

无线多媒体传感器网络路由协议研究

周 灵^{1,2}, 王建新¹

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

摘 要: 传统的无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)路由协议不能很好地适应多媒体数据流的传输. 近来, 提出了一些无线多媒体传感器网络(Wireless Multimedia Sensor Networks, WMSNs)路由协议. 本文首先讲述了 WMSNs 服务质量保障路由问题及其面临的挑战, 从五个方面归纳了传统的 WSNs 路由协议, 在此基础上论述了 WMSNs 路由协议的 QoS 需求、设计原则、控制策略及其限制. 然后, 综述了当前典型的 WMSNs 服务质量保障控制路由协议, 包括各协议的设计目标、核心思想、基本策略、主要内容及其优缺点; 在列表比较的基础上, 研究了存在的问题和缺陷. 最后, 指出了 WMSNs 路由协议研究的开放性问题及其发展方向.

关键词: 无线传感器网络; 多媒体; 路由协议; 服务质量控制; 综述

中图分类号: TP 393.02 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 01-0149-08

Research on Routing Protocol in Wireless Multimedia Sensor Networks

ZHOU Ling^{1,2}, WANG Jian-xin¹

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. Department of Computer, Foshan University, Foshan, Guangdong 528000, China)

Abstract: It is not suitable to use conventional wireless sensor networks (WSNs) routing protocols to transfer multimedia content such as video and audio streams on wireless multimedia sensor networks (WMSNs). In order to address those problems, a few new routing protocols were introduced recently. The QoS guarantee routing problem for WMSNs is defined firstly and some facing challenges are discussed in the field. Secondly, after classifying conventional WSNs routing protocols into five groups according to their features, the QoS routing protocol requirements for WMSNs are analyzed, along with their design principles, strategies and limitations. Thirdly, as the main content, the representative QoS routing protocols for WMSNs are surveyed in detail, including their design objective, core idea, basic strategy, main procedure, advantages and drawbacks. Ultimately, open research issues for WMSNs routing protocol are also pointed out.

Key words: wireless sensor networks; multimedia; routing protocol; QoS; survey

1 引言

由于复杂环境监测的需要, 无线传感器网络所获取的简单数据并不能完全满足人们对环境监测的全面需求, 迫切需要将信息量大、内容丰富的图像、音频和视频等多媒体信息引入到物理环境监测活动中来, 从而实现全方位、细粒度、精确的信息监测. 特别是传感器硬件技术的快速发展, 使得低成本的图像、音视频等传感器设计已经成为事实; 如图 1 所示, 为某视频传感器实物图. 在这种环境下, 无线多媒体传感器网络正成为一个崭新的研究



图1 视频传感器

领域^[1], 可广泛地应用于军事、工农业控制、生物医疗、健康监测等众多领域.

WMSNs 是 WSNs 内涵的延伸与发展. 首先, 与 WSNs 一样, WMSNs 具有四大资源受限(能量受限、带宽受限、计算能力受限、存储能力受限)、自组性、协同性、多跳性、泛在性; 节点数目量大、随机部署, 一般没有统一编址; 网络设计面向特定应用; 网络拓扑变化较频繁; 通信链路服务质量较差等特征^[2]. 另外, 相对传统 WSNs 而言, WMSNs 还具有如下特性: (1) 很强的服务质量(Quality of Server, QoS)控制保障要求; (2) 较大的多媒体数据传输量, 节能问题尤为突出; (3) 具有多媒体数据流特性的音、视频数据流模型; (4) 应用服务种类众多(两大类, 六种类型^[1]).

路由协议的目的是在通信网络中建立并维护数据传输路径. 由于其在网络通信中占有重要地位, 所以一直是通信协议研究的重要内容. 如图 2 所示, 为 WMSNs 网络及路由体系结构图. 相对于传统 WSNs, WMSNs 具有更为丰富的感知能力, 能够提供更加丰富的服务种类. 由于 WMSNs 传送音频、图像、视频等多媒体业务数据流, 对带宽、时延、抖动、可靠性等 QoS 参数较敏感, 这就更加需要 WMSNs 为多媒体数据流通信提供有 QoS 保障控制的路由协议. 事实上, 无线多媒体传感器网络路由协议本质上是服务质量保障控制的无线多跳传感器路由协议.

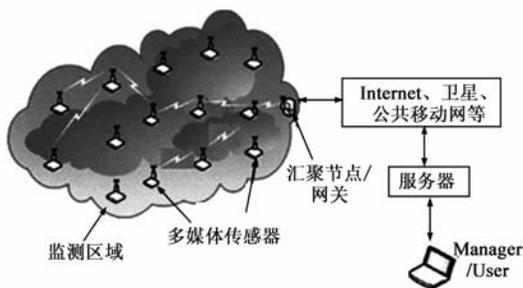


图2 WMSNs及路由体系结构

WMSNs 服务质量控制路由问题可描述为: 为 WMSNs 多媒体通信业务流, 在四大受限条件下, 提供有服务质量保障的通信传输路径. QoS 控制路由协议是 WMSNs 通信协议的核心内容, 是 WMSNs 服务质量保障体系结构的重要组成部分和关键技术之一. 多媒体通信业务要求 WMSNs 路由协议必须提供 QoS 控制和保障, 包括提供时延、抖动等实时性约束; 提供丢包率、连通性等可靠性保障; 节省能耗, 延长节点寿命/网络生存时间; 提供其他 QoS 保障等. 因此, 研究 WMSNs 基于服务质量保障控制的路由协议具有重要的理论意义和实际应用价值.

2 WSNs 路由协议分类及 WMSNs 的 QoS 需求

2.1 WSNs 路由协议研究分类

目前, 国内外主要是基于传统的 WSNs 进行了较多的能量受限的路由协议研究^[3], 可分为五大类: 以数据为中心的路由协议; 分层结构路由协议; 基于地理位置信息的路由协议; 基于网络流的路由协议; 基于 QoS 约束的 WSNs 路由协议.

(1) 以数据为中心 (Data-centric) 的路由协议. 这类协议的基本思想为: 选择感兴趣数据所在的特定区域进行查询, 避免监测区域所有节点均进行数据传输, 带来大量的数据冗余, 严重消耗节点/网络能量. 优点为: 以应用为中心, 目标性强, 节省能量. 缺点是: 对感兴趣区域的数据进行属性命名较困难, 也缺乏统一的标准. 典型协议有: SPIN^[4]; Directed Diffusion^[5]等.

(2) 分层结构 (Hierarchical/Cluster) 的路由协议. 基本思想为: 将网络节点分簇, 一个簇区域内节点只和簇头通信, 簇头和汇聚节点通信; 簇内数据聚合; 有效地节省通信能量. 优点是可扩展性强, 节省能量. 缺点为分簇以及簇头的选择、管理; 路由维护开销大; 失效、能量平衡等问题. 典型协议有 LEACH^[6]及其改进协议等.

(3) 基于地理位置信息 (Location/Position-based) 的路由协议. 这类协议的目的也是降低能耗. 基本思想为: 利用地理位置信息进行路由下一跳节点的选择, 具有很强的导向性, 可以优化路由并达到节省能量的目的. 优点是: 每个节点不需存储全局路由表; 降低了节点的存储、处理要求; 具有良好的网络可扩展性. 缺点为: 路径不一定是最优, 路由空洞等问题; 典型协议有: GEAR^[7]等.

(4) 基于网络流 (Network-flow) 的路由协议. 其基本思想为: 按照某特定参数对网络进行优化, 以最大化/最小化这些网络参数. 优点为: 能量消耗最小/网络生存时间最大等. 缺点是: 需要全局网络状态信息. 典型协议见文献[8,9]等.

(5) 基于 QoS 约束 (QoS-constrained) 的 WSNs 路由协议. 这类协议的目的是: 提供 QoS 保障控制. 其基本思想是: 大多使用全局状态信息, 根据图论算法使用时延、跳数或者代价函数为参数, 计算最短路径树或者最小生成树或者使用智能算法选择优化的路径. 优点为: 提供了一定的 QoS 保障. 缺点是: 协议较复杂, 需要全局状态; 很少考虑节能问题. 典型协议有: SAR 协议^[10]、Younis 协议^[11]等.

由于无线传感器网络是与应用高度相关的, 因此根据不同的应用要求和路径选择策略, WSNs 路由协议分类有不同的方式和分类结果. 但不管怎么分类, WSNs 的明显特征是节点能量受限, 降低通信能耗和能量感知一直是 WSNs 路由协议设计的首要目标.

2.2 WMSNs 的 QoS 需求与参数

WMSNs 服务质量控制路由协议的主要目的是: 在无线多跳传感器网络环境中, 为多媒体数据流传输搜索有 QoS 保障的传输路径. 对有 QoS 需求的多媒体业务, 比如实时图像传输等而言, QoS 保障是路由协议的首要目标.

在传统的 WSNs 中, 数据传输也有 QoS 约束问题; 但 WSNs 中基于 QoS 约束的路由协议只是为了满足简单数据传输的例如实时性等要求, 而提供时延、抖动等 QoS 约束^[12]. WSNs 不是多媒体业务承载网络, 事实上也不存在图像、音频和视频等多媒体数据流. WMSNs 则不一样, 就网络体系结构而言, 在物理底层, WMSNs 使用音频传感器、图像传感器和视频传感器等硬件设备, 采集多媒体数据; 在网络通信层, WMSNs 要求采用有

QoS 保障的 MAC 协议、路由协议,为多媒体数据传输提供 QoS 保障;在应用高层,WMSNs 也使用了不同于简单数据的多媒体数据编码、压缩技术。就承载的数据流业务而言,多媒体数据流在数据量大小、数据传输模式、传输能耗和业务需求等方面和简单数据传输也有着显著的差异。因此,WMSNs 必须为承载的多媒体业务提供全方位的 QoS 保障^[13]。

WMSNs 的 QoS 保障体系结构可以表示为如图 3 所示,包括物理层、数据链路层、路由层、传输层、应用层 QoS 保障及时钟同步、节点定位等关键技术

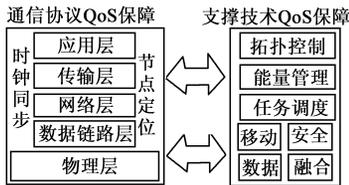


图3 QoS保障体系结构

的 QoS 保障部分,也包括拓扑控制、远程控制、网络安全、能量管理、移动管理、数据管理、任务分配等支撑技术的 QoS 保障部分。在 WMSNs 中,节点除了数据转发功能外,还承担着监测物理环境的任务。QoS 保障不仅仅依赖于数据分组的路由传输过程的服务质量,还取决于其数据采集、传输编码、多媒体压缩/解压缩等方面的能力,例如,在物理层,服务质量还包括多媒体传感器对物理事件的检测能力;在数量链路层涉及拓扑组网和覆盖问题、MAC 协议能量消耗问题等。

路由协议 QoS 保障只考虑与网络数据传输有关的 QoS 部件及其参数。在 WMSNs 网络层,服务质量可以用一组可以测量的表示数据传输性能的网络参数来衡量,主要包括网络生存时间、时延、抖动、带宽、吞吐量、分组丢失率、可靠性等。

(1)网络生存时间(Network Lifetime)。网络生存时间有多种定义:有人提出从 WMSNs 初始部署开始到第一个节点能量耗尽失去传感能力为止,这段时间为网络生存时间;另外,网络生存时间还可以定义为 WMSNs 从一个连通的网络开始到一部分节点能量耗尽导致功能失效,出现网络不连通为止;还有学者提出网络生存时间定义为 WMSNs 网络初始运行到一定数量的节点(如半数节点)能量耗尽,导致传感功能失效为止这段时间。不管怎么定义,网络生存时间是一个和节点/网络能耗紧密相关的概念。设法延长网络生存时间是无线传感器网络提供网络服务的前提条件,因此,到目前和为止,绝大多数 WSNs 路由协议设计都是围绕节点/网络能耗问题展开的。WMSNs 能耗模型和 WSNs 能耗模型并不一样,WMSNs 能耗在数据传感、计算、存储、传输、发送/接收等方面呈“均匀”分布;而 WSNs 能耗主要在数据传输、发送/接收方面,相对而言,传感、计算、存储能耗较小,呈“不均匀”分布。

(2)时延(Delay)。多媒体传感数据具有时间连续性

和实时性,WMSNs 音频、图像和视频监测数据传输要求较严格的时延性能。其端到端时延主要包括传感时延、处理时延、排队时延、传输时延等。优化的路由协议应该具有良好的时延特性,保证多媒体数据的实时传输。具有实时性要求的数据若超时传送到汇聚/网关节点将毫无意义,甚至成为干扰信息。

(3)抖动(Jitter)。抖动和时延一样,也是 WMSNs 实时业务的主要参数。影响时延抖动的主要因素有:传输链路带宽不稳定;节点的存储/缓存能力;并发业务的数量等。抖动性能对节点/网络存储能力受限、无线链路带宽稀少的 WMSNs 多媒体传输而言显得更为严峻。

(4)带宽(Bandwidth)。与带宽性能有关的主要因素有:初始传感数据量的大小;数据传输压缩/融合策略;网络带宽分配策略。合理使用带宽,可以大大提高网络的传输效率。当网络使用加权公平队列(WFQ)调度策略时,最大时延和抖动都是带宽的函数,因此,合理的带宽保障也是时延保障的基础。传输速率和带宽关系可表示为: $C = 2W \log_2 M$,其中 C 为信道最大传输速率/容量, W 为信道带宽, M 是信号/电平个数。

(5)吞吐量(Throughput)。吞吐量可以定义为单位时间内汇聚/网关节点接收到的数据量的大小。吞吐量是 WMSNs 网络运行性能的一个重要衡量指标。

(6)分组丢失率(Packet Loss)。分组丢失率可以定义为一段时间内信宿收到的数据分组数对信源发出的分组数的比值。分组丢失率也是 WMSNs 网络运行性能的一个重要指标。

(7)可靠性(Reliability)。对有较高可靠要求的业务,可靠性也是一个重要的 QoS 保障参数。

3 WMSNs 路由协议设计原则与策略

3.1 设计原则

WMSNs 路由协议设计的原则:

(1)必须提供 QoS 控制保障,这是 WMSNs 路由协议的首要目标。

(2)在 QoS 保障基础上,必须考虑有效的能量最小化策略,优化/最大化网络生存时间。

(3)应该采用无状态路由或者局部路由的下一跳路由选择策略。由于 WMSNs 一般不统一编址,节点部署数目众多,因此,要尽量避免使用需要全局状态信息的端到端链路状态路由协议。使用无状态路由协议或者局部分布式路由协议,也有利于适应网络拓扑变化和节点移动性要求^[14]。

3.2 相关策略及其限制

进行 WMSNs 路由协议的设计,有一些基本的策略。对相关策略及其限制探索、比较如下:

(1)数据传输方式。数据传输方式有基于查询的数

据传输、事件驱动的数据传输和连续型数据传输三种。连续型数据传输方式不管是否有检测事件出现,也不管管理节点是否有查询需求,各传感器节点均以恒定的速率向汇聚节点发送传感数据,因此能耗很大,不适合 WMSNs 进行多媒体数据的传输^[15]。WMSNs 多媒体通信应当尽量使用基于查询或者事件驱动的方式进行。

(2)多跳通信策略。文献表明^[16],无线传输的能量消耗与传输距离的 2~4 次方成正比,在几何距离为 d 的两个节点间传输 k 比特数据的能耗公式为: $E_T(k, d) = kE_{amp}d^\gamma$,其中, E_{amp} 为发送每比特数据的能耗, γ 为路径损耗系数,一般取值范围^[2,4]。通信能耗还存在三角不等式:如图 4 所示三角形拓扑中,节点 A、B 通过两条短边 b、a 进行多跳通信能耗小于直接通过长边 c 进行通信的能耗。所以,通过多跳方式减少长距离的无线电传输,可以利用中继节点的转发能力来达到节能的目的。

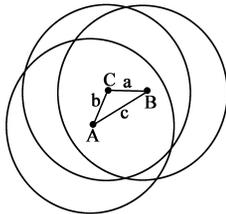


图4 能耗三角不等式

(3)全局/局部网络状态信息策略。路由协议负责寻找一条路径,将数据从信源传输到信宿。一条路径通常由多条链路组成,在本质上,一条有 QoS 保障的端到端路径必须知道每一条链路的状态信息,再根据可加性、可乘性或者最小性等约束条件来选择优化的路径。在传统的 IP 网络和 ATM 网络中,我们根据路由探测包的发送或者路由信息的交换来获取全局网络状态,在此基础上进行 QoS 路由,比如基于链路状态(Link-state)的 OSPF 协议、基于距离矢量(Distance-vector)的 RIP 协议等。由于 WMSNs 特定的特性,获取和利用全局网络状态不一定可行或者有效,基于局部状态信息和无状态信息的分布式或者贪婪式协议具有较大的优势。

(4)节点间局部通信和数据融合策略。在 WSNs 网络中,特别是以数据为中心的路由方式中强调利用节点间局部通信进行数据融合^[17]。通过这种方式可以进行相关数据的压缩/融合,减少数据传输量,达到节省能耗的目的。但 WMSNs 中图像、视频传感器有严格的方向性,导致传感数据各向异性的传感模型。而且多媒体传感器有较大的视距,网络覆盖模型和传统 WSNs 有较大区别。不同传感模型和覆盖模型生成的网络拓扑也严重地影响路由协议的设计。如图 5 所示,其中(a)表示传统的 WSNs;(b)表示 WMSNs,其中短实线代表视频传感器的视觉方向。由于多媒体传感器各向异性,相邻节点间传感数据的时空相关性不强,与 WSNs 相比进行数据融合不一定效率高^[15]。另外,由于多媒体传感器具有较长的视距,同时分布较稀疏,WMSNs 的事件传感半径远大于 WSNs;节点间局部通信进行多媒体数据的传

输、融合处理还可能导致大功率的能耗。

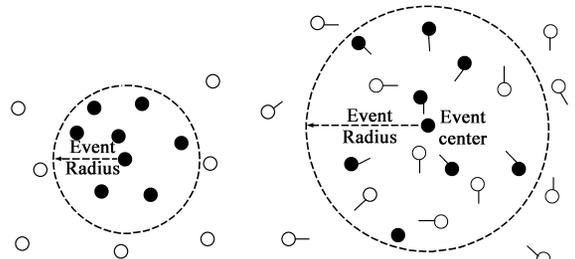


图5 (a) WSNs事件半径及节点各向同性 (b) WMSNs事件半径及节点各向异性

(5)多路径策略。多路径策略指在信源与信宿之间建立多条路径,在多路径之间并发数据传输或者根据特定的代价函数选择优化的路径进行数据传输,也可以根据不同的优先级选择不同的 QoS 路径。这样有利于提供 QoS 保障;进行能耗均衡,延长网络生存期;提供冗余路径,提高可靠性等。多路径是一个比较好的策略,问题是多路径的搜索通常需要较高的计算复杂度,信标交换开销也较大。

(6)地理位置信息策略。由于很多情况下,WMSNs 需要所感知信息的地理位置,比如移动目标检测,如果没有目标地理位置信息的确定,所有检测到的信息都是没有任何意义的。因此,利用地理位置信息来进行路由选择也是可行和有效的^[18]。首先,利用地理位置信息进行路径选择具有很强的导向性,可以优化多跳短距离路由,节省能量并减少时延。其次,局部的地理位置信息避免了全局网络状态的存储,也不需要为了获取信息而进行大量的局部通信。因此,非常适合 WMSNs 节点计算能力受限、存储能力受限和能量受限的特点。额外的开销是需要进行空洞检测与避免。

4 典型的 WMSNs 路由协议

通过对当前 WMSNs 路由协议进行研究,选择较为重要的几个典型协议,对其设计目标、核心思想、主要内容、优缺点进行详细的剖析,包括: SPEED 协议、MPMPS 协议、REAR 协议、TPGF 协议、ReInForM 协议、MMSPEED 协议、MLRR 协议等。一方面,考虑到 WMSNs 路由协议是 QoS 约束的 WSNs 路由协议的继承和发展;另一方面,考虑到 WMSNs 服务质量控制路由协议目前还不是很成熟,下面也先介绍了两个典型的基于 QoS 约束的 WSNs 路由协议: SAR 路由协议和 Younis 协议。

4.1 典型协议

(1) SAR (Sequential Assignment Routing) 协议^[10]是第一个考虑 QoS 保障的 WSNs 路由协议。该协议使用路由路径的能量和数据包的优先级为参数,以汇聚节点的一跳邻居节点为树根,通过反向建立数据源到汇聚节点的多条路径(类似于多个反向组播路由树)。路由时

根据能量参数和 QoS 参数选择优化的路径,并且在路由路径失效时,通过其他路径进行路由恢复.该协议生成多棵路由树,缺点是路由表较复杂,特别是节点间要维护这种全局路由信息,能量和代价消耗都很大;可扩展性差,在大规模的 WSNs 网络中可能无法使用.

SAR 协议是基于多路径冗余备用而提供 QoS 保障的典型协议.

(2) Younis 等提出了一个能量感知的 QoS 路由协议^[11].该协议将 WSNs 中的 QoS 路由问题描述为传统的路径受限路径优化问题 PCPO(Path constrained path optimization),是一个较全面综合考虑各种 QoS 保障的 WSNs 路由协议.其核心思想是在保障时延约束和最大化非实时数据吞吐量的条件下,尽量使用低代价路径进行路由. Yoonis 协议为每条链路分配如下代价函数:

$$Cost(i, j) = \sum_{k=0}^6 CF_k = c_0 \times (dist_{ij}) + c_1 \times f(energy_j) + c_2/T_j + c_3 + c_4 + c_5 + c_6 \times f(e_{ij})$$

公式中六个参数包括:无线传输能耗部分 $c_0 \times (dist_{ij})$, 正比于节点 i, j 间的传输距离 $dist_{ij}$;节点剩余能量部分 $c_1 \times f(energy_j)$;节点能耗相对负荷部分 c_2/T_j ;节点由不活动状态转变为中继节点活动状态的花销部分 c_3 ;代表节点是否具有传感功能的权重部分 c_4 ;反映节点中继负荷权重部分 c_5 ;最后一个参数 $c_6 \times f(e_{ij})$ 代表节点 i, j 间几何距离与缓存大小的比值,为链路信道差错率参数.协议的核心部分是使用 k -最短路径算法根据以上代价函数生成多条低代价路径的候选集;在满足端到端时延约束的条件下,选择有最大吞吐率的路径作为路由最优路径.同时,使用排队模型,对各类数据进行实时/非实时优先级分类;使用不同的队列对不同优先级的数据进行调度.

Yoonis 协议是一个比较优秀的基于全局状态信息的 QoS 保障路由协议.其缺点是核心的 k -最短路径算法时间复杂度较高;基于全局链路状态信息提供端到端 QoS 保障,路径建立和维护代价较大.

(3) SPEED 协议是一个基于地理位置信息的无状态实时路由协议^[19].其主要目的是为有实时性要求的数据流提供软实时保障.其无状态地理转发环节 SNGF(Stateless Non-deterministic Geographic Forwarding)是协议的核心部分,负责路由下一跳的选择. SNGF 定义了三个概念:邻居结点集 NS 、转发候选集 FS 和中继速率 $Speed$.邻居结点集 NS_i 表示节点 i 的邻居节点集合;转发候选集 $FS_i(D) = \{node \in NS_i | L - L_{next} > 0\}$;中继速率 $Speed$ 定义为: $Speed_i^j(D) = (L - L_{next})/Hopdelay_i^j$ 其中 $Hopdelay$ 表示从节点 i 到节点 j 的时延,由时延估计部分给出; $Speed$ 实质上是一个步进速率(Progress

speed).具体的参数含义和物理意义如图 6 所示.

该协议核心思想是从 $FS_i(D)$ 中选择中继速率 $Speed_i^j(D)$ 大于某个给定的速率 $S_{setpoint}$ 的邻居节点作为路由转发的下一跳,从而为路由路径提供软实时保障.其特色是通过点到

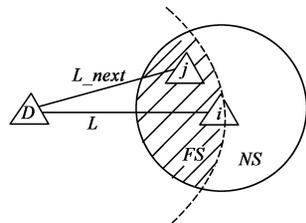


图 6 SNGF 各参数的物理意义

点的中继速率的选择提供了端到端的软实时保障,具有较好的端到端时延保证和较低的丢包率;利用地理位置信息进行无状态路由选择,满足了 WSNs 内存资源、计算资源有限的特性. SPEED 协议是一个优秀的 QoS 保障路由协议,对多媒体数据流提供了软实时保障;其缺点是没有考虑无线网络/节点的能量特性.

Speed 协议是 WMSN 提供数据流软实时性保障的典型代表.有些协议是基于 SPEED 协议提出了改进方式.例如, EE-SPEED(Energy-efficient speed protocol)协议^[20]加入了优化能耗的环节,其他部分和 SPEED 协议一样,也是基于地理位置、无状态路由的理念来进行 WMSN 路由协议 QoS 的考虑.

(4) Zhang 提出了一个基于 WMSN 的多优先级多路径选择(Multi-Priority Multi-Path Selection)的视频流路由协议 MPMPs^[21].由于视频流需要较大的带宽,该协议的核心思想是设计多路径来提高带宽,并将视频流分解为音频流和图像流两种信息流,对重要的数据流(音频流或者图像流)分配较高的优先级;然后,根据优先级来使用不同路径,优先级高的使用较大带宽、较小时延的路径. MPMPs 协议多优先级多路径的概念如图 7 所示. MPMPs 协议特色是将视频流分解为不同的优先级,并利用多路径有效地扩展了带宽,一定程度上提供了 QoS 时延保障.缺点是没有考虑能量消耗,而且视频流的分解/合成比较耗时,带来一定的时延,能量消耗也比较大;数据流的同步与抖动是一个新的复杂问题.

典型的多优先级多路径协议还包括 Shuang L 等在时延受限的条件下使用多路径来提高 WMSN 吞吐率的协议^[22]等.

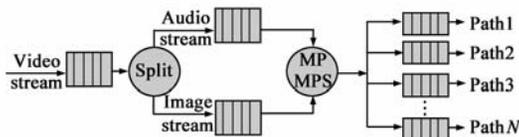


图 7 MPMPs 多优先级多路径概念图

(5) REAR(Real-time and Energy Aware Routing)是一个能量感知的实时 WMSN 路由协议^[23].该协议目的是要解决 WMSN 环境中图像与视频流能量受限的实时 QoS 路由问题.一方面,多媒体流数据量大,不利于进行

实时的路由选择, REAR 提出了用简单的元数据 (Meta-data) 代表多媒体数据包进行路由路径搜索, 以便节省能量、减少时延; 对 WMSNs 而言, 元数据 (x, y, φ) 用来描述多媒体数据属性, 例如位置坐标 (纵、横坐标及角度)、时间、节点 ID 等; 在路由搜索过程中, 通过包含元数据的 ADV 数据包的转发实现多路径发现. 另一方面, 用下面的代价函数 $Cost()$ 表示链路代价运行 Dijkstra 算法寻找最优路径:

$$Cost_{ij} = C_0 f(dist_{ij}) + C_1 / f(energy_j) + C_2 f(queue_j)$$

其中, 第一项表示传输节点间距离参数, 代表了传输能耗; 第二项表示节点 j 的剩余能量; 最后一项是队列中的数据排队长度, 代表时延. 协议优点是元数据的引入和代价函数的设计, 比较适合 WMSNs 的 QoS 路由问题; 通过代价函数, 能够平衡能量、带宽、时延等参数, 搜索到较优路径, 但未必满足时延等 QoS 约束. 缺点是使用了和 Internet 网络一样的 IP 地址来表示无线传感器节点, 即统一编址, 不切合 WMSNs 实际, 是用传统的、全局的网络状态路由观念来解决 WMSNs 的 QoS 路由问题.

对视频、图像等多媒体数据处理, 还有一些其他典型协议. 例如, Manish K 从另一个角度研究了视频传输问题, 提出了 VQL (Video query language) 协议^[24]. 与 REAR 基于元数据选择路由不同, VQL 协议是针对视频传感网络设计的视频查询语言, 根据这种协议语言能够查询感兴趣的视频数据, 节省了大量无关视频数据的处理、传输.

(6) TPGF (Two-Phase Geographic Greedy Forwarding) 协议是一个基于地理位置信息的 WMSNs 贪婪路由协议^[25]. 该协议路由由两部分组成, 首先, 基于地理位置信息的进行多路径发现; 其次, 进行路径优化, 选择最小跳数路径 (即最小时延) 提供 QoS 保障. 在多路径发现阶段, 其独特的核心思想是在邻居节点集中选择距离目的节点 (Sink) 最近的节点作为下一跳, 下一跳可以比自己距离目的节点更远, 这样就不存在局部最小化问题 (Local minimum problem), 多次运行 TPGF 协议能发现存在的多条不相交路径. 在路径优化阶段, 主要是搜索具有最小节点数目 (最小跳数) 的最优路径.

TPGF 协议是一个纯地理信息路由协议, 试图通过多路径解决 WMSNs 多媒体传输数据量大的问题; 通过特定的下一跳选择策略避免了局部最小化问题; 使用最短路径来最小化端到端时延, 提供 WMSNs 的 QoS 保障. TPGF 具有地理位置信息路由协议的特性: 使用无状态的地理路由策略, 减少了传统路由协议由于大量信息交互所消耗的能量; 信息转发节点只需保存邻居节点信息, 从邻居节点当前状态确定下一跳路由节点, 完

全符合 WMSNs 节点能量、存储能力、计算能力受限的特性. 协议的不足是多路径计算的时间复杂度较高, 没有考虑 WMSNs 网络中能量消耗问题及其他的 QoS 需求.

基于地理位置信息使用多路径考虑多媒体数据传输的典型协议, 还有 Laura S 提出的图像传感器网络事件驱动的 QoS 路由协议^[26].

(7) ReInForM (Reliable Information Forwarding using Multiple path) 协议^[27], 主要思想是使用概率多路径转发来提高数据传输的可靠性. 基于信息感知使用优先级的概念, 根据一定概率使用多路径进行路由选择, 类似传统 Internet 区分服务的路由协议; 没有考虑其他的 QoS 约束和能量节省的问题.

MMSPEED (Multipath Multi-speed protocol) 协议^[28], 可以看作是是 SPEED 软实时保障和 ReInForM 概率多路径转发思想的复合; 主要是通过使用 SPEED 协议来保障带宽, 实现实时性传输; 通过概率多路径转发保障数据的可靠性. 缺点是协议太复杂, 是两个复杂协议的复合; 也没有考虑较大的能量消耗问题. 提供可靠性保障的典型 QoS 路由协议还有 EAR 协议^[29]等.

(8) MLRR (Multi-Level Rate Routing) 协议是一个基于 DSC 跨层设计的 QoS 保障路由协议^[30]. 其基本思想是: 在网络层, 结合应用层分布式源编码 DSC (Distributed Source Coding) 提供的动态链路多速率分配来进行路由优化, 同时基于 DSC 速率传输限制使用能量优化调度策略, 有效地节省能量, 延长网络生存期; 也能提供端到端速率保障. 由于 DSC 是一种很适应 WMSNs 的多源视频编码方式, 因此, MLRR 是一个较好的跨层设计 QoS 路由协议. 在 WMSNs 中, QoS 保障是涉及物理层、数据链路层、网络层、应用层, 并与电源管理、拓扑控制、数据管理等 QoS 管理策略高度相关的一个综合体系结构, 所以跨层设计是 WMSNs 路由协议 QoS 保障研究的一个重要方面^[31].

这类典型协议还有基于 FEC (Forward error correction) 编码的 DGR 协议^[32]等.

4.2 分析比较

综述分析比较这些典型协议特征如表 1 所示, 主要包括协议目的、基本策略/思想、提高的 QoS 保障及其优缺点等四个方面. 确定一个协议是否优秀有效, 不能单看其中一个方面, 而是要全面衡量, 主要看是否解决了相应的问题. 例如, 通过代价函数可以很好地平衡能量、带宽、时延等多 QoS 参数, 搜索到较优路径, 但未必满足某个特定参数 (例如时延) 的 QoS 约束.

分析可知, 提供 QoS 保障的 WMSNs 路由协议还有很多方面需要研究, 还不能很好地适应 WMSNs 多媒体数据传输. WMSNs 路由协议研究存在的主要困难是: (1) 无线传感器节点能量受限, 而多媒体数据流业务耗

能严重.这对矛盾是 WMSNs 路由协议设计的一个极大挑战.(2)无线通信链路带宽有限,而多媒体业务数据量大,需要较高的网络带宽.这对矛盾也是 WMSNs 路由

协议设计是一个的挑战.(3)无线链路 QoS 性能差,不稳定;而多媒体通信有较严格的 QoS 约束,这也是 WMSNs 路由协议设计需要克服的一个难点.

表 1 各典型协议特征比较表

典型协议	主要目的	基本策略/思想	QoS 保障	优/缺点
SAR	提供冗余路径备份,并提供一定的 QoS 保障(WSNs)	优先级/多路径	能量/时延	提高了备份路径/基于全局信息/路由表复杂/可扩展性差
Younis	提供全面的 QoS 保障(WSNs)	复合代价函数	多 QoS 保障	较好的多 QoS 保障/基于全局信息
Speed	为数据流提供软实时保障	地理位置路由/步进速率保障/时延估计/拥塞反馈	软实时保障	很好的软实时保障/没有考虑能量特性
MPMPS	将视频流分解为音频、图像流,根据优先级提供 QoS 保障	多优先级/多路径	带宽/时延	扩展了带宽,提供时延保障/能耗很大
REAR	解决多媒体数据流能量受限的实时 QoS 路由问题	元数据/多路径/代价函数/查询语言	能量/带宽/时延	适合视频多 QoS 保障/全局状态/统一编址
TPGF	解决多媒体数据量大/局部最小化/提供时延保障	地理位置路由/贪婪协议/多路径	时延	纯地理信息路由/多路径计算复杂度高/没有考虑能量等 QoS 需求
ReInForM	提供数据通信的可靠性	优先级/概率多路径	可靠性	提供可靠性保障/没有考虑其他 QoS 约束及能耗
MLRR	为 WMSNs 路由提供跨层 QoS 保障	跨层设计/DSC/多速率	能量/端到端传输速率保障	延长了网络生存期/MLRR 跨层设计较复杂

5 总结与发展趋势

WMSNs 路由协议主要研究音频、视频、图像传感器产生的多媒体数据的无线多跳通信问题,QoS 保障是其首要目标.初步的几个 WMSNs 协议考虑了多媒体 QoS 控制问题,但还存在较大的缺陷.根据当前研究成果及其发展趋势,以下五个方面是其需要重点研究和突破的关键问题:(1)研究多媒体数据流聚合/压缩/合并、多路径数据传输、高带宽链路选择等策略,设计有带宽保障的无线多跳路由协议,为多媒体流数据通信提供端到端的高带宽路径;(2)强化时延约束要求,平衡时延抖动、丢包率、可靠性等 QoS 特性;通过代价函数构造、地理位置信息辅助、智能协议控制等,研究满足多媒体实时需求的 QoS 路由协议;(3)研究 WMSNs 不同于传统 WSNs 的能耗特性及其多媒体数据模型,应用于设计能量敏感、低功耗的 QoS 路由协议;(4)根据具体应用的不同,研究查询、以数据为中心、按需驱动、数据聚合等路由策略;(5)路由协议 QoS 保障跨层设计研究.

参考文献:

[1] Ian F A, et al. A survey on wireless multimedia sensor networks [J]. Computer Networks (Elsevier), 2007, 51(4): 921 - 960.
 [2] 崔莉,等.无线传感器网络研究进展[J].计算机研究与发展, 2005, 42 (1): 163 - 174.
 Cui L, et al. Overview of wireless sensor networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2005, 42 (1): 163 - 174. (in Chinese)
 [3] Akkaya K, Younis M. A survey on routing protocols for wire-

less sensor networks[J]. Ad Hoc Networks (Elsevier), 2005, 3 (3): 325 - 349.
 [4] Heinzelman W, et al. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks[A]. IEEE Proceedings of MobiCom'99[C]. IEEE Computer Society, 1999, 8.
 [5] Chalermek I, et al. Directed diffusion for wireless sensor networking[J]. IEEE Transactions on Networking, 2003, 11(1): 2 - 16.
 [6] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks[A]. Proceeding of the Hawaii International Conference System Sciences[C]. Hawaii, 2000, 1.
 [7] Yu Y, Estrin D, Govindan R. Geographical and Energy Aware Routing: a Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks [R]. UCLA Computer Science Department Technical Report, UCLA-CSD TR-01-0023, 2001, 5.
 [8] 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.
 [9] 朱艺华,等.无线传感器网络优化生存时间的动态路由算法[J].电子学报, 2009, 37(5): 1041 - 1045.
 Zhu Y H, et al. Dynamic routing algorithms optimizing lifetime of wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(5): 1041 - 1045. (in Chinese)
 [10] Sohrabi K, et al. Protocols for self-organization of a wireless sensor network[J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7 (5): 16 - 27.
 [11] Akkaya K, Younis M. An energy-aware QoS routing protocol for wireless sensor networks[A]. IEEE Proceedings of Work-

- shops on Distributed Computing Systems [C]. Washington: IEEE Computer Society, 2003. 710 – 715.
- [12] Chen D, et al. QoS support in wireless sensor networks: a survey [A]. Proceedings of the International Conference on Wireless Networks [C]. Bogart, USA, 2004. 227 – 233.
- [13] 孙岩, 马华东. 无线多媒体传感器网络 QoS 保障问题 [J]. 电子学报, 2008, 36(7): 1413 – 1420.
Sun Y, Ma H D. The QoS guarantee problem for wireless multimedia sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(7): 1413 – 1420. (in Chinese)
- [14] Al-Karaki, et al. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey [J]. IEEE Wireless Communications, 2004, 11 (6): 6 – 28.
- [15] Gures E, Akan O B. Multimedia communication in wireless sensor networks [J]. Annales Des Telecommunications, 2005, 60(7): 872 – 900.
- [16] Tan H O, Korpeoglu I. Power efficient data gathering and aggregation in wireless sensor networks [J]. ACM SIGMOD Record, 2003, 32 (4): 66 – 71.
- [17] Hong Luo, et al. Routing correlated data with fusion cost in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(11): 1620 – 1632.
- [18] Fabian K, et al. An algorithmic approach to geographic routing in ad hoc and sensor networks [J]. IEEE Transaction on Networking, 2008, 16(1): 51 – 62.
- [19] He T, et al. SPEED: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks [A]. Proceeding of International Conference on Distributed Computing Systems [C]. Washington: IEEE Computer Society, 2003. 204 – 223.
- [20] Mohammad S K, et al. Energy-efficient SPEED routing protocol for wireless Sensor networks [A]. Proceeding of AICT'09 [C]. Venice: IEEE Computer Society, 2009. 5. 267 – 271.
- [21] Zhang L, et al. Multi-priority multi-path selection for video streaming in wireless multimedia sensor networks [J]. Lecture Notes in Computer Science on Ubiquitous Intelligence and Computing, 2008, 5061: 439 – 452.
- [22] Shuang L, et al. Delay-constrained high throughput protocol for multi-path transmission over wireless multimedia sensor networks [A]. IEEE Proceeding of WoWMoM [C]. Newport Beach: IEEE Computer Society, 2008, 6. 1 – 8.
- [23] Yao L, et al. A real-time and energy aware QoS routing protocol for multimedia wireless sensor networks [A]. IEEE Proceedings of WCICA'08 [C]. Chongqing: IEEE Computer Society, 2008, 6. 3321 – 3326.
- [24] Manish K, Shekhar V. Querying video sensor networks [A]. IEEE Proceeding of WCSN'07 [C]. Allahabad: IEEE Communication Society, 2007, 11. 50 – 54.
- [25] Lei S, et al. Geographic routing in wireless multimedia sensor networks [A]. IEEE Proceeding of FGNC '08 [C]. Hainan Island: IEEE Communication Society, 2008, 12. 68 – 73.
- [26] Laura S. QoS-based geographic routing for event-driven image sensor networks [A]. Proceeding of BroadNets'05 [C]. Boston, MA: IEEE Communication Society, 2005, 10. 991 – 1000.
- [27] Deb B, et al. ReInForm: reliable information forwarding using multiple paths in sensor networks [A]. Proceeding of LCN'03 [C]. Washington: IEEE Computer Society, 2003, 10. 406 – 415.
- [28] Emad F, et al. MMSPEED: multipath multi-SPEED protocol for QoS guarantee of reliability and timeliness in wireless sensor networks [J]. IEEE Transaction on Mobile Computing, 2006, 6. 738 – 754.
- [29] 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.
- [30] Hong G W, et al. Cross-layer routing optimization in multirate wireless sensor networks for distributed source coding based applications [J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2008, 7(10): 3999 – 4008.
- [31] M V D S, Shankar S. Cross-layer wireless multimedia transmission: challenges, principles and new paradigms [J]. IEEE Wireless Communications Magazine, 2005, 12(4): 50 – 58.
- [32] Min C, et al. Directional geographical routing for real-time video communications in wireless sensor networks [J]. Computer Communications (Elsevier), 2007, 30 (17): 3368 – 3383.

作者简介:



周 灵 男, 1972 年生于湖南岳阳. 2007 年毕业于南京理工大学, 获计算机应用技术专业博士学位. 现为中南大学计算机科学与技术流动站博士后, 副教授. 研究方向为计算机网络、无线传感器网络、路由算法与协议.
E-mail: cszhouling@sohu.com



王 建 新 男, 1969 年生于新疆托里. 现为中南大学信息科学与工程学院教授、博士生导师. 研究领域为计算机网络、无线传感器网络、算法优化设计.
E-mail: jxwang@mail.csu.edu.cn