

无线传感器网络 QoS 路由协议的研究

张留敏

武汉理工大学计算机科学与技术学院, 湖北武汉 (430063)

E-mail: zhangsmallfish125@yahoo.com.cn

摘 要: 无线传感器网络因其广泛的应用前景, 受到越来越多研究者的关注。本文在简要介绍无线传感器网络特点及 QoS 路由原理的基础上, 分析和探讨了两种经典的无线传感器网络 QoS 路由协议的算法思想和关键问题, 进而总结出两种路由算法各自的优缺点及改进之处, 为进一步研究提供了某些启示性想法。

关键词: 无线传感器网络, QoS 路由, SAR 协议, SPEED 协议

中图分类号: TP393

文献标识码: A

1. 引言

无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 是由大量具有特定功能的传感器节点通过自组织方式, 相互传递信息, 协同地完成特定功能的智能专用网络。^[1]它可以实时监测、感知和采集监控区域内的各种监测对象信息, 并以自组多跳方式传送给终端用户, 从而实现人类通过计算机及传感器网络系统等物理介质对现实世界的控制。

WSN 与传统的无线 Mesh 网络、蜂窝移动网络有着很大的不同, 甚至与 Ad Hoc 网络相比, WSN 也有着自己的特点: 节点数目大、能量、计算能力和存储容量有限, 节点具有数据融合能力, 无线传感器网络的拓扑结构易变化等等。正是由于上述特点, 无线传感器网络具有无可比拟的优势; 同时, 它也存在很多亟待解决的问题: 路由协议的设计必须尽可能满足节省能量、延长整个网络生存周期的要求; 路由协议的时间复杂度和空间复杂度都必须合适; 多媒体业务需求促使在各种路由协议设计中加入对 QoS 约束变量的考虑。

2. QoS 路由协议

服务质量 (Quality of Service, QoS) 就是网络为用户传送端到端数据时必须满足的一套可测量的预先定义的服务属性, 一般包括时延、可用带宽和分组丢包率等。^[2]无线传感器网络中 QoS 保证面临的主要问题有链路质量、链路带宽的预测困难, 网络动态性等。

在设计无线传感器网络 QoS 保证机制时, 要同时考虑用户应用的需求和系统网络结构的特性。表 1 给出了设计无线传感器网络 QoS 保证机制应当考虑的主要因素。

表 1 设计无线传感器网络 QoS 保证机制应当考虑的问题及因素

面临的问题	考虑的主要因素
节点部署及配置	按预先规划或自组织方式
节点通信	单跳或多跳方式
数据汇聚 (融合)	在网内 (部分或完全) 或网外进行汇聚或融合处理
网络的动态变化	包括传感器节点、sink 节点及感知目标的移动性
数据传输类型	连续模型、事件驱动、查询驱动及混合传输模型
节点功能	多种或一种功能; 同构或异构

除此之外, 在处理传感器网络的 QoS 业务时, 还应该注意以下几个方面: 网络带宽的限制; 消除冗余数据传输; 能量和延迟的平衡; 节点缓存大小的限制; 多业务类型的支持。

QoS 路由即根据网络上可利用的资源和数据流的 QoS 需求来决定的路由机制。其基本

问题就是在源节点和目的节点之间,如何找到一条能够同时满足多个 QoS 约束条件的路径。QoS 路由的工作包括两个方面,一是找到满足 QoS 需求的路由,并在连接持续过程中维护该路由;二是尽量提高网络资源的利用率。^[3]原有大部分路由协议对业务提供尽力而为(Best effort)的服务,但随着人们对图像、音频及视频等多媒体业务的需求日益增加,无线传感器网络路由协议的设计必须权衡考虑能耗与 QoS 约束的关系。QoS 需求可以,也必须与无线传感器网络路由协议相结合,以更好地满足用户提出的各种 QoS 性能指标,适应无线传感器网络的不同应用场景。然而,提出某个算法同时解决节能优化及多 QoS 变量约束是 NP 完全问题,^[4-9]只能在众多标准约束变量中做出权衡。目前,典型的基于 QoS 的路由协议主要有时序分配路由(Sequential Assignment Routing, SAR)协议和 SPEED 实时路由协议。

3. 经典无线传感器网络 QoS 路由协议描述

3.1 SAR 协议

SAR 协议是第一个具有 QoS 意识的路由协议,其路由决策依赖于能量资源、每条路径的 QoS 评价以及每个分组的优先级三个要素。该协议采用了多径路由备份方法和局部路径恢复机制。为了在每个传感节点与 sink 节点间生成多条路由,需要维护多个树结构,每个树以 sink 节点的邻接点(落在 sink 节点有效传输半径内的节点)为根向外生成,枝干的选择需要满足一定的 QoS 需求并要有一定的能量储备。这种处理方法使大多数传感节点可能同时属于多个树,则选择其中之一将采集数据传送到 sink 节点。如图 1 所示:

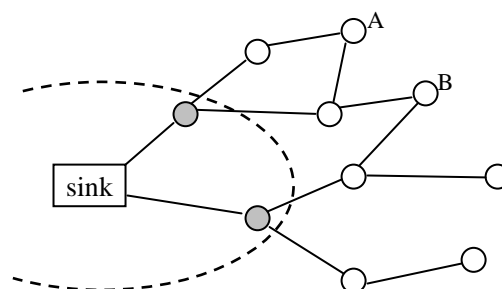


图 1 SAR 协议多路径树结构示例

注:图中传感节点 A、B 到 sink 节点的路径均有多条,灰色节点为 sink 节点的邻接点。

如上所述,整个过程必须建立根植于传感节点到 sink 节点之间的、避免低能量节点并满足 QoS 保证的树。因此,SAR 协议的目标就是在网络整个生存周期内最小化平均加权 QoS 准则(加权 QoS 准则即一个可加性 QoS 准则和分组优先级的权值系数之乘积)。^[10,11]该协议还考虑到网络拓扑结构的任何变化会引起 sink 节点触发周期性的路径重新计算过于频繁,在邻居节点之间,通过强化每条路径上、下游节点之间路由表的一致性,使用基于局部路径恢复机制的握手交互过程来恢复故障。这样 SAR 协议既维护了传感节点到 sink 节点的多条路径,也确保了容错和故障的便捷。

3.2 SPEED 路由协议

3.2.1 SPEED 协议的基本思想

SPEED 协议是针对汇聚节点需要对传感节点采集的数据做出实时反应而提出的,还提供了软件实时的端到端传输速率保证、网络拥塞控制和负载平衡机制。该协议要求每个节点

维护其邻居的传输延迟,以得到整个网络的负载情况,并采用局部地理信息转发来寻找路径,同时通过邻居反馈机制保证网络传输速率在全局定义的传输速率阈值之上。节点还通过反向压力路由重建机制避开网络拥塞过大的链路和路由空洞,以此确保每个报文分组能以指定速率转发给汇聚节点。^[12,13] SNGF (Stateless Non-Deterministic Geographic Forwarding) 路由模块和其它四个模块(反向路由重建、信标交换、NFL 及延迟估计)共同构建了 SPEED 路由协议的网络层协议,如图 2^[1,11]所示:

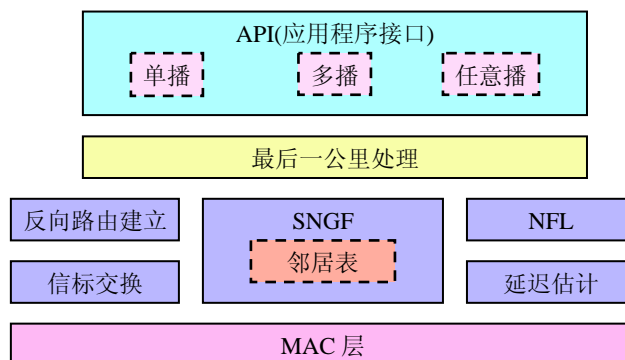


图 2 SPEED 实时路由协议框架

注:最后一公里处理(Last Mile Process),是指仅当数据到达目的节点网络层之上时才启动该过程。API 是应用程序接口,图示给出了三种应用类型,即实时单播、实时多播及任意播。

3.2.2 SPEED 协议的设计目标

基于上述 SPEED 路由协议的工作机制及特点,其总体设计目标主要有七个方面:^[14,15]

- 1) 只保持邻居节点的信息,不需要路由表;
- 2) 提供“力所能及”的速度来满足传输信息的实时要求;
- 3) 不需要 MAC 层有特殊的实时机制或额外的 MAC 层 QoS 机制;
- 4) 利用反向压力机制避开网络拥塞,提供 QoS 保证;
- 5) 利用不确定的前向并发路径来平衡网络繁忙时的负载;
- 6) 采用分布式的算法来减少洪泛控制信息;
- 7) 采用反向压力路由重建机制避开网络拥塞过大的链路和路由空洞。

3.2.3 SPEED 协议的核心结构

1) 延迟估计机制

在 SPEED 协议中,延迟估计机制的作用是得到网络的负载情况,判断网络是否发生拥塞。节点记录到邻居节点的通信延迟来表示网络局部的通信负载。具体过程是:发送节点给数据分组并加上时间戳;接收节点计算从收到数据分组到发出 ACK 的时间间隔,并将其作为一个字段加入 ACK 报文;发送节点收到 ACK 后,从收发时间差中减去接收节点的处理时间,得到一跳的通信延迟。通信延迟的计算方法如公式(1):

$$T_{delay} = T_{DATA} + T_{ACK} \quad (1)$$

其中, T_{DATA} 是发送节点将数据分组传送到接收节点的时间, T_{ACK} 是接收节点发送 ACK 报文到发送节点所耗费的时间, T_{delay} 是发送节点到该邻居节点一跳的通信延迟时间。

2) SNGF 算法

SNGF 算法用来选择满足传输速率要求的下一跳节点。^[11]节点将邻居节点分为两类:比

自己距离目标区域更近的节点和比自己距离目标区域更远的节点。前者称为候选转发节点集合 (FCS)，节点计算到其 FCS 集合中的每个节点的传输速率。FCS 集合中的节点又根据传输速率是否满足预定的传输速率阈值要求，再分为两类：大于速率阈值的邻居节点和小于速率阈值的邻居节点。若 FCS 集中有节点的传输速率大于速率阈值，则在这些节点中按照一定的概率分布选择下一跳节点，节点的传输速率越大，被选中的概率越大。

3) 邻居反馈策略 (NFL)

邻居反馈策略是当 SNGF 路由算法中找不到满足传输速率要求的下一跳节点时采取的补偿机制。节点首先查看 FCS 集合的节点，若 FCS 集合中所有节点的传输差错率大于零，则按照特定的公式计算转发概率；若存在节点的传输差错率为零，表明存在节点满足传输速率要求，因而设转发概率为 1，即全部转发。此时 MAC 层收集差错信息，并把到邻居节点的传输差错率通告给转发比例控制器，转发比例控制器根据这些差错率计算出转发概率，作为 SNGF 路由算法选择路由的依据。满足传输速率阈值的数据按照 SNGF 算法决定的路由传输出去，而不满足传输速率阈值的数据传输由邻居反馈环机制计算转发概率。

SNGF 算法与邻居反馈策略联合工作过程如图 3 所示：

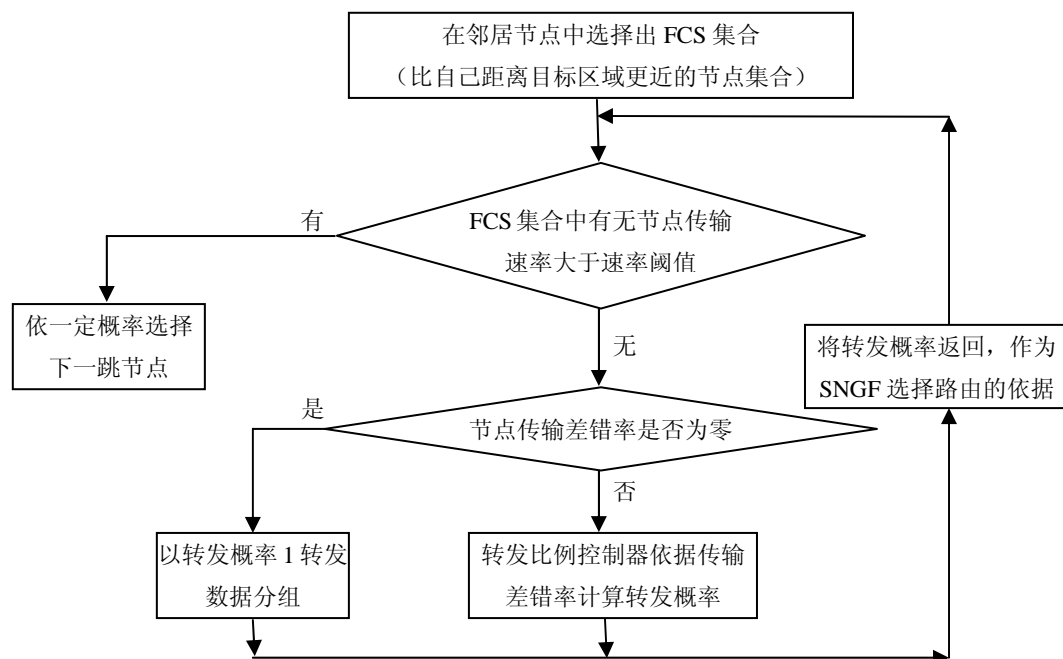


图 3 SNGF 算法与邻居反馈策略协同工作流程图

4) 反向压力路由变更机制

反向压力路由变更机制在 SPEED 协议中用来避免拥塞和路由空洞。当网络中某个区域发生拥塞事件时，节点不再能够满足传输速率要求，体现在数据量会突然增多，传输负载会急剧加大。此时，节点便会使用反向压力信标消息向上一跳节点报告拥塞，并表明拥塞后的传输延迟，上一跳节点则会按照上述机制重新选择下一跳节点。

4. SAR 协议与 SPEED 协议小结

在充分理解 SAR 与 SPEED 路由协议工作原理的基础上，对各自优缺点进行分析与总结。SAR 协议采用多路由备份方法和局部路径恢复机制，通过建立根植于传感节点到 sink

节点之间的、避免低能量节点的树，首次考虑并满足了一定的 QoS 保证。通过分析与仿真得知，由于充分考虑了每个数据分组的优先级，SAR 协议比最小能量准则算法（只关注每个分组的能耗而没有考虑分组优先级）消耗更少的能量。虽然该协议维护了传感节点到 sink 节点的多条路径，实现了容错和 QoS 约束，但却要为维护每个传感器节点的路由表和状态信息付出较大的存储开销。因此，不适用于大型的和拓扑频繁变化的网络。

在无线传感器网络某些应用当中，要求基站或汇聚节点对采集查询的数据做出实时反应，因此要求节点至基站或汇聚节点间的数据传输必须保持一定的传输速率。针对这些要求，SPEED 实时 QoS 路由协议利用局部地理信息转发来寻找路径，并通过 NFL 反馈机制保证网络传输速率在全局定义的传输速率阈值之上，以此确保每个报文分组能以指定速率转发给汇聚节点。节点还通过反向压力路由重建机制避开网络拥塞过大的链路和路由空洞，在一定程度上提供了 QoS 保证。综上所述，SPEED 协议在端到端时延、能量消耗、邻居节点无效比以及平衡网络流量负载等方面都具有优越性。但是该协议在路由过程中没有进一步考虑能量准则，在该协议中加入对能量的感知和控制是一个值得研究的方向。同时，该协议传输的报文分组没有考虑优先级机制，未能最大可能地满足实时性要求，这一点也可以予以考虑。

5. 总结与展望

尽管传统的无线局域网或者移动 Ad Hoc 网络基于提高服务质量 QoS 和公平性提出了一些典型路由协议，但这些协议的主要任务不是考虑网络能量消耗，而只是单单追求端到端的延迟最小、网络利用率最高以及避免通信拥塞和均衡网络流量的最优路径。由于无线传感器网络具有节点能量受限、节点数目大等特点，导致传统无线网络路由协议不再适合，而且也很难设计一个适合无线传感器网络各种不同应用场景的通用路由协议。

WSN 路由协议设计的首要目标就是在执行数据通信功能前提下尽可能延长网络的生存周期，并通过积极的能量管理技术——不同的节能策略来避免网络连接性节点能量不足而造成的恶化。在基于 QoS 约束的无线传感器网络中，网络各层特别是网络层路由协议的设计必须权衡考虑能耗和数据质量的关系。尤其是，当节点传输数据到基站或 sink 节点时，网络必须满足某种或某几种用户业务要求的 QoS 准则，如延迟、带宽、丢包率等。本文详述的 SAR 协议与 SPEED 协议均是为适应某些无线传感器网络应用场景而提出的 QoS 路由协议。仿真实验表明，它们在一定程度上满足某些 QoS 准则要求，但也存在一些如能量约束、数据分组优先级等亟待改进的问题，这些问题的解决正是研究者的努力方向。

参考文献

- [1] 宋文,王兵,周应宾.无线传感器网络技术与应用.北京:电子工业出版社,2007
- [2] 于宏毅 等.无线移动自组织网.北京:人民邮电出版社,2005.
- [3] 李腊元,李春林.计算机网络技术(第二版).北京:国防工业出版社,2004.
- [4] Gong Bencan, Li Layuan, Wang Xiangli. Multicast Routing Based on Ant Algorithm with Multiple Constraints. IEEE 2007, 1945-1948.
- [5] Wang Yi,Zhang Deyun, Ma Xinxin. QoS Route Discovery Method Based on Fuzzy Information for Wireless Sensor Networks.传感技术学报,2007,20(3)
- [6] Zhao Lei, Xu Chaonong, Xu Yongjun, Li Xiaowei. Energy-Aware QoS Control for Wireless Sensor Network. IEEE 2006.
- [7] Weike Chen,Wenfeng Li,Heng Shou. A QoS_based Adaptive Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks. IEEE 2006,1947-1952
- [8] Liu Dongxing, Akhilesh Shrestha. QoS Reliability of Hierarchical Clustered Wireless Sensor Networks. IEEE 2006, 641-646
- [9] Kemal A, Mohamed Y. Energy and QoS Aware Routing in Wireless Sensor Networks[J]. Cluster Computing, 2005, 8(2/3): 179-188.
- [10]喻其财,邢建平,周 燕. 无线传感器网络路由协议[OL].
<http://www.gotoread.com/article/?MagID=11086&wid=60515>
- [11] 春.路由协议和算法[OL]. <http://blog.eccn.com/u/qianmin/index.htm>
- [12] Tian He, John A Stankovic, Chenyang Lu, Tarek Abdelzaher. SPEED: A Real-Time Routing Protocol for Sensor Networks[OL]. http://www.cse.wustl.edu/~lu/papers/icdcs03_speed.pdf
- [13] Mao Yingchi, Gong Haigang, Liu Ming. An Energy Efficient and location-Independent QoS Protocol for Wireless Sensor Networks. Journal of Computer Research and Development. 2006,43(6),1019-1026
- [14] 彭 静, 刘光祐, 谢世欢. 无线传感器网络路由协议研究现状与趋势 [OL].http://qkzz.net/magazine/1001-3695/2007/02/1421280_2.htm
- [15]Pazzini. 无线传感器网络路由协议[OL]. <http://blog.csdn.net/hnhbdss/archive/2006/07/19/942699.aspx>

Wireless Sensor Network QoS Routing Protocol Research

Zhang Liumin

College of Computer Science and Technology, Wuhan University of Technology,
WuHan (430063)

Abstract

Wireless sensor network has been paid more and more researcher's attention because of its widespread application prospects. Based on the brief introduction of wireless sensor network's features and QoS routing principles, this article analyzes and discusses the algorithm thoughts and key problems of the two kind of classical wireless sensor network QoS routing protocols. Furthermore, it summarizes the two routing algorithms' respective advantages and disadvantages and improving points to provide certain revelatory idea for the further research.

Keywords: wireless sensor network, QoS routing, SAR protocol, SPEED protocol

作者简介: 张留敏 (1981—), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 主要研究方向为高性能网络、无线传感器网络。