

无线多媒体传感器网络体系结构及 QoS 保障机制

李方敏 李 姮 刘新华

(宽带无线通信与传感器网络湖北省重点实验室 武汉 430070)

(武汉理工大学信息工程学院 武汉 430070)

摘要 无线多媒体传感器网络是在传统传感器网络基础上衍生而来的,具有感知、处理和传输音视频等多媒体信息的能力,在环境监测、工业控制、医疗保健等应用领域发挥了重要的作用。分析了无线多媒体传感器网络研究所面临的挑战,剖析了当前主流的几种体系结构,重点分析了网络协议栈各个层次采用的资源有效利用、QoS保障、异构性屏蔽等策略,总结并探讨了无线多媒体传感器网络投入实际应用亟待解决的问题。

关键词 无线多媒体传感器网络,能源消耗,服务质量,异构

Survey on Architecture and QoS for Wireless Multimedia Sensor Networks

LI Fang-min LI Heng LIU Xin-hua

(Key Lab. of Broadband Wireless Communication and Sensor Network, Wuhan 430070, China)

(School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract As derived from traditional sensor networks, wireless multimedia sensor networks can enable several potential applications such as environment monitoring, industrial process control and health care due to their ability of providing rich multimedia information. This paper briefly introduced the current challenges and the state of the art of architecture, analysed the strategies of network protocol stacks which deals with the resource conservation, Quality of Service, heterogeneity, etc, and also discussed open research problems in the practical application.

Keywords Wireless multimedia sensor networks, Energy consumption, Quality of service, Heterogeneity

无线多媒体传感器网络(Wireless Multimedia Sensor Networks, WMSN),是由一组具有感知、计算和通信能力的多媒体传感器节点动态自组形成的分布式无线网络,协作地感知、采集和处理覆盖区域中的多媒体信息(音视频、图像、标量数据等),发送给观察者,实现全面有效的环境检测^[1]。单个摄像头的视角和视域范围有限,多种媒体节点从不同角度感知布控区域,扩大了监控视角;节点覆盖范围重叠,采集的数据存在很大冗余性,可有效提高监控质量;多种精度的媒体流共存,低端采集设备进行全网监测,高端采集设备对兴趣目标进行细节监测,对同一物理场景提供多分辨率的视像,灵活性高。WMSN作为传感器网络的高级形式,提高了网络监控的细度和精度,但是多媒体节点的引入带来了新的挑战:

(1)资源严重受限。采用电池供电的传感器节点由于硬件限制,能量、通信带宽、处理能力和数据传输能力都是有限的。MICA2节点最大数据传输速率为40kbps,若采用Zigbee无线通信协议带宽可达250kbps,而视频传输需要的带宽为100kbps至15Mbps^[2],这些资源对于流畅的视频处理和传输是不够的。

(2)网络异构。多种媒体类型节点组成的WMSN是异构的,低端节点和高端节点在网络中承担不同的角色,需要配备不同的软硬件。例如,在混合通信模型中,高端节点使用802.11协议,普通节点使用Zigbee无线协议,性能高的节点

使用更快的传输速率,提升整个网络的通信能力。如何使这些异构的传感器节点有效地协同工作、不同无线通信协议共存、利用不同能力的节点整体提高网络的效率,这些问题都是值得进一步研究的。

(3)QoS需求。QoS需求是WMSN区别于传统传感器网络的一个重要特征,后者往往以牺牲服务质量为代价要求低功耗,而前者需要将QoS保障机制融入网络协议栈的设计当中,针对具体应用为多媒体流的传输提供实时性、可靠性、带宽等服务质量保证。

1 体系结构

现有的无线传感器网络大多采用平坦、同构的体系结构,使用同样的硬件平台,节点的处理能力相同。WMSN中的多媒体传感器节点性能不同,在网络中的地位不是相互平等的,在体系结构上有别于传统的平面结构传感器网络。

1.1 硬件平台

多媒体传感器节点遵循了传统传感器节点的模型,也继承了其微型化、低功耗、资源受限等特点,只是各个模块所用的硬件要求有很大提高,于是多种新的节点硬件系统相继推出。

现有多种传感器(CMU cam, Web-Cam, PTZ camera等)和平台(Mica mote, Stargate, Imote, GARCIA等)供我们灵活

选择。同种类型、同样配置的节点构成同构传感器网络,如 Panoptes^[3];不同类型、不同配置的节点构成异构传感器网络,它是 WMSN 的常见类型,如 SensEye^[4], WMSN-test-bed^[5]等。在异构多媒体传感器网络中,性能相符的传感器和处理模块组合,可以搭建具有不同监测能力的传感器节点:价格低廉的标量或音视频传感器配上能量受限、低功率的处理模块,高密度抛洒,全网监测,提供形式单一、质量较差的监控信息,负责处理简单任务,如入侵检测、红外探测等;相对高性能的视频传感器配上能量丰富、高功率的处理模块,可以有计划、有部署地提供清晰、流畅的视频传输,负责处理复杂任务,如目标识别、跟踪等,各种类型节点协同工作,满足多媒体应用的服务质量需求。

低端的多媒体传感器节点多采用低分辨率的 CMOS 传感器、音频传感器和标量(红外、温度等)传感器,其处理模块的处理能力和功耗要求较低。文献[6]中的图像传感器节点以 Cyclops 为接口,将 Mote 平台和 CMOS 传感器相连,外接 CPLD 来提高对图像数据的传输处理速度,使用轻量级的操作系统 TinyOS。中端节点采用高分辨率的数码相机,配备 Stargate, Imote 或 Applied Data Bitsy board^[3]等高带宽平台,采用执行效率高的 Linux 操作系统。文献[7]为海域监测设计的视频传感器节点,使用基于全方位镜面(Omni-directional Mirror)的折反射式结构进行全景监测,避免 Pan-Tilt-Zoom 相机的机械移动造成的消耗,用太阳能电池板供电,配置两个 radio:低速率的 802.15.4 用于节点间协作、处理等控制信息的交互,802.11 用于传输高速率的视频流。有些 WMSN 还引入了高端节点,如文献[5]中的 GARCIA 作为 sink 节点,将高清晰度的 PTZ 摄像机安置在微型机器人身上,节点可移动,根据中低端节点反馈的监测信息和监控平台的控制,GARCIA 节点可自行移动,改道进入兴趣区域。

1.2 网络体系结构

传统无线传感器网络平坦的拓扑结构不适合传输、处理海量多媒体数据。多种媒体节点的引入使 WMSN 组网变得更为复杂,需要开发更适合多媒体节点的协同工作组网结构。

平面结构:平面网络结构是一种最简单的组网方式,所有节点处于同样地位,具有完全一致的功能特性。也就是说,每个节点包含相同的路由、管理和安全等协议,结构简单,易于维护,具有较好的健壮性。文献[6]使用的便是这种体系结构,它比较适合小规模部署的同构传感器网络,所有节点为对等结构,完成同样的任务,以多跳方式与汇聚节点通信。对于异构传感器网络而言,这种拓扑结构没有充分利用节点的性能差异,造成资源浪费。

层次结构:多媒体传感器节点按照资源和能力的不同划分为多层,各层任务分级、功能明确。大多异构传感器网络采用这种拓扑,但是高复杂度计算、海量信息的处理一般放在各层中心节点上,容易造成网络瓶颈。P. Kulkarni 等人提出的视频传感器网络 SensEye^[4]分为 3 层,分别用于目标检测、识别和跟踪,层内节点同构、层间节点异构,节点的通信、处理、成像能力以能耗为代价逐层递增,每层承担不同的感知、处理任务,层间相互协作共同完成应用需求。分簇也是层次结构的一种表现形式,文献[8]中提出的基于移动群组的大型无线多媒体传感器网络有两种类型的簇:固定群组由普通节点组成,进行全网监测;移动群组由高性能节点组成,其摄像机质

量、信道带宽、射频通信距离优于普通节点,可与卫星通信并且群组同向移动,监测热点区域。每个群组内选出一个簇头节点,组成移动主干网 MBN,实现对高质量、时延敏感的多媒体流的传输。

2 无线多媒体传感器网络的协议层次

2.1 应用层

应用层需要实现以下功能:对海量异构的多媒体数据进行压缩和容错编码,使之能在资源受限的网络上传输;流量控制,主动调整流量来适应无线信道的动态变化;为用户提供一个屏蔽底层异构网络的接口,把应用需求映射到底层,并根据底层处理后的反馈信息来决定编码和流量控制参数。现有研究主要集中在多媒体信息处理、流量控制和中间件等方面。

2.1.1 多媒体信息处理技术

相邻节点采集的多媒体数据相关性很强,人类获取信息的敏感度(特别是视觉信息)是有限的,因此传感器网络中图像、音视频数据压缩潜力很大。采用压缩编码技术有助于减少传输数据量,增加传输速度,减少网络压力。传统压缩编码技术(MPEGx, H.264 等)过于复杂,难以在资源受限的传感器网络上实现。针对传感器网络的音视频压缩技术需具备高效率、低复杂度和容错性特点,运行于高性能节点或簇头节点上,在计算、存储能力和带宽有限的条件下权衡计算量和 QoS 间的关系,争取获得最优监控质量,现对其进行简要介绍。

1) 分层压缩^[2]:把视频信息分为若干层,基本层包含最基本、最重要的视频信息和关键的时间信息。增强层包含视频中的细节信息,是视频解码的可选信息。解码端得到基本层的码流,可以重建低质量的视频,根据网络变化自适应调整传输码流,自动增加或丢弃增强层。带宽充裕时增强细节信息的传输,得到高质量视频。

2) 基于变化监测的压缩编码:定期产生一个参考标准,丢弃重复冗余的数据,只有当监测场景发生变化时,才将改变的部分发送出去。在文献[9]中,将当前视频帧分为 8×8 块,每块又分为 8×8 个像素点,选出部分子块的部分像素点逐个扫描,与参考帧中对应的像素点进行比较。若块内有变化的像素点的个数超过阈值,就把该块打上标记。其邻居块(未被扫描的)也会打上标记,最后把所有打上标记的块进行 JPEG 编码传输,变化帧又反馈回参考帧缓冲区来升级当前参考帧。仿真表明,该算法在减少能耗的同时,视频质量近似于 MPEG-2。但这种编码方法不是网络感知型的,没有纠错策略,当信道错误率、丢失率较高时,性能骤减。

3) 分布式编码:现有图像压缩标准(JPEG, MPEGx 等),大多在编码端做运动估计和运动补偿。将各个视频传感器采集的图像联合编码,要求在编码前各视频节点间交互传输各自的图像,这对传感器网络是一个巨大的挑战。采用分布式编码技术,多个源节点独立编码,在汇聚节点处联合解码,把编码器的计算复杂度转移到资源丰富的解码端,同时又消除了临近节点的信息冗余性。文献[10]中提出了基于像素域的 Wyner-Ziv 编码技术,部分帧采用传统的帧内编码方法进行编码,称为关键帧。其他的帧为 Wyner-Ziv 帧,采用 Wyner-Ziv 编码器进行独立编码。在解码端,关键帧使用帧内解码,解码后的图像可作为 Wyner-Ziv 帧解码的参考信息。Wyner-Ziv 解码器使用参考信息和已收到的码流来解码 Wyner-Ziv

帧。

2.1.2 中间件

WMSN 可为用户提供形式多样的服务。多种应用并存于同一个网络,需要根据用户需求灵活调整底层网络的配置参数,如部署、节点移动性、覆盖、QoS 等。节点的异构性扩展了传感器网络的应用,同时也对提供统一的运行平台增加了难度。中间件介于操作系统与应用程序之间,屏蔽了底层网络的实现细节,为用户提供灵活的服务接口和友好的开发环境。若要有效解决 WMSN 的应用多样、节点异构和能源有限等问题,其中间件需要提供以下支持。

异构抽象:中间件应为开发者针对各种各样的异构计算设备提供一个统一的系统视图,提供编程抽象或系统服务,单个节点设备仅保留最小功能。可以对底层硬件进行最低程度的抽象(如 TinyOS 中的硬件抽象组件),将物理硬件映射到系统软件中,但这对硬件设备的管理造成难度。文献[11]中将多媒体传感器节点加上 I/O 单元和控制单元,封装为硬件组件,与软件组件有相同的输入输出接口,运行平台负责管理组件间的通信。还可以采用虚拟机技术为所有硬件平台提供统一的接口,但其开销过大,难以在能源有限的传感器网络中实现。

可裁剪性:传感器网络中间件的设计大多是基于组件的,系统通过分立的功能模块组合而成,支持新组件的加入,又不影响原有部分。分立的组件提供各种服务,可针对具体应用选择合适的组件,协同工作,满足应用需求。Wu-chi Feng 等人提出的 Cascades^[12]中间件提供了类似于工具箱的预定义的功能块,DFilter, VFilter, EFilter 和 UFilter 分别处理标量数据、视频数据、出错信息以及对这些信息进行融合。

资源管理和数据管理:传感器网络通信能力、计算能力有限,大量复杂的多媒体信息对网络造成很大负担,因此必须提供轻线程的中间件,合理分配资源,在低功耗通信的同时有效利用数据融合或数据聚合手段减轻网络负担,延长网络寿命。

2.2 网络层

WMSN 中对媒体流的错误和延迟较为敏感,需要将网络服务质量(QoS)作为传输性能的重要指标,在保证业务 QoS 的前提下,均衡全网能耗。并且,底层网络异构节点间通信能力、感知能力存在差异,这些差异直接影响网络拓扑的建立。现有无线多媒体传感器网络路由协议的研究主要侧重于服务质量需求、能耗和异构性 3 个方面。

2.2.1 QoS 路由

在目标监控、跟踪系统中,音视频传输时延和抖动要小,容错性好;在环境监测中异常监测结果传输的可靠性要高。WMSN 具有很强的应用相关性,需要针对不同的 QoS 问题,选择合适的路径约束条件。现有 QoS 路由大多基于单一度量,同时考虑带宽、时延和丢包率等多种 QoS 约束。参数组合的混合度量是一种 NP 完全问题,难以达到较好的平衡。

1) 实时性

实时性保障可分为网络资源预留和业务流区分服务。前者在选路之前查询网络状况,包括网络是否拥塞、路径上预约流的个数、节点剩余能量等,只有当网络能够提供实时性保证的时候,才建立路由,实现端到端传输;后者基于类别地处理数据流,不同类型的数据流(音频、视频、标量)根据其实时性需求划分为不同等级,相应提供不同带宽、时延、抖动保证,每

个数据包根据需求分到不同的业务流中。

SPEED^[13]协议先交换节点的传输延迟,得到网络负载情况;然后利用节点局部地理位置信息和传输速率作出路由决定,选中的下一跳节点的传输速率必须大于预定的传输速率阈值。这种方法为每个即将发送的数据流预约资源,有效地避开网络拥塞。但其网络查询机制开销过大,扩展性不强,而且为突发性数据预留资源是没有意义的。

文献[14]中 Akkaya 等人将网络中的图像数据分为实时和非实时的业务流,数据的端到端延迟 $T_{end-end} = T_E + T_P$,其中 T_E 为队列延迟, T_P 为通信延迟,在保证实时流的端到端实时传输($T_{end-end} \leq T_{required}$, $T_{required}$ 为时延阈值)的同时,尽量最大化非实时流的吞吐量,为不同类型数据选择不同调度算法。

文献[15]中基于 QoS 的地理位置路由将两种机制融合,综合考虑邻居节点相对于基站的位置、队列中的预处理包和剩余能量,将基于事件驱动的图像传感器网络的数据分为两种优先级:事件驱动数据包(传输概率为 p)、周期监测数据包(传输概率为 $1-p$)。用两个单独的队列分别存储这两种数据包,把“队列长度/包的传输概率”的比值作为队列权值函数,动态调整 p 的值可以满足不同业务对实时性的要求,但只考虑了队列延迟。

2) 可靠性

无线链路稳定性差。传感器网络通常采用多路由或对每跳节点建立可靠性估计机制来实现媒体数据的可靠传输,如 AFS 和 ReInForM。MMSPEED^[16]是在 SPEED 上发展而来的,是一种多速度多路径算法。源节点到目的节点有多条速率层路由,每个节点配备多种预定的传输速率阈值,针对实时性要求不同的业务流,选择传输速率大于特定阈值的邻居节点为下一跳节点。若当前速率不能满足时延限制,中间节点可以调整速率阈值;各节点为当前数据包分配可达需求 P^{req} ,邻居节点中所有能成功地将该包转发到目的节点的概率大于 P^{req} 的节点作为下一跳节点。如此构成多径路由,根据业务流的可靠性级别选择合适的 P^{req} 。

DGR^[17]选路阶段,源节点广播一系列包含不同偏移角(α)的 PROB 数据包。收到该数据包的节点根据 α 、本节点、上跳节点 h 、sink 节点的位置计算它的映射坐标(mapping coordinates)。距参考点(strategic mapping location)最近的节点选为 h 的下一跳节点并广播修改后的 PROB 数据包,如此建立多径路由。在数据传输阶段,将数据帧分为 n 个子流,在多条路径上传输,并在 sink 端重组。采用路径优先级调度 PPS 算法,以该路径的带宽、延时、剩余能量为权值,为数据子流分配选路策略,保证不同 QoS 要求的数据流的传输,在数据帧中添加 FEC 增加可靠性。该算法在保证实时性、可靠性的同时,均衡全网能耗。但当多个视频节点同时向 sink 节点发送数据时,路由性能明显下降。

2.2.2 能量有效路由

若 WMSN 不考虑能量因素,传输大数据量的音视频流对能源的损耗是很快,如 MMSPEED 的网络生存期为几个小时或者一天^[16]。现有路由协议的节能机制大多是在原有协议的基础上引入能耗衡量指标(节点的剩余能量、最小能耗等),以求选取最优能耗路径,或者采用数据融合技术减少传输数据量,来延长网络生存时间。但这样会使某些“关键”节

点过度使用,导致电源耗尽,如在文献[14,18]中提到,感知节点(特别是在稀疏布控区)由于其在采集数据时消耗过多能量,不应选为转发节点;文献[19]中结合覆盖策略判断节点的重要性,监测区域的节点能量覆盖冗余度小,就说明该区域为稀疏布控区。该区域的节点权值高,应当执行感知任务,尽量选择与其他节点感知范围重叠多的作为路由节点。文献[18]中在 DAPR^[19]的基础上将节点剩余能量引入如式(2)所示的权值函数:

$$E_{total}(x,y) = \sum_{S_j:(x,y) \in FoV(S_j)} E(S_j) \quad (x,y) \in FoV(S_j) \quad (1)$$

$$C_{total}(S_j) = C_{EA}(S_j) + C_{AA}(S_j) = \frac{1}{E(S_j)} + \max \frac{1}{E_{total}(x,y)} \quad (2)$$

其中式(1)为能监测到点 (x,y) 的所有视频节点剩余能量值之和,为该点的能量覆盖冗余度。 $E(S_j)$ 为节点 S_j 的剩余能量, $(x,y) \in FoV(S_j)$ 表示点 (x,y) 在 S_j 的视域范围内。选择视频节点检测范围中能量覆盖冗余度最小的区域作为该节点的覆盖权值 $C_{AA}(S_j)$, $C_{EA}(S_j)$ 为剩余能量权值,进一步减少能量消耗。

2.2.3 异构路由

WMSN 中多种类型节点并存带来一系列问题,如通信能力和感知能力各异、链路不对称、剩余能量和能耗速度不同。若所有节点在选路过程中处于同等地位,将造成资源严重浪费。过度使用资源有限的节点,容易使之成为网络瓶颈。研究人员大多采用层次结构的路由来屏蔽这些差异^[8,20]。将处理能力、通信能力较强的节点选为簇头,执行数据聚合、融合等较为复杂的算法。相邻簇可以使用不同的信道传输,以减少冲突。簇内、簇间一般选用不同的路由机制。簇内节点采集的数据在簇头处进行聚合,经压缩去冗余后由主干网发送到汇聚节点。

上面介绍的带有移动群组的无线多媒体传感器^[8]网络使用了 LANMAR 路由,每个群组动态选举一个节点作为路标(簇头),路标之间使用一个全局的距离矢量机制(DSDV)在整个网络中传播关于所有路标的路由信息;群组范围内,选择主动路由协议(FSR)维持本地范围内的路由信息。X. Du 等人为异构传感器网络引入加密技术,提供一种两层安全路由协议 TTSR^[20]。簇内每对低端邻居节点共享一份 AP(Asymmetric Pre-distribution,不对称预分配)秘匙^[21],根据邻居节点数据冗余性建立以簇头为根节点的树形路由来最小化全簇能量消耗:需要数据融合, MST(最小生成树);无需数据融合, SPT(最短路径树);簇头知道基站和邻居簇头的地理位置,建立簇间路由的时候,在簇头和基站间画一条线段,与此线段有交点的簇内的簇头节点为转发节点。CWR^[22]算法充分考虑不对称链路对拓扑建立的影响,在簇内就近选取高端节点(簇头)一跳范围内的低端节点代替簇头节点进行多级扩散,从而将异构多媒体传感器网络中低端节点到簇内高端节点的路由信息建立问题转化为一个同构传感器网络中的路由问题。

2.3 媒体访问控制协议(MAC)

节点的能量供应一直没有很好的解决措施。要在网络中传输海量数据,这一问题就显得尤为突出。MAC 协议应以减少能耗为首要设计目标;其次,为了在无线网络上支持多媒体业务,需要为其提供灵活的、能满足时延、分组丢失等的 QoS

保证。

2.3.1 能量有效 MAC 协议

基于竞争的 MAC 协议引入周期性睡眠/侦听的调度机制,减少空闲侦听来提高能量有效利用。RL-MAC^[23]利用 Q-learning 算法提供了一个自适应的 MAC 协议,在当前状态 n_b (k 帧开始时等待发送包的队列长度),执行了决策 t_r (预留活动时间)。收到即时反馈 $r_k(n_b, t_r)$ 后,使系统转移到下一个状态 n_b' ($k+1$ 帧开始时等待传输的队列长度),在寻求极大化反馈函数 $E\{\sum_{i=0}^{\infty} \gamma^i r_{k+i}\}$ 的最优控制策略的过程中,根据当前网络流量和未来网络流量影响来选择局部最优动作 t_r ,动态调整占空比,其中 $0 \leq \gamma < 1$ 为折扣因子。该算法使用即时反馈来提高能量有效利用,使用延迟反馈来减少早睡造成的丢包问题。只是在睡眠-唤醒之间的频繁切换造成了多余能量损耗。

基于 TDMA 的 MAC 协议为每个节点分配独立的用于数据发送或接收的时槽,适用于网络负载较高的环境,但分组传输延时高于基于竞争的 MAC 协议。文献[24]中提出了一种混合型的 MAC 协议 HMAC(Hybrid MAC),融合了基于竞争和 TDMA 协议的设计要素,采用比 S-MAC 短的分隙时间帧结构。每帧划分为多个唤醒槽(wakeup slots)和数据槽(data slots):每个节点随机选择唤醒槽并通知其单跳邻居节点,在唤醒槽内侦听唤醒信号,其他时间转入睡眠;数据槽用于数据收发,按需分配数据槽并在单跳邻居节点内共享;发送节点随机选择一个数据槽,广播唤醒信号(包括数据槽序号和接收节点的 ID);匹配接收节点在其唤醒槽内收到唤醒信号后,在该序列的数据槽醒来接收数据,这需要严格的时间同步。

2.3.2 QoS 优先级区分机制

MAC 层处于协议栈的底层,是所有数据报文和控制消息在无线信道上进行发送和接收的直接控制者。它能否高效地使用无线信道,是上层各种协议和机制所提供的 QoS 能否得到最终保障的一个关键因素。

网络层的区分服务通常需要 MAC 层协助,为不同等级 QoS 媒体流分配无线通信资源,如 MMSPEED 采用 802.11e 中的 EDCF(Enhanced Distributed Coordination Function,增强型分布式协调)模式对网络层提供 QoS 和多媒体支持。EDCF 有 8 种业务流分类(Traffic Category, TC),每个 TC 设置不同的退避参数,如仲裁帧间间隔(Arbitration Inter Frame Space, AIFS)、最大最小回退窗口($CW_{max/min}$)等。MMSPEED 的多种速率层映射为相应的 TC,节点在检测到空闲状态并等待相应传输流类规定的一段时间后,再接入网络。类似地,RL-MAC 协议中将数据流分为 3 个等级,分配长度各异的竞争窗。级别高的数据流分到小的竞争窗,退避时间小,从而保证实时业务的 QoS。考虑到实时业务(如语音业务)对时延较敏感、对丢帧率不敏感,非实时业务(如分组数据业务)对丢帧率较敏感、对时延不敏感, MMSPEED 中的 MAC 层为不同的业务提供不同的应答机制。首要接收者使用 ACK 机制,次要接收者使用无 ACK 方式,接收方不回传 CTS 帧,仅统计接收到的帧的总数回传给发送方,用来估计丢帧率。

Q-MAC^[25]是一种 QoS 感知 MAC 协议,在最小化能耗的前提下对业务流区分服务。在节点内调度阶段,根据业务类型和感知数据类型将业务流分类,存储到相应队列中。即

时队列(instant queue)用于处理实时业务包,其他队列按照MAX-MIN公平算法分配传输速率,并采用包级GPS策略选出下一个要处理的数据包;在节点间调度阶段,松散优先级随机接入协议(Loosely Prioritized Random Access Protocol, LPRRA)以节点剩余能量、实时业务流的比例、数据包的重要性及其传输跳数来判断节点的数据传输的紧急程度,管理节点的接入顺序并为之分配竞争时间窗。仿真表明Q-MAC不同业务流的平均能耗和延迟比S-MAC略小,但其应答机制过于简单,会存在隐藏终端等问题。

文献[26]提出的一种新的自适应支持QoS的MAC策略,本质上是基于CSMA/CA的。根据收集的网络数据参数和数据包优先级,动态调整竞争窗口CW大小。一定时间间隔内,各节点监测到的数据包传输失败率越大,表明发送数据包冲突大,则应该将各自的CW调大,同时将数据包优先级别作为CW调整的参数因子。

2.4 跨层设计

传统无线传感器网络协议栈各层提出的支持多媒体流传输策略,往往局限于一层而忽略了层间的相互作用。物理层、MAC层和网络层对网络资源分配相互制约:物理层通过在接收端的干扰影响无线信道的多路接入,MAC层给转发节点分配带宽影响节点对有用信号的监测;传输调度造成低带宽和延迟会迫使选路改径,而路由选择又会改变一系列的链路调度。应用层也并非与底层完全隔绝,采用过滤、压缩等编码机制增强网络传输性能。因此,在WMSN中需要跨层协作来改善总的系统性能,如QoS、能耗、信道利用率等。

为了在稳定性差、资源受限的无线网络上传输多媒体数据流,各个层次都采取了一系列措施,如多媒体过滤、压缩、流量自适应、QoS感知路由等等。协议栈底层大多是为了增加网络吞吐量、减少能耗、有效利用网络资源而设计的,对多媒

体信息及其应用特性考虑欠佳,WMSN跨层设计就是在网络资源和QoS需求的约束条件下,结合各层的优化策略,实现层间信息交换和控制,以达到有效传输多媒体数据流的目的。

WMSN跨层设计可将各个协议层的优化策略合并融合,减少相关参数,选取最优策略,简化了协议层的设计复杂度。文献[27]将各层优化策略视为优化参数组成集合 $S(x)$,在网络限制(时延、能耗)和整体系统限制(如带宽分配、公平策略)下,采取最优控制策略,以获得最好多媒体传输质量($S^{opt}(x) = \text{argmax}Q(S(x))$)。将跨层优化问题转化为约束优化类问题,使用迭代优化和分层决策的方法,固定一组策略对其他参数同时优化,直至快速收敛。文献[28]在DS-CDMA视频传感器网络中综合考虑信源编码速率、信道编码率和节点功率等级,以最小化平均端到端失真的方式提供QoS保证,削弱远近效应影响。然而,建立这样的跨层模型存在一定困难:无线链路和多媒体特征是动态变化的,难以对其进行建模而且需要即时修正优化参数;参数的分组和优化顺序难以决定,这将直接影响到算法的收敛性。

另一种实现方法就是不相邻协议层之间通过增加接口和共享参数来实现系统性能优化。该方法实现起来较前一种简单,现有研究大多采用这种策略。文献[29]中的跨层设计模型仍然遵循严格的分层概念,自低向上,低层的状态信息依次影响高层的优化参数。文献[5]中提到的跨层通信体系则采用一个跨层控制器来统一控制各层的操作和交互,根据各个独立功能块(UWB收发器、信源信道编码器、QoS调度等)的状态信息来调配优化策略(编码率、数据传输率、接入控制等),以实现最小化能耗和多媒体流的QoS保证。

2.5 协议性能比较

表1对路由层协议进行比较分析,√为支持很好,∩为支持较好,×支持较差或不支持。

表1 路由协议性能比较

| Protocol | Real Time | Reliability | Resource reservation | QoS differentiation | Heterogeneity | Power Awareness | Cross-layer design |
|----------------|-----------|-------------|----------------------|---------------------|---------------|-----------------|--------------------|
| SPEED | √ | × | ∩ | × | × | × | √ |
| Akkaya et al | ∩ | × | × | √ | × | ∩ | × |
| Savidge et al | ∩ | × | ∩ | ∩ | × | × | ∩ |
| MMSPEED | √ | √ | ∩ | √ | × | × | √ |
| DGR | √ | ∩ | × | ∩ | √ | ∩ | √ |
| DAPR | × | × | × | × | × | √ | ∩ |
| S. Soro et al | × | × | × | × | × | √ | × |
| LANMAR | × | ∩ | × | × | √ | × | × |
| Stéphane et al | ∩ | ∩ | ∩ | × | √ | ∩ | ∩ |
| TTSR | ∩ | ∩ | × | × | √ | ∩ | × |
| CWR | × | ∩ | × | × | √ | ∩ | × |

表2对MAC层协议进行比较分析,√为支持很好,∩为支持较好,×支持较差或不支持。

表2 MAC协议性能比较

| Protocol | Type | Computation Overhead | Storage Overhead | Energy Consumption | Latency | Adaptability | QoS Differentiation |
|---------------|------------|----------------------|-----------------------|--------------------|--------------------------|--------------|---------------------|
| RL-MAC | contention | Q-learning | Priority packet Queue | Moderate | Priority differentiation | √ | √ |
| HMAC | Hybrid | Slot assignment | 1-neighbor | Moderate | Moderate | ∩ | × |
| 802.11e EDCF | contention | No needed | Priority Queue | High | Priority differentiation | ∩ | √ |
| Q-MAC | contention | Priority classify CW | Priority Queue | Moderate | High | × | √ |
| QoS-based MAC | contention | adjustment | Priority Queue | Low | Priority differentiation | √ | √ |

结束语 纵观国内外研究成果,在资源受限、链路动态变化的无线传感器网络上支持多媒体业务不再只是一个憧憬。国家自然科学基金委已将无线多媒体传感器网络列为2008年申报指南中的重点项目。针对多媒体流量数据的特点,采用数据压缩减少通信数据量;针对应用相关QoS需求各异的特点,采用区分服务以及流量自适应策略;针对网络异构性,利用中间件屏蔽底层网络,或利用分层网络模型根据节点能力差异各尽其用;针对层间相关性强,采用跨层优化技术提升系统性能。目前无线多媒体传感器网络还处于初级阶段,以上的研究成果或多或少存在理论上的不足,要形成成熟的应用技术,还有许多关键性技术需要解决。

1) 能量消耗:能量消耗一直是无线传感器网络的首要考虑因素,要支持多媒体业务,现有提高能源利用效率所采取的措施是远远不够的,还需要寻求其他路径来进行能源补给。

2) 覆盖问题:一些多媒体传感器节点(特别是视频节点)具有方向性感知的特点,感知区域受视角的限制。若感知目标和节点间有障碍物,会存在监控盲区,节点的传感方向可能会具有可调特性(如PTZ摄像头),实际应用中节点可能具有移动特性。异构传感器网络中,节点的感知范围存在差异。基于以上特点,很难对多媒体传感器节点建立统一的感知模型,如何实现全网的覆盖完整性和通信连通性,是未来的研究课题之一。

3) 网络安全:要将WMSN应用到军事、安防等领域,安全问题不容忽视。传统无线通信的信息安全技术(编码、加密、数字水印等)复杂度太高,无法直接移植到多媒体传感器网络中,需要把安全机制集成到系统设计当中,保证多媒体信息安全、可靠地传输。

参 考 文 献

[1] 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

[2] Vandalore B, Feng W C, Jain R, et al. A Survey of Application Layer Techniques for Adaptive Streaming of Multimedia[J]. Real TimeImg, 2001,3(7):221-235

[3] Feng W, Code B, Kaiser E, et al. Panoptes: scalable low-power video sensor networking technologies[C]//Proc. of ACM Multimedia. Berkeley, CA, USA, November 2003:562-571

[4] Kulkarni P, Ganesan D, Shenoy P, et al. SensEye: a multi-camera sensor network[C]//Zhang H J, Chua T-S, eds. Proc. of the 13th Annual ACM international Conference on Multimedia'05. New York: ACM Press, 2005:229-238

[5] Akyildiz I, Melodia T, Chowdhury K R. A survey on wireless multimedia sensor networks[OL]. Computer Networks (Elsevier), 2006. <http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/multimedia.pdf>

[6] Downes I, Rad L B, Aghajan H. Development of a mote for wireless image sensor networks[C]//Proc. of COGNITIVE Systems with Interactive Sensors (COGIS). Paris, France, March 2006

[7] Little T D C, Ishwar P, Konrad J. A Wireless Video Sensor Network for Autonomous Coastal Sensing[C]//Proc. Conference on Coastal Environmental Sensing Networks (CESN 2007). Boston M A, April 2007

[8] Gerla M, Xu K. Multimedia streaming in large-scale sensor networks with mobile swarms[C]//Papakonstantinou Y, ed. Proc.

of the ACM SIGMOD 2003. New York: ACM Press, 2003:72-76

[9] Magli E, Mancin M, Merello L. Low-Complexity video compression for wireless sensor networks[C]//Proc. of the Int'l Conf. on Multimedia and Expo. Vol 3, 2003:585-588

[10] Aaron A, Setton E, Girod B. Towards practical Wyner-Ziv coding of video[C]//Proc. IEEE Int. Conf. Image Process. Barcelona, Spain, vol. 2, Sep. 2003:869-872

[11] Louberry C, Roose P, Dalmau M. Towards Sensor Integration into Multimedia Applications[C]//Universal Multiservice Networks (ECUMN'07), Fourth European Conference on, 2007

[12] Huang Jie, Feng Wu-chi, Bulusu N, et al. Cascades: Scalable, Flexible, and Composable Middleware for Multimodal Sensor Networking Applications[C]//MMCN 2006. January 2006

[13] He T, Stankovic J A, Lu C, et al. A spatiotemporal communication protocol for wireless sensor networks[J]. IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems, 2005,16(10):995-1006

[14] Akkaya K, Younis M. An energy-aware QoS routing protocol for wireless sensor networks[C]//Proc. of Intl. Conf. on Distributed Computing Systems Workshops (ICSDSW). Washington, DC, 2003

[15] Savidge L, Lee H, Aghajan H, et al. QoS-based geographic routing for event-driven image sensor networks[C]//Proc. of IEEE/CreateNet Intl. Workshop on Broadband Advanced Sensor Networks (BaseNets). Boston, MA, October 2005:991-1000

[16] 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 Trans. Mobile Computing, 2006,5(6):738-754

[17] Chen Min, Leung V C, Mao Shiwen, et al. Cross-layer and Path Priority Scheduling Based Real-time Video Communications over Wireless Sensor Networks[C]//IEEE Vehicular Technology Conference. May 2008:2873-2877

[18] Soro S, Heinzelman W B. On the coverage problem in video-based wireless sensor networks[C]//Proc. of the IEEE Intl. Conf. on Broadband Communications, Networks, and Systems (BroadNets). Boston, MA, USA, October 2005:932-939

[19] Perillo M, Heinzelman W. DAPR: A Protocol for Wireless Sensor Networks Utilizing an Application-based Routing Cost[C]//Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'04). March 2004:1540-1545

[20] Du Xiaojiang, Guizani S. A Secure Routing Protocol for Heterogeneous Sensor Networks[C]//IEEE GLOBECOM. 2006:1-5

[21] Du X, Xiao Y, Guizani S, et al. An Efficient Key Management Scheme for Heterogeneous Sensor Networks[C]//Proc. of IEEE GLOBECOM 2006. San Francisco, CA, Nov. 2006:1-5

[22] 刘文红,张宏科,陶丹.一种适用于唤醒机制的异构传感器网络节点协同唤醒路由算法[J]. 电子学报, 2007,35(7):1341-1346

[23] Liu Z, Elhanany I. RL-MAC: A QoS-aware Reinforcement Learning based MAC Protocol for Wireless Sensor Networks[C]//IEEE Conference on Networking, Sensing and Control. Ft. Lauderdale, FL, April 2006:768-773

[24] Wang Heping, Zhang Xiaobo, Khokhar A. An Energy-efficient Low-latency MAC Protocol for Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of IEEE GLOBECOM. 2006:1-5

[25] Yang L, Elhanany I, Hairong Q. An Energy-efficient QoS-aware

- Media Access Protocol for Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of the International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Networks. 2005
- [26] Navrati S, Abhishek R, Jitae S. Dynamic duty cycle and adaptive contention window based QoS-MAC protocol for wireless multimedia sensor networks[J]. Computer Networks, 2008, 52(13): 2532-2542
- [27] Schaar M V D, Shankar S. Cross-layer wireless multimedia transmission; Challenges, principles and new paradigms [J]. IEEE Wireless Commun, 2005, 12(4): 50-58
- [28] Pynadath E S, Kondi L P. Cross-layer Optimization with Power Control in DS-CDMA Visual Sensor Networks[C]// IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2006; 25-28
- [29] Setton E, Yoo T, Zhu X, et al. Cross layer design of ad hoc networks for real-time video streaming[J]. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(4): 59-65
-
- (上接第 18 页)
- [2] Rao J R, et al. Partitioning Attacks; Or How to Rapidly Clone Some GSM Cards[C]//IEEE Symposium on Security and Privacy. 2002; 31-41
- [3] Schuster A. Differential Power Analysis of an AES Implementation[R]. IAIK-TR2004/06/25. Http://www.iaik.tu-graz.ac.at/research/sca-lab/index.php, 2004
- [4] Chu jie, Zhao qiang, et al. Differential Power Analysis for Cryptographic ICs[C]//ICEMI'2007. 2007; 291-295
- [5] 邓高明, 陈开颜, 张鹏, 等. 差分功率分析仿真中的功率消耗模型[J]. 计算机工程, 2007, 33(14): 239-246
- [6] 陈开颜, 赵强, 褚杰, 等. 差分功耗分析单片机 DES 加密实现的旁路攻击[J]. 计算机科学, 2007, 34(11): 58-61
- [7] Kocher P, Jaffe J, Jun B. Differential power analysis[A]//Advanced in Cryptology-CRYPTO' 99 [C]. California, USA: Springer Verlag, 1999; 388 - 397
- [8] Bucci M, et al. A Power Consumption Randomization Countermeasure for DPA-Resistant Cryptographic Processors[C]//Integrated Circuit and System Design, LNCS 3254. 2004; 481- 490
- [9] OKeya K, Miyazaki K, Sakurai K. A Fast Scalar Multiplication Method with Randomized Projective Coordinates on a Montgomery-Form Elliptic Curve Secure against Side Channel Attacks[C]//ICICS 2002. LNCS 2288. 2002; 428-439
- [10] Chang H, Kim K. Securing AES against Second-order DPA by Simple Fixed-Value Masking[C]//CSS- 2003. 2003(15): 145-150
- [11] 韩军, 曾晓洋, 汤庭鳌. RSA 密码算法的功耗轨迹分析及其防御措施[J]. 计算机学报, 2006, 29(4): 590- 596
- [12] 赵佳, 曾晓洋, 韩军, 等. 抗差分功耗分析攻击的 AES 算法的 VLSI 实现[J]. 计算机研究与发展, 2007, 44(3): 378-383
- [13] 蒋惠萍, 毛志刚. 一种抗差分功耗攻击的改进 DES 算法及其硬件实现[J]. 计算机学报, 2004, 27(3): 334- 338
- [14] 童元满, 戴葵, 陆洪毅, 等. 基于细粒度任务调度的防功耗分析模式方法[J]. 计算机工程, 2006, 32(24): 15-16
- [15] Tiri K, Akmal M, Verbauwhede I. A dynamic and differential logic with signal independent power consumption to withstand differential power analysis on smartcards[C]//Proc. of the 28th European Solid State Circuits Conf. 2002; 403-406
- [16] Macdonald. A balanced-power domino-style standard cell library for fine-grain asynchronous pipelined design to resist differential power analysis attacks [D]. Boston; Master thesis of Boston University, 2005
- [17] Ratanpal G B, Williams R D, Blalock T N. An On-Chip Signal Suppression Countermeasure to Power Analysis Attacks [J]. IEEE Tran on Dependable and Secure Computing, 2004, 1(3): 179-189
- [18] 李翔宇, 孙义和. 用于密码芯片抗功耗攻击的功耗平衡加法器[J]. 半导体学报, 2005, 26(8): 1629- 1634
- [19] 童元满, 王志英, 戴葵, 等. 基于动态双轨逻辑的抗功耗攻击安全芯片半定制设计流程[J]. 小型微型计算机系统, 2007, 28(5): 935-939
- [20] Goubin L, Patarin J. DES and differential power analysis; the duplication method[A]//CHES[C]. 1999; 158-172
- [21] Messerges T S. Securing the AES finalists against power analysis attacks[C]//Fast Software Encryption (FSE2000). New York, 2000; 150-164
- [22] Akkar M L, Giraud C. An implementation of DES and AES, Secure against Some Attacks[A]//CHES2001[C]. Paris, France: Springer-Verlag, 2001; 309-318
- [23] L Akkar M, Goubin L. A generic protection against high-order differential power analysis [C] // Fast Software Encryption (FSE2003) 2003. LNCS 2887. Springer-Verlag, 2003; 192-205
- [24] Akkar M L, Bevan R, Goubin L. Two power analysis attacks against one mask methods [C] // Fast Software Encryption (FSE2004). LNCS3017. Springer-Verlag, 2004; 332-347
- [25] Suzuki D, Saeki M, Ichikawa T. Random Switching Logic: A Countermeasure Against DPA Based on Transition Probability [EB/OL]. IACR eprint Archive(<http://eprint.iacr.org/>). report 2004/346, 2004
- [26] Tiri K, Verbauwhede I. Securing Encryption Algorithms Against DPA at the Logic Level Next Generation Smart Card Technology[C]//CHES 2003. LNCS2779. Springer, 2003; 125-136
- [27] Popp T, Mangard S. Masked Dual-Rail Pre-charge Logic: DPA-Resistance Without Routing Constraints [C]//CHES 2005. Springer, 2005; 172-186
- [28] Borst J. Block Ciphers; Design, Analysis and Side-channel Analysis[D]. Katholieke Universiteit Leuven, September 2001
- [29] Mangard S. Hardware Countermeasures Against DPA-A Statistical Analysis of Their Effectiveness [C] // CT-RSA 2004. LNCS2964. 2004; 222-235
- [30] Mangard S. Securing Implementations of Block Ciphers against Side-channel Attacks[D]. IAIK. Graz University of Technology, 2004
- [31] Tuyls P, et al. Read-proof Hardware from Protective Coatings [C]//CHES06. LNCS 4249. 2006; 369-383
- [32] Bar-El H, Choukri H, Naccache D, et al. The Sorcerer's Apprentice Guide to Fault Attacks. Proceedings of the IEEE, 2006, 94(2): 370-382