 100 m
N	网络节点数	100 - 400 个
m	信号源节点数	20 - 80 个
Relay	每跳时延	0.01 s
R	通信半径	12 m
Cost (\cdot)	能耗大小	$E \propto d^2$

算法 SPEED^[11]、Kemal^[4] 进行能耗代价及时延性能比较。

实验一: 测量生成树能耗代价和网络规模的关系。保持信号源节点 20 个不变, 网络结点规模数由 100 个开始, 每次增加 50 个, 结果如图 1 所示, 其中图 1 (a)、(b) 分别为 $\Delta = 0.06 \text{ s}$ 和 $\Delta = 0.04 \text{ s}$ 时的仿真结果图。可见, LERTR 生成树与 SPEED、Kemal 相比均有更好的代价性能, 这得益于 ADH 是一个优秀的低代价树生成算法。实验数据曲线变化缓慢, 网络规模对生成树代价影响不大。当时延约束由 0.06 s 变为 0.04 s 时, LERTR 算法与 SPEED、Kemal 算法相比, 代价差异性显著增大; LERTR 算法相对 Kemal 算法性能更好。

实验二: 测量生成树能耗代价和信号源节点数目的关系。固定网络规模 200 个结点不变, 信号源节点由 20 到 80, 每次增加 10 个。实验结果如图 2 所示, 其中图 2 (a)、(b) 分别为 $\Delta = 0.06 \text{ s}$ 和 $\Delta = 0.04 \text{ s}$ 时的仿真结果图。仿真结果表明: 随着信号源结点的增加, 能耗代价快速增加, 可见能耗代价主要与信号源节点数目相关。仿真结果的能耗分析及时延分析同实验一。

4 总结

针对 WMSNs, 基于数据融合在 ADH 算法基础上设计了 LERTR 算法, 用于构造最小能耗实时路由通信树。该算法首先使用 ADH 生成一棵最小能耗树; 若时延不能满足特定的实时要求, 则通过合并最小时延路径来产生一个满足时延约束的最小能耗树。仿真实验表明: LERTR 算法生成的路由树在保障时延要求的情况下, 具有很好的能耗代价性能。根据 LERTR 算法求解最小能耗实时路由问题, 能高效地取得这个 NP-Complete 问题的较优解。

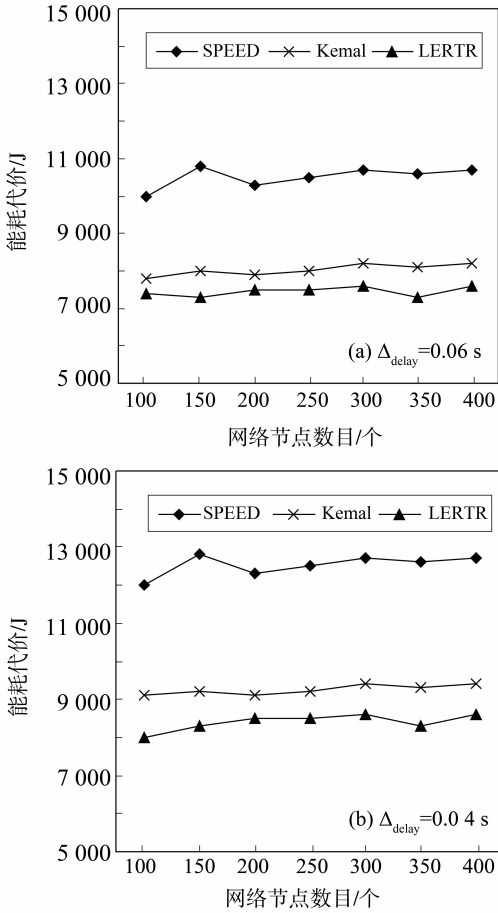


图 1 能耗代价和网络规模关系图

Fig. 1 The relation of energy consumption and network node number

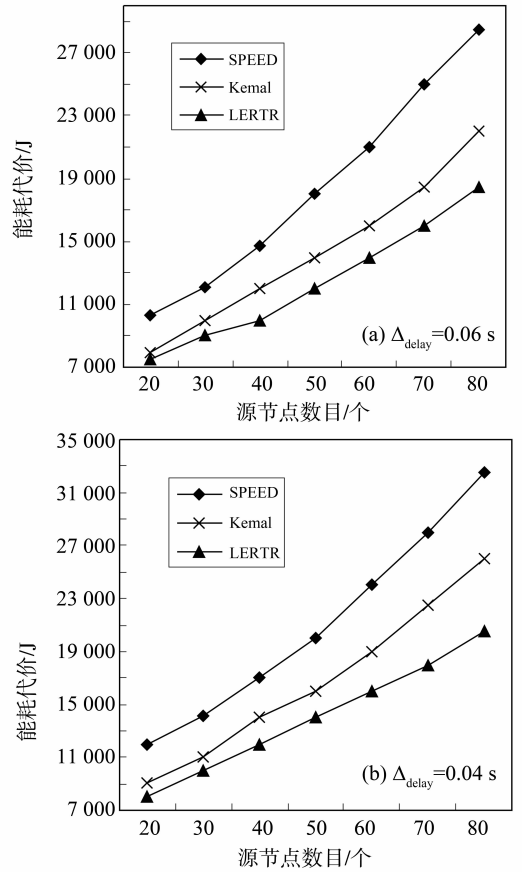


图 2 能耗代价和信号源节点数目关系图

Fig. 2 The relation of energy consumption and source node number

参考文献:

[1] IAN F A, TOMMASO M, KAUSHIK R C. A survey on wireless multimedia sensor networks[J]. Computer Networks, 2007, 51(4): 921-960.
 [2] 马华东, 陶丹. 多媒体传感器网络及其研究进展[J]. 软件学报, 2006, 17(9): 2013-2028.
 [3] 余燕平, 仇佩亮. 一种改进的 Steiner 树算法[J]. 通信学报, 2002, 23(11): 35-40.
 [4] KEMAL A, YOUNIS M. An energy-aware QoS routing protocol for wireless sensor networks[C]// Proceeding of International Conference on Distributed Computing Systems, IEEE Computer Society, 2003: 710-718.
 [5] EDUARDO F N, ANTONIO A F L, ALEJANDRO C F. Information fusion for wireless sensor networks: methods, models, and classifications[J]. ACM Computing Surveys, 2007, 39(3): 1-55.
 [6] 周灵, 王建新. 无线多媒体传感器网络服务质量控制路由协议研究[J]. 电子学报, 2011, 39(1): 149-156.

[7] LIANG W, LIU Y. Online data gathering for maximizing network lifetime in sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(1): 2-11.
 [8] 汪华斌, 罗中良. 基于功率控制 AODV 路由协议研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2011, 50(5): 59-63.
 [9] PETER K K L, HSU W J, YI P. Performance evaluation of efficient and reliable routing protocols for fixed-power sensor networks[J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2009, 8(5): 328-2335.
 [10] MIN C, VICTOR C M L, MAO S W, et al. Directional geographical routing for real-time video communications in wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2007, 30(17): 3368-3383.
 [11] TIAN H, JOHN A, LU C, et al. SPEED: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks[C]// Proceeding of International Conference on Distributed Computing System, IEEE Computer Society, 2003: 204-223.