

无线传感器网络拥塞控制技术研究进展

刘辉宇 王建新 周志

(中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)

摘要 无线传感器网络中的数据传输模式主要是多对一的。由于传感器节点资源严重受限、通信链路易受干扰等因素,使得拥塞问题十分严重。而传统的传输控制协议,不管是有线网络上的还是自组织网络上的,并不完全适用于无线传感器网络。拥塞控制技术作为传输层协议的关键技术之一,是传感器网络协议研究中的一个热点问题。从拥塞控制技术的研究背景入手,综述了当前该领域具有代表性的工作,对涉及的主要方法进行了分析比较。最后进行了总结并指出了传感器网络拥塞控制技术未来的研究方向。

关键词 无线传感器网络,拥塞控制,传输协议

Survey of Congestion Control Technology for Wireless Sensor Networks

LIU Hui-yu WANG Jian-xin ZHOU Zhi

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

Abstract In Wireless Sensor Networks (WSN), the main communication mode is many-to-one. Because of the energy limitation of motes, and interference of wireless links, congestion control problem is very severe. Traditional transport protocols in neither wired network nor Ad-Hoc network can be applied in WSN directly. Congestion control technology, as a key component of transport protocol, is the research focus in WSN. This paper introduced the research background of congestion control technology firstly, and then gave a survey on the recent novel mechanisms. Then we analyzed and compared details of the main approach concerned. In the end, we summarized the current research work and pointed out the future research direction.

Keywords Wireless sensor network, Congestion control, Transport protocol

1 引言

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)是当前国际上备受关注的、涉及多学科高度交叉、知识高度集成的前沿热点研究领域。传感器网络具有大规模密集部署、节点资源有限等特点。尤其显著的是它能量少、存储量小、计算能力差、带宽小,使得单个节点成本较低、可替代性好、体积小、适宜配置,但同时使得协议设计需要首先考虑节能、带宽利用率、网络生命周期、鲁棒性和扩展性^[1-3]。

最初设计的传感器网络主要用于事件监测,如监测地震、火灾等事件的发生或者对动植物生存环境、建筑物安全状况、交通拥堵情况进行监控。这类应用产生的数据量少,而且发生事件的局部区域往往存在大量冗余数据,对单个数据的传输可靠性要求不高,通过使用相应的资料融合技术,就可以减少传输量,造成拥塞的机会不多。所以在传感器协议研究的早期,并没有对传输层协议加以重视。随着网络规模的不断扩大和应用类型的不断增加,网络中的节点层次关系日益复杂,对于图像、视频等大档的传输需求逐渐增多,如何有效地管理数据流的传输并尽可能地避免拥塞,已经成为了传感器

网络当前面对的问题。这些问题不能简单依靠路由协议和 MAC 协议来解决,更不能交给应用程序,因为这会使得将来更换协议和应用变得复杂繁琐。

拥塞控制技术是传输控制协议中最基本、最核心的部分。一个时常出现严重拥塞且无法及时加以恢复的网络是不可能实现良好的 QoS 保证的,因此实施拥塞控制应该是其它 QoS 机制正常工作的必要前提。拥塞控制本质上是一个如何共享资源的问题。这些资源包括节点处理能力、缓存空间和通信链路带宽。这三者中的任何一个都可能成为潜在的瓶颈,从而导致网络拥塞。目前研究表明,传感器网络有着与传统网络明显不同的技术要求,传感器节点处理能力低、缓存空间小、传感器网络的无线链路质量差、带宽小以及数据流汇聚的通信方式等特点直接导致了其它网络体系中的既有协议不适用。TCP 的设计遵循“端到端”的边缘论思想,强调将一切与功能相关的处理都放在端系统上,中间节点仅仅负责数据包 的转发。对于传感器网络,这未必是一种合理的选择。TCP 协议创建和撤销连接的开销过大,未能考虑无线传输中多条链路的相互干扰,以及对由误码、节点死亡等非拥塞因素导致的丢包乱序问题的不恰当处理都使得 TCP 不能直接用于传

到稿日期:2008-06-24 本文受湖南省杰出青年基金(No. 06JJ10009),国家自然科学基金(No. 60673164),新世纪优秀人才支持计划(No. NECT-05-0683),高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20060533057)资助。

刘辉宇 男,博士研究生,CCF 会员,主要研究领域为无线传感器网络;王建新 男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为计算机网络、网络优化理论、无线传感器网络,E-mail: jxwang@mail. csu. edu. cn;周志 男,硕士研究生,主要研究领域为无线传感器网络。

传感器网络。一些为自组织的 Ad Hoc 网络设计的协议和算法也未必适合传感器网络的特点和应用的要求。节点标识(如地址等)的作用在传感器网络中就显得不是十分重要。中间节点上与具体应用相关的数据处理、融合和缓存也显得十分必要。数据流的多对一汇聚方式造成的“漏斗效应”也是 Ad Hoc 网络协议没有面对过的问题^[4-6]。

目前,国内外的研究机构对传感器网络的拥塞控制技术已经展开了研究,并取得了一定的工作进展。既有对传统协议的改进,也有截然不同的新方法。按照协议的主要思想和核心机制的不同,可以将它们分为两大类:一类是以改进传统协议为基础的基于拥塞检测与缓解的控制机制,另一类是以预先分配速率的方式防止发生拥塞的机制。本文将在第 2 节介绍基于拥塞检测与缓解的拥塞控制机制,在第 3 节阐述基于速率预分配的拥塞控制机制,最后进行总结并指出拥塞控制技术当前面临的问题和未来的发展方向。

2 基于拥塞检测与缓解的拥塞控制机制

基于拥塞检测与缓解的拥塞控制机制,其核心思想来自于对传统拥塞控制协议的改进。实施控制的过程,一般包括拥塞检测、拥塞通知和拥塞处理。

2.1 拥塞检测与通知

除了 CCF^[22] 和 Flush^[23] 协议,几乎绝大多数拥塞控制协议都需要检测拥塞的产生,并通知给不同的节点进行处理。按照拥塞的不同表现,人们采用了多种检测方式:

(1) 缓存区占用率。考察节点内等待发送的队列长度以判定拥塞。在早期的协议中,如 STCP^[7], Fusion^[8] 等,均采用这种检测方式。然而由于缺乏对无线通道干扰和竞争的考虑,仅仅依靠这个度量标准无法准确地判断拥塞。

(2) 缓存区占用率和通道采样^[9]。通道采样是指节点通过监听通道是否空闲来判断拥塞,该方法可以获知通道的繁忙程度,但是持续的监听会导致能耗开销过大。因此,文献[9]将它与缓存区占用率相结合,只有在缓存区非空时才进行通道采样。

(3) 拥塞度^[10,11]。平均包服务时间与平均包间隔时间的比值。其中包服务时间是指一个数据包从到达 MAC 层到成功发送完毕之间的时间间隔,包间隔时间是两个相继到达 MAC 层的数据包之间的时间间隔。

(4) 逼真度^[12]。接收数据的完整程度。每种应用对接收数据的完整性都有一定的要求。有些要求高,如加密或压缩档、程序代码的传输;而有些要求稍低些,如图像、视频信息的传输。文献[12]使用逼真度作为判断拥塞的依据,通过启动相应的分流机制缓解拥塞。

(5) 负载强度^[17]。负载强度是根据簇内所有节点的本地流量信息计算出的一个综合性的度量值。文献[17]认为无论是队列长度还是信道状态,都不足以完全反映拥塞情况。采用负载强度,可以综合考虑节点内的流量负载情况和信道竞争状况,能更精确地检测拥塞。

节点检测到拥塞之后,需要把拥塞状况通知给相关的节点,以便进行缓解拥塞的处理。进行拥塞通知的方式主要包括明文方式(explicit congestion notification, ECN)和捎带方式(implicit congestion notification, ICN)^[25]。采用明文方式通知会增加额外的传输开销。捎带方式利用无线信道的广播

特性,将拥塞信息捎带在转发包中,其它节点通过监听获知^[25]。这样做的好处是减少了通知的开销,但要求节点持续监听,并且在通道竞争比较激烈的情况下,存在漏听与错听的可能性,通知的可靠性不如明文方式。

2.2 拥塞处理

拥塞处理就是对已经发生的拥塞进行缓解。按照它所针对的对象和处理方式的不同,可以将现有的协议划分为端到端控制机制和分布式控制机制。有些机制,如 CODA,综合使用了两种控制机制,我们将按照其主要机制进行分类介绍。

2.2.1 端到端控制

端到端的控制方法,是指拥塞产生后直接对源端节点的发送速率进行调整。这类控制方法全部基于对速率的调整,需要端节点或中间节点对拥塞状态进行检测或对拥塞程度进行评估。使用这种控制方法的协议有 ESRT, PORT, STCP, EWCCP, RCRT 和 COMUT。

ESRT(Event-to-Sink Reliable Transport)^[13] 是第一个基于速率调节的拥塞控制协议,适用于事件发现。它以每个周期内 sink 接收的数据包数量作为网络的可靠性度量,结合节点的拥塞程度,把网络状态划分为 5 种。各节点通过观察队列长度及增长趋势判断拥塞产生并在数据包中设立标志位告知 sink。sink 节点根据网络状态计算下一周期内各节点的发送速率,然后广播通知到所有源节点。

ESRT 要求 sink 能够覆盖整个网络,且对不同节点没有加以区分,统一采用了相同的调整方式。它根据网络特征调节速率,但对于执行事件发现任务的节点,只有在事件发生时才发送数据,调整传输速率对该类型的某些应用来说并不实用。此外,ESRT 对大规模网络中的短暂时不具备扩展性。

PORT (Price-Oriented Reliable Transport protocol)^[14] 在 ESRT 的基础上做了改进,不再单纯统计收包数量,而根据不同源节点对逼真度的不同贡献,优化调整方案。另外,增加了多跳转发的方式将速率通知到源节点。

STCP(Sensor Transmission Control Protocol)^[7] 是一种分布式的基于分簇的支持多类型流传输的协议。类似于 RED, STCP 协定为每个节点的队列设置两个门限: t_{low} 和 t_{high} , 当队列长度超过 t_{low} 时,包上的拥塞位会以一定的概率打上标记。如果队列长度超过 t_{high} , 所有经过该节点的包都会被打上标记。sink 收到打了标记的包后,将通知源节点转移路径发送或者减速,从而缓解拥塞。

EWCCP (Explicit Wireless Congestion Control Protocol)^[15] 是基于无线多跳网络提出的协议,用到了干扰节点的概念。干扰节点包括发生拥塞的节点和父节点的邻居节点。EWCCP 把所有干扰节点的集合看成一个系统,通过节点间的显式合作和来自转发节点的显式回馈来处理拥塞。每个节点通过周期性地共享信息,计算所有干扰节点组成的系统的总队列长度来判断拥塞。数据包在转发的过程中,会捎带上沿途各转发节点所在系统的队列长度信息,到达接收端以后,接收端的 ACK 同时携带了正回馈和负反馈信息,发送端据此采用 AIMD 的方式对发送速率进行调节。

RCRT(Rate-Controlled Reliable Transport)^[16] 是一种提供可靠传输和拥塞控制的传输协议,适合需要传输大量数据且不容许丢失的高速应用,如图像采集、建筑物监控、声音定位等。

RCRT 在 sink 端检测拥塞,有点类似于有线网的检测方式。但 sink 又不同于有线网的 TCP 发送端,因为数据流汇聚的特点,使 sink 能掌握更多的网络信息。RCRT 为每个流维护一个乱序包列表,该表的长度表示在发生未修复的丢包后共收到了多少个数据包,它反映了现在距离首次丢包发生的时间间隔。理想状况下,丢失包的修复时间应该大约相当于一个 RTT(round trip time)。如果满足此条件,则网络不拥塞;如果修复时间大于两个 RTT,则网络很可能已经拥塞了。RCRT 的拥塞处理策略是先由 sink 决定增加或减少的速率总量 $R(t)$,再分配给各个源节点。这种设置允许管理员为不同的应用采取不同的分配策略。RCRT 对速率总量 $R(t)$ 的调节方式是 AIMD 的。RCRT 处理多个相互干扰的流时很高效,与传统方法相比保证高到达率和低延时更好。它可与多种路由协议相结合,并区分了对不同优先级的数据流的处理。

RCRT 存在的问题是,距离 sink 越远的节点,修复的包数也越多,然而修复时间的延长并不一定是拥塞导致,也可能是重传的过程中误码或干扰造成,从而错误地启动了拥塞缓解机制,降低了吞吐量。周期性的统计和决策对于深度较大的网络来说反应显得有些迟缓。一方面当 sink 节点发现拥塞时,可能拥塞状况已经恶化了,此时再把分配好的速率传递到源端节点,在准确性和时效性上已经打了折扣;另一方面,如果已经发生了拥塞,下行线路的质量难以保证,将分配速率通知到源节点也将变得困难。

在基于事件的应用中(例如灾难恢复任务),某些流相比其它需要更高的包到达率和低延时。针对此类应用,Kyriakos Karenos 等人提出了 COMUT (Congestion Control for Multi-class Traffic)^[17],这是一种分布式的基于分簇的支持多类型流传输的机制。在一个簇中,进行外部通信的叫做哨兵节点,簇内节点与哨兵节点直接通信。每个簇内节点周期性地计算本地流量,并广播给哨兵节点,由哨兵综合统计本簇内的负载强度。由于负载强度与现有流数、新进流数、节点密度和节点处理能力密切相关,精确的计算在实际操纵中很难实现,因此 COMUT 采用近似模型进行估计。定义上游节点为数据包传入的节点。检测到拥塞发生的簇的哨兵将负载强度信息回馈给上游哨兵,经过逐跳的计算和回馈,最终源端哨兵可以获知整条路径上的负载强度和拥塞状况。

在速率调整上,数据源采用了 AIMD 的方式,周期性地调整速率。COMUT 为重要的数据流赋予了高于其它数据流的优先级,在发生拥塞后进行降速时,低级别的数据流将会降至最小发送速率。

表 1 给出了基于端到端的拥塞控制协议的比较。从最早的 ESRT 协议到最新的 RCRT,COMUT 协议,端到端的控制思想延续至今并将进一步发展下去。通过比较可以发现,端到端的拥塞控制方法一般采用显式通知的方法告诉源端降速,这是因为通知的距离较长,控制包的可靠性和时效性需要得到保证,才能以最快的速度缓解拥塞。处理拥塞的方法都是基于速率调整的,因为降低源端的发送速率,就是从根本上解决了流量过大的问题,同时通道竞争也相应减少,是缓解拥塞最有效、最根本的办法。基于这种处理方式的速率调整情况,是围绕着最佳速率上下波动的锯齿状曲线。但是端到端的处理也存在一定的局限性,例如在规模较大的网络中,拥塞

通知的延时较长,如果只是短暂的拥塞,则源端收到降速要求后很可能拥塞已经缓解,继续调整反而降低了吞吐量。因此,端到端的拥塞处理机制,适用于处理涉及面广、持续时间长的较严重的拥塞。

表 1 端到端控制技术比较

协议名称	拥塞检测度量	拥塞通知方式	拥塞处理方法
ESRT	每周期收包数	显式	直接指定速率
PORT	逼真度	显式	直接指定速率
CODA	缓存区占用率和通道采样	显式	AIMD
STCP	缓存区占用率	显式	源端降速或分流
EWCCP	干扰系统缓存区占用率	显式	AIMD
RCRT	丢失包修复时延	显式	AIMD
COMUT	负载强度	隐式	AIMD

2.2.2 分布式控制

分布式的控制方式,一部分是基于速率调整的,协议在发生拥塞的区域就地采取措施,例如立即降低上游节点的发送速率减少数据包流入,或者降低邻居节点的发送速率减少信道竞争。经过逐跳的限速,最终达到控制源端速率的目的。采用这种调整方式的协议有 CODA, Fusion, SenTCP, PCCP, Buffer-based 和 IFRC。还有一些是基于流量调度的,如 ARC, Siphon, CAR 和 BGR,在发生拥塞的区域通过对数据进行分流,使拥塞得以缓解。

(1) 基于速率调整的分布式控制

CODA (congestion detection and avoidance)^[9] 使用了多种机制来缓解拥塞。开环的 Hop-by-Hop 后压机制适用于短暂拥塞,要求拥塞节点广播后压消息,后压消息沿数据流向的反方向传播直到源端节点。收到后压消息的源端节点采用 AIMD 调整速率或者选择丢包,并参考本地网络状况决定是否继续发送后续数据包。若网络持续拥塞较长时间,则进入死循环拥塞控制机制。sink 根据所收到监测节点发送的消息中的调整位元,调整该事件所有源节点的发送速率,并显式回馈给各源节点。文中提到的 AIMD 调整方式,会偏向于 sink 附近的节点,它们通常会获得更大的发送速率,这将导致 sink 从各节点收到的数据包数量不均衡。

Fusion^[8] 采用了跨层的设计来应对拥塞。它包含了 3 种机制: Hop-by-Hop 的流量控制、速率限制和带优先级的 MAC 层处理。Hop-by-Hop 的流量控制机制是为了防止发送数据给已拥塞节点,导致数据包丢失。每个节点在发送的数据包包头都设置了一个拥塞位,利用无线通信的广播特性,所有邻居节点都能够监听到这一信息。节点通过检查队列长度和信道采样检测拥塞,一旦检测到拥塞的发生,就通过拥塞位广播拥塞信息。监听到拥塞的邻居节点停止发送数据包,等待下游节点清空队列。速率限制机制采用了令牌桶的方式,子节点监听父节点的子树节点数目 N ,在父节点成功发送 N 个资料包后该节点可获得一个令牌。这种机制保证了各节点间发送速率的公平性。为了鼓励父节点迅速清空队列,Fusion 采用了优先级 MAC 处理机制,把拥塞节点的退避窗口设为非拥塞节点的 $1/4$,从而提高了通道竞争的成功率,加速了数据的发送。Fusion 的局限性是只用缓存占用率作为度量,没有估计转发路径上存在的干扰。

SenTCP^[10] 使用包间隔时间和包服务时间来计算拥塞度。节点可以通过逐跳向数据传输的反方向发出回馈消息。回馈消息携带了本地拥塞度 C_d 和缓存占用率 B_r ,上游节点

和邻居节点据此调整发送速率。每个节点还各自统计包间隔时间和缓存占用率,当检测到拥塞发生时,更新回馈消息中的拥塞度并转发。上游节点以及源端节点根据回馈消息调整发送速率,调整的比例系数为拥塞度的倒数($1/C_d$)。为了减少能耗,降低开销,SenTCP 设置了两种情况下的回馈策略:1)如果 B , 超过门限值 B_{max} , 则中间节点每接收一个包就发送一次回馈消息,该消息通过单播传递给上游节点;2)如果 B , 小于 B_{max} , 则节点会维护一个定时器。只有在定时器到期、 B 超出 $[B_{min}, B_{max}]$ 区间、周期内有新的数据包到达这 3 个条件同时满足时,节点才发布回馈信息。回馈信息多播给所有邻居节点,收到信息的所有邻居同时调整速率。

PCCP (node priority-based congestion control protocol)^[11] 对数据流按照重要程度不同进行了分级,并按照优先级保证速率调整的公平性,使得高优先级的节点能获得更高的速率和带宽。协议设置了两个队列,分别缓存本地产生的数据包和转发的数据包,采用 WFQ 或 WRR 算法进行调度。在拥塞检测上,采用了拥塞度作为拥塞程度的度量标准。平均包服务时间反映了节点内转发队列的占用情况,而平均间隔时间反映了信道竞争的激烈程度。拥塞度是否大于 1,反映了节点是否处于发生拥塞的趋势中。在拥塞处理方式上,PCCP 采取了从拥塞节点开始的逐跳调整策略。

Buffer-based 协议^[24]采用了一种基于缓冲区管理的轻量级控制机制。每个节点在发送资料包时携带自身的缓存占用率,邻居节点通过监听该信息判断是否应该继续发送数据包到下游节点。若拥塞时间较长,则各节点逐跳降速,最终控制源端节点的发送速率。此外,该协议可以配合流量调度的思想,采用多径路由或多 sink 节点对数据流进行分流处理,以避免拥塞。

IFRC(interference-aware fair rate control)协议^[18]提出了通过调整所有干扰节点的发送速率来减轻拥塞的思想。网络中的节点通过检测平均队列长度来检测拥塞。出现拥塞的节点在发送出去的包上携带拥塞状态信息,从而实现邻居节点之间的拥塞信息共享,监听到拥塞的各干扰节点分别调整速率,减轻拥塞。IFRC 的速率调整方式是 AIMD。IFRC 设立了两条规则:1)子节点的速率不超过父节点;2)一旦发生拥塞,节点将自身速率调整为所有干扰节点的速率中的最小值。通过这两条规则,IFRC 在实现拥塞缓解的同时保证了流之间的带宽共享和公平减速,防止 AIMD 调节方式导致的不公平性。

CXCC (cooperative cross-layer congestion control) 协议^[26]认为双向通信使得冲突增加,带宽利用率下降,应该充分利用无线网络中数据传输的广播特性,采用隐式侦听的方式进行 ACK 确认。为了避免拥塞,CXCC 规定上游节点的出速率不得超过转发节点的入速率,而这一目的的实现是采用逐跳分配令牌的方式。作者进一步对 CXCC 的重传机制进行了改进,把等待时钟到期后的重传数据包行为改为首先发送短小的查询包进行确认。

(2) 基于流量调度的分布式控制

还有一部分协议处理拥塞的方式是对进入拥塞区域的数据流进行调度,通过绕路、分流或者复位向等方式缓解拥塞,从而保证原有传输线路的畅通。采用这种处理方式的原因有二:1)某些应用的数据相当重要,不允许降速;2)传感器网

络通常节点数目较多,部署较密,能够找到更多的冗余资源建立新的路径来转移流量。基于流量调度的分布式控制协议有 Bandwidth management protocol, ARC, Siphon, CAR 和 BGR。

文献^[27]提出了一种带宽管理机制,根据一定的映射规则,对不同的数据流类型分配不同的带宽。协议同时采用了逐跳的控制方式,一旦某节点队列长度超限,就发送反馈信息告知上游节点减速,从而有效缓解拥塞,也避免了丢包。该协议侧重于带宽分配,而忽略了节点的能耗问题。

ARC(Adaptive Resource Control)^[19]在检测到拥塞发生后,将拥塞信息回馈到上游节点,并从第一个非拥塞节点开始分流。分流节点利用冗余节点建立多条路径,使数据流绕开拥塞区域。在拥塞缓解后,分流节点发送关闭消息,数据流仍然按照原先的最优路径传输。ARC 要求节点监听拥塞信息,建立预设路径,能耗开销较大,因此该协议结合了节点周期性休眠并动态调整休眠周期的方式节能。

Siphon^[12]是为了解决漏斗效应产生的拥塞而设计的流量复位向机制。Siphon 在网络中部署少量具有多个无线通信接口的传感器节点作为虚拟 sink。一旦原上行通道发生拥塞,传感器节点将资料流转而复位向到附近的虚拟 sink,再由虚拟 sink 进行转发。虚拟 sink 的拥塞检测度量是通道采样和缓存占用率,物理 sink 判断拥塞的依据是资料逼真度。Siphon 分流机制可与速率控制机制(如 CODA)结合使用。

CAR(Congestion Aware Routing)^[20]类似于 ARC 协议,是一种基于流量调度协议。在发生拥塞时,节点将低优先级的数据流通过其它路径转发,绕过拥塞区域,从而保证高优先级数据流的传输质量。CAR 适合于网络中存在实时数据传输的情况,这些对时延有着较高要求的数据流将被赋予高优先级。

BGR^[21]协议同样结合了多径路由协议。该协议采用了两种拥塞控制机制:网内包扩散(In-Net Packet Scatter, IPS)和端到端的包扩散(End-to-End Packet Scatter, EPS)。IPS 选择在拥塞节点附近直接分流,适合缓解短暂的拥塞。对于长时间的拥塞,则采用 EPS,在源端就开始在指定方向范围内随机选择下一跳邻居节点进行转发。此方法实现简单,但有可能在分流时将数据转发到其它的拥塞区域。

表 2 给出了采用分布式控制机制的协议的比较。分布式控制机制大多采用隐式通知的方法,这与分布式处理的范围通常在一跳至多两跳的范围内有关。分布式的速率调整能迅速缓解局部拥塞,但对于较长时间的拥塞,调控到达源端的速率较慢,单纯地局部减速,会继而引起上游节点的连锁反应,进一步恶化拥塞。综合使用两者,将有助于彼此的取长补短,更好地为数据传输服务。流量调度的方式需要与多径路由或地理路由相结合,建立和维护路由的开销较大,但此类协议无需降速,对保证高优先级数据的传输十分有效。

表 2 分布式控制技术比较

协议名称	拥塞检测度量	拥塞通知方式	拥塞处理方式
CODA	缓存区占用率 和通道采样	显式	AIMD
Bandwidth management	缓存区占用率	显式	AIMD
Fusion	缓存区占用率 和通道采样	隐式	令牌桶
SenTCP	拥塞度	隐式	MIMD
PCCP	拥塞度	隐式	综合计算速率

IFRC	缓存区占用率	隐式	AIMD
Buffer-based	缓存区占用率	隐式	停止发送或分流
ARC	缓存区占用率	显式	流量分流
CAR	缓存区占用率	显式	低优先级流分流
BGR	缓存区占用率 和通道采样	隐式	流量分流
Siphon	虚拟 sink 逼真度	显式	流量复位向
CXCC	缓存占用率	隐式	令牌桶

3 基于速率预先分配的拥塞控制机制

不同于上述所有机制,基于速率预先分配协议的设计思路是通过网络中各节点的速率进行合理的分配和严格的限制,避免拥塞的产生。该类机制需要网络中的节点能够很好地协调与合作。目前采用这种机制的协议有 CCF 和 Flush。

CCF(Congestion Control and Fairness for Many-to-one Routing)^[22]建立在树形结构之上,采用了自上而下的速率分配来避免拥塞。每个节点测算自己的平均发送速率,同时记录所辖子树的节点数目,将速率平均分配给所有子树内的节点,节点在自身平均发送速率和分配速率中选择较小的值作为自己的实际发送速率。平均发送速率的测算是由单次发送时延平滑累加而成。由于 CCF 采用了 RTS/CTS 机制的 MAC 协议,单次发送时间包含了进行通道预约的时间,因而反映了节点附近的通道竞争状况。当流数增多导致竞争加剧时,可分配的速率就相应减少。这种方式使得 CCF 能够根据信道状态动态调整速率总量,避免信道竞争因素产生的拥塞。子树节点数目的记录自下而上,逐级累加,这和速率分配的方向正好相反。通过速率分配机制,所有子节点的发送速率总和不会超过父节点的发送速率,从而有效避免了队列溢出导致的拥塞。

CCF 需要父子节点的协作,保证稳定的父子关系十分重要。同时由于各种因素可能导致平均发送速率难以稳定,频繁的速率调整使得整个网络的速率波动较大。配置了 CCF 的节点需要为每个子节点单独维护一个转发队列,实现起来不够方便且占用太多缓存空间,对广度较大的网络扩展性差。对 MAC 协议预约机制的依赖也是 CCF 的一个制约因素,在数据量不大的传感器网络中,由于干扰概率小,通常会采用 CSMA 的通道竞争机制。

Flush^[23]是一种适用于直线拓扑的传输控制协议。设计目的是在无干扰环境下使传输速率最大化。Flush 是基于速率分配的拥塞控制机制,各节点在确定好发包时刻后相互之间不会干扰,在直线环境单流的情况下不会产生拥塞。

Flush 建立在特殊的网络类型上,着重解决传输中可能导致拥塞的两个问题:通道干扰,包括避免相邻节点的同时收发和隐藏节点问题;节点间速率不匹配导致的缓存溢出问题。为此,Flush 订立了两条规则:节点只有在不受干扰的情况下才发送数据;一个节点的发送速率不得超过其后继转发节点的速率。速率的分配过程在源端发起,到源节点结束,使得每个节点都知道自己的发包间隔,从而确定发送速率。Flush 现在只能在直线拓扑上实施并且网络中一次只能允许一个数据流存在。

对节点速率进行预先分配,需要节点间更好地共享信息,协同计算。虽然这类协议对设计的要求更高,处理的方式更复杂,对于网络规模变化的可扩展性和适应节点移动或失效所要求的灵活性都还达不到要求,但仍不失为一种有效的充

满活力的新思路,而且在避免拥塞、保证数据流快速稳定传输方面已经表现出了强大的优势。

结束语 传感器网络中的拥塞控制协议是控制数据传输、保证网络服务质量的关键技术之一。现有的拥塞控制协议可以分为两类:基于拥塞检测与缓解的控制机制和基于速率预先分配的控制机制。前者又可以按照控制对象与处理方式的不同分为端到端控制机制和分布式控制机制。基于拥塞检测与缓解的控制机制是长期以来研究的重点,大量的研究成果也集中于此。该领域中越新的机制追求更精确、更细腻的拥塞检测方式、更高效的拥塞通知方式和更细致的调整策略。而基于速率预先分配的控制机制另辟蹊径,从不同的角度对拥塞控制手段进行了思考和尝试,也取得了不错的效果。当前的研究虽然取得了一些成果,但协议体系仍然不够完善,各种机制也没有得到充分的测试与实践。对传感器网络拥塞控制技术乃至传输控制协议的进一步深入研究与实践,将是未来传感器网协议研究的热点,同时也是重点。

本文综述了国内外关于传感器网络拥塞控制技术的相关研究。在对现有协议进行比较分析的基础上,我们认为如下几个方面还有待进一步深入研究:

(1) 在拥塞检测方面,目前已由单一状态检测发展到多状态、多指标相结合的方式,较之传统的检测手段更为合理,判断拥塞的准确性有所提高。然而,采用哪些指标是充分而必要的,它们之间又如何相互配合,进行优势互补,在现有的研究工作中还没有进行过探讨。此外,拥塞程度的度量决定了缓解拥塞的效果,从最初的非此即彼的简单判断到划分区域的分段判断,再到连续的、平滑的拥塞程度反馈,反映了学术界一直以来对该问题的关注以及研究的思路。但是如何判断拥塞的发生最为准确,怎样衡量拥塞的程度,至今没有定论。因此,继续发掘和归纳影响拥塞的基本因素,定义准确、细腻的度量标准,仍然是值得继续研究的问题。

(2) 基于速率调整的拥塞控制机制,调整的效果依赖于加减参数的设定。目前这些参数都是根据实验和经验手工设定,既繁琐又不理想。研究参数与环境变量,以及应用类型、数据流特征的关系将有助于我们确定最优的调整策略。

(3) 基于速率分配的控制机制是近两年提出的新型处理方式。在特定的应用背景下,精确控制节点的传输速率能够极大地提升吞吐量,有效避免拥塞和丢包,对提高可靠性和其他方面的 QoS 保证都有相当大的帮助。目前,对这种类型的控制机制的研究还处于起步阶段,模型相对粗糙,处理手段过于简单。如果要适用到较复杂的网络拓扑结构中,需要考虑的问题很多。由于传感器网络的应用相关特点,未来的研究趋势可能是针对某些特征鲜明、目的明确的应用,量体裁衣地设计出独特的基于速率分配机制的传输协议,把传输过程中发生拥塞的几率降到最低,最大限度地利用有限的资源。

(4) 未来的传感器网络应用可能存在多用户与节点的交互,因而也需要处理不同优先级的数据。协议的设计应该考虑到交互行为和多优先级问题的处理。相应地,在多数数据流、多用户的网络体系中,保证流之间的公平性将是十分必要的。

(5) 传感器网络不具有很强的移动性,但少量节点的移动行为(如 sink 移动收集数据),或者部分节点的整体移动行为(如部署在交通工具上的节点集的移动),会对数据传输带

(下转第 59 页)

- [4] 邬春学, 韩文冬. 基于 Internet 的网络控制系统端到端时延分析[J]. 计算机工程, 2007, 33(22): 158-160
- [5] 胡迎松, 高国强. 改进的分布式 QoS 路由算法[J]. 计算机工程, 2007, 33(22): 127-129
- [6] Deb S S, Woodward M E. A Delay-constrained QoS Routing Algorithm Based on Fano's Method[C]//Proceedings of International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies, 2006

(上接第 11 页)

来怎样的影响,是值得关注与研究的问题。在新协议设计之初,需要在实践中认真考察这些因素。

(6) 跨层的协议设计不利于通用型的网络。而传感器网络的特点,恰恰是专网专用,在同一个网络上应用的类型和数量都极其有限。因此,采用跨层设计的协议,将更有助于整个系统的优化。传输层与应用层、MAC 层以及路由层的紧密结合,不仅是一种必要,也是一种趋势。数据的采集、处理和传输本身是一个不可分割的整体,如果忽略其他层的信息反馈,单独依靠传输层进行拥塞处理和传输控制,在精确性上将难以保证,实施的效果也难以达到最优。

参 考 文 献

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114
- [2] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291
- [3] Wang C G, Sohraby K, Li B, et al. A survey of transport protocols for wireless sensor networks[J]. IEEE Network Magazine, 2006, 20(3): 34-40
- [4] 冯彦君, 孙利民, 钱华林, 等. MANET 中 TCP 改进研究综述[J]. 软件学报, 2005, 16(3): 434-444
- [5] Lindsey S, Raghavendra C, Sivalingam K. Data gathering in sensor networks using the energy-delay metric[J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, Special Issue on Mobile Computing, 2006, 13(9): 293-306
- [6] Ahn G S, Miluzzo E, Campbell A T, et al. Funneling-MAC: A Localized sink-oriented MAC for boosting fidelity in sensor networks[C]//Proc. of the 4th ACM Conf on Embedded Network Sensor Systems. New York, ACM Press, 2006: 293-306
- [7] Iyer Y G, Gandham S, Venkatesan S. STCP: A Generic Transport Layer Protocol for Wireless Sensor Networks[C]//IEEE ICCN 2005. San Diego, CA, Oct. 2005
- [8] Hull B, Jamieson K, Balakrishnan H. Mitigating congestion in wireless sensor networks[C]//Proc. of the 2nd ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). Baltimore: ACM Press, 2004: 134-147
- [9] Wan C, Eisenman S, Campbell A. CODA: congestion detection and avoidance in sensor networks[C]//Proc. of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Los Angeles: ACM Press, 2003: 266-279
- [10] Hu Yueming, Xue Yueju, Li Bo, et al. SenTCP: A hop-by-hop congestion control protocol for wireless sensor networks[C]//IEEE INFOCOM 2005. Miami, USA, 2005
- [11] Wang C G, Sohraby K, Lawrence V, et al. Priority-based congestion control in wireless sensor networks[C]//Proc. of the IEEE International Conf. on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing (SUTC). Taichung: IEEE Press, 2006: 22-31
- [12] Wan Y C, Eisenman S B, Campbell A T, et al. Siphon: Overload traffic management using multi-radio virtual sinks in sensor networks[C]//Proc. of the 3rd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). San Diego: ACM Press, 2005: 116-129
- [13] Sankarasubramaniam Y, Akan O B, Akyildiz I. ESRT: event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks[M]. IEEE MobiHoc 2004. Annapolis: ACM Press, 2003: 177-188
- [14] Zhou Y F, Lyu M R. PORT: a price-oriented reliable transport protocol for wireless sensor networks[C]//Proc. of the 16th IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE). Chicago: IEEE Press, 2005: 117-126
- [15] Tan K, Jiang F, Zhang Q, et al. Congestion Control in Multi-hop Wireless Networks. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2006
- [16] Paek J, Govindan R. RCRT: Rate-Controlled Reliable Transport for Wireless Sensor Networks[C]//Proc. ACM Sensys' 07. Sydney, Australia, Nov. 2007
- [17] Karenos K, Kalogeraki V, Krishnamurthy S V. Cluster-based congestion control for supporting multiple classes of traffic in sensor networks[C]//The 2nd IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors(EmNetSII). Sydney, 2005
- [18] Rangwala S, Gummadi R, Govindan R, et al. Interference-aware fair rate control in wireless sensor networks[C]//Proc. of the ACM SIGCOMM Symp. on Network Architectures and Protocols. Pisa: ACM Press, 2006: 63-74
- [19] Kang J, Zhang Y Y, Nath B, et al. Adaptive resource control scheme to alleviate congestion in sensor networks[C]//Proc. of 1st Workshop on Broadband Advanced Sensor Networks (BASENETS). San Jose: IEEE Press, 2004
- [20] Kumar R, Rowaihy H, Cao G H, et al. Congestion aware routing in sensor networks[R]. PSU 2006. http://nsrc.cse.psu.edu/tech_report/NAS-TR-0036-2006.pdf
- [21] Popa L, Raiciu C, Stoica I, et al. Reducing congestion effects in wireless networks by multipath routing[C]//Proc. of the 14th IEEE International Conf. on Network Protocols (ICNP), Santa Barbara: IEEE Press, 2006: 96-105
- [22] Ee CT, Bajcsy R. Congestion control and fairness for many-to-one routing in sensor networks[C]//Proc. of the 2nd ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). Baltimore: ACM Press, 2004: 148-161
- [23] Kim S, et al. Flush: A Reliable Bulk Transport Protocol for Multihop Wireless Networks[C]//Proc. ACM Sensys' 07. Sydney, Australia, Nov. 2007
- [24] Chen S G, Yang N. Congestion avoidance based on lightweight buffer management in sensor networks[J]. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2006, 17(9): 934-946
- [25] Yedavalli K. Using wireless advantage for congestion control in wireless sensor networks[R]. CENG-2005-13. University of Southern California, 2005
- [26] Hull B, Jamieson K, Balakrishnan H. Bandwidth management in wireless sensor networks[C]//Proc. of the 2nd ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press, 2004: 148-161
- [27] Scheuermann B, Lochert C, Mauve M. Implicit hop-by-hop congestion control in wireless multihop networks[J]. Elsevier Ad Hoc Networks, 2008, 6(2): 260-286