

基于无线传感器网络的跨层拥塞控制协议

张玉鹏¹, 刘 凯¹, 王广学^{1,2}

(1. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191; 2. 中国联通北京市分公司, 北京 100038)

摘 要: 无线传感器网络(WSN)中由拥塞引起的大量分组重传以及重传多次失败后的分组丢弃会导致较长的时延、较高的分组丢失率和较多的能量消耗. 为了准确探测和控制网络拥塞, 提出了一种基于跨层设计的拥塞控制协议, 即上行拥塞控制(UCC)协议. 该协议利用节点在媒质接入控制(MAC)层中未占用的缓冲器区间大小和所预测的通信流量作为该节点的拥塞等级指示, 并结合节点优先权分配上一跳节点的业务传输速率. 基于这种拥塞探测和考虑优先权的速率调节方法, UCC协议实现了跨层优化, 并通过逐跳调节业务传输速率减轻了网络拥塞. 仿真结果表明, 与CCF和PCCP协议相比, 该协议提高了吞吐量, 具有更好的基于优先权的公平性, 并且降低了分组丢失率.

关键词: 无线传感器网络; 拥塞控制; 跨层优化; 公平性

中图分类号: TN915.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2011)10-2258-05

Cross-Layer Congestion Control for Wireless Sensor Networks

ZHANG Yu-peng¹, LIU Kai¹, WANG Guang-xue^{1,2}

(1. School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. China Unicom Beijing Branch, Beijing 100038, China)

Abstract: Congestion in wireless sensor networks (WSNs) can lead to longer delay, higher packet loss ratio, and higher energy waste due to a large number of packet retransmissions and packet drops after several retransmission failures. To detect congestion precisely and regulate it fairly, a congestion control protocol based on cross-layer design, i. e. upstream congestion control (UCC) protocol, is proposed. In the protocol, each node takes advantage of unoccupied buffer size and predicted traffic flow at medium access control (MAC) layer as congestion level indication, and combines node priority to assign the upstream traffic rates of its last-hop nodes. Based on this congestion detection and priority-based rate adjustment schemes, the UCC protocol utilizes a cross-layer optimization and mitigates congestion with the help of hop-by-hop rate adjustment. Finally, simulation results show that the proposed protocol achieves higher throughput, better priority-based fairness and lower packet loss ratio than both congestion control and fairness (CCF) protocol and priority-based congestion control protocol (PCCP).

Key words: wireless sensor networks; congestion control; cross-layer optimization; fairness

1 引言

在无线传感器网络(WSN)中, 多对一传输的收敛特性^[1]和无线带宽资源的限制极易导致拥塞的产生^[2]. 拥塞不仅会引起缓冲器溢出, 从而导致较高的分组丢失和较大的队列时延, 并且会引发传输碰撞, 增加分组发送时间并消耗额外的能量. 因此需要避免或减轻拥塞来改善网络的分组丢失、时延和能量效率等性能.

近年来, 研究人员对无线网络的拥塞控制进行了大量的深入研究^[3-6]. 在现有研究中, 有两种拥塞控制方式: 网络资源管理和业务量控制. 前者通过带宽分配^[6]

来减轻拥塞, 这种方式需要保证精确的网络资源分配以避免资源的供应过量或供应不足, 这在无线多跳网络环境中是很难实现的. 相对而言, 业务量控制通过调节源节点或中间节点的业务传输速率来减轻拥塞, 在无法准确调节网络资源时更加可行有效, 此方法广泛应用于现有多对一传输的拥塞控制协议^[7-12]之中.

CODA^[7]协议基于缓冲器占用探测拥塞, 并以一种类似加性增乘性减(AIMD)的方式进行端到端的速率调节, 这样不仅响应缓慢并且高度依赖于往返时间(RTT), 不可避免地导致类似传统传输控制协议(TCP)的分组丢失. 与之相比, 逐跳的拥塞控制协议能够快速

响应,例如 Fusion^[8]和 CHCC^[9]协议.但是 Fusion 协议采用 stop-and-start 的速率调节方式并不能准确地实现对业务速率的控制.

文献[13,14]对不同网络环境下的拥塞与竞争进行了全面的分析,并指出需要通过媒质接入控制(MAC)层和上层间信息的共享来实现准确有效的拥塞探测和控制,即跨层设计^[15]势在必行.CCF 协议^[10]基于 MAC 层的分组发送时间探测并逐跳地控制拥塞,不过,因其速率调节算法仅仅依赖于分组发送时间,当某些节点业务量不足时会导致较低的资源利用率.另一方面,CCF 协议仅仅维持了简单的公平性,即每个节点允许的最大业务速率相等.这并不能满足某些传感器网络的需要,例如同时具有不同多媒体应用业务的无线多媒体传感器网络^[16],因此需要实现基于优先权的拥塞控制.PCCP 协议^[11]计算分组到达时间与分组发送时间的比值作为拥塞度量值,并结合各节点的优先权实现准确的速率调节.不过,在轻度拥塞的情况下,PCCP 协议并没有实现基于优先权的业务传输速率调节^[12].此外,PCCP 协议仅通过调节上一跳节点的业务传输速率解决本地节点的拥塞问题,并没有考虑其速率调节算法是否会在下一时刻造成上一跳节点的拥塞.

为了改进上述拥塞控制协议的弊端,提出了一种基于跨层设计的拥塞控制协议,即上行拥塞控制(UCC)协议.该协议利用节点在 MAC 层中未占用的缓冲器区间大小和所预测的通信流量计算拥塞等级,并结合节点优先权分配上一跳节点的业务传输速率,各节点据此逐跳地调节业务传输速率以便减轻网络拥塞.

2 网络和节点模型

在无线传感器网络中,所有节点都产生业务分组并向汇聚节点发送,从而形成多对一传输.对于各种不同的网络拓扑模型,都可以看做以 sink 节点为中心的多跳分层树形网络拓扑模型,如图 1 所示.对于某一节点 i ,定义 $C(i)$ 为它的子节点的集合, $P(i)$ 为它的父节点的集合.如图 1 所示,节点 5、6、7 为节点 2 的子节点,节点 0 为节点 2 的父节点.节点模型如图 2 所示,每个节点中可能存在两种类型的业务量:本地产生的源业务量和为子节点转发的业务量.定义源业务速率为 r_s^i ,转发业务速率为 r_r^i ,二者汇聚于 MAC 层形成总的输入

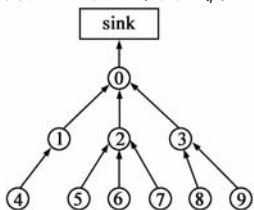


图1 网络模型

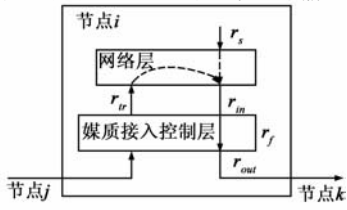


图2 节点模型

速率为 r_m^i .当 r_m^i ($r_m^i = r_s^i + r_r^i$)超过 MAC 层的分组发送速率 r_f^i 时,业务分组就会在缓冲器中形成队列.当 r_m^i 持续大于 r_f^i 时,节点 i 的缓冲器将很快被填满并最终导致溢出.因此在 UCC 协议中,我们尝试通过减少 r_s^i 和 r_r^i 的方式来控制这种拥塞.

3 UCC 协议

UCC 协议设法以较低的开销实现拥塞控制,在减少分组丢失的同时保证基于优先权的公平性.UCC 协议中,节点 i 的拥塞控制机制如图 3 所示,由两部分组成:拥塞探测(CD)和速率调节(RA),据此实现准确的拥塞发现和基于优先权公平性的拥塞控制.

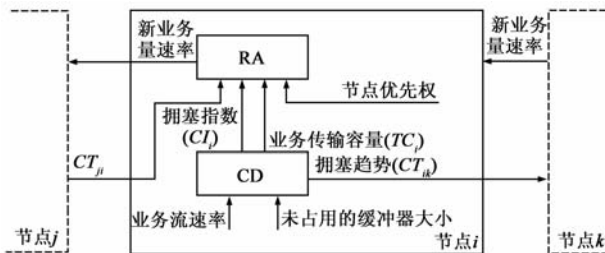


图3 节点 i 中的拥塞控制机制

3.1 拥塞探测

定义反映节点 i 当前拥塞程度的拥塞指数(CI_i)由 MAC 层中未占用的缓冲器区间大小($BS_{unoccupancy}^i$)和预测通信流量(Tr_i)决定如下:

$$CI_i = BS_{unoccupancy}^i - Tr_i \quad (1)$$

$$BS_{unoccupancy}^i = BS_{max}^i - BS_{occupancy}^i \quad (2)$$

$$Tr_i = (r_s^i + \sum_{j \in C(i)} r_{ji} - \sum_{k \in P(i)} r_{ik}) \times T \quad (3)$$

其中, BS_{max}^i 和 $BS_{occupancy}^i$ 分别定义为节点 i 的缓冲器大小和当前的队列长度. r_{ji} 和 r_{ik} 分别表示从节点 j 到节点 i 的平均输入业务流速率和从节点 i 到节点 k 的平均输出业务流速率. r_s^i 、 r_{ji} 和 r_{ik} 以时间间隔 T 进行周期性更新如下:

$$r_m^{new} = (1 - \omega) \times r_m^{old} + \omega \times \frac{N_T}{T}, \forall m = i, ji, ik \quad (4)$$

这里, N_T 表示时间间隔 T 内新到达分组的数目,其中 ω 为常数且满足 $0 < \omega < 1$.

根据式(1),当 $CI_i < 0$ 时,节点 i 的缓冲器已被填满,新的 Tr_i 不能被保留且极易引起缓冲器溢出,因此会导致拥塞的发生.而当 $CI_i \geq 0$ 时,缓冲器剩余空间的大小能够容纳当前的通信流量,节点 i 不会发生拥塞.因此, CI_i 能够准确地反映本地的拥塞程度,据此可以为节点 i 及其子节点分配适当的业务传输速率.

3.2 速率调节

定义节点 i 及其子节点 j ($j \in C(i)$) 间的业务优先权关系如下:

$$TP_i = \sum_{j \in C(i)} TP_j + SP_i \quad (5)$$

其中, SP_i 和 TP_i 分别定义为节点 i 的源业务优先权和总业务优先权. 如果节点 i 没有子节点, 二者相等. 由此计算一跳内节点 i 及其子节点的业务优先权比率 PR_s^i 、 PR_{ji}^i 如下:

$$PR_s^i = \frac{SP_i}{TP_i} = \frac{SP_i}{\sum_{j \in C(i)} TP_j + SP_i} \quad (6)$$

$$PR_{ji}^i = \frac{TP_j}{TP_i} = \frac{TP_j}{\sum_{j \in C(i)} TP_j + SP_i} \quad (7)$$

根据式(6)和式(7), 可以分别对节点 i 及其子节点进行具有优先权的源业务速率和转发业务速率的分配. 另一方面, 在调节子节点的业务发送速率时应估计子节点的拥塞趋势, 防止它们在下一时间间隔内发生拥塞.

当 $CI_i < 0$ 时, 具有拥塞趋势的子节点应当获得更多的业务传输速率. 定义节点 j 到节点 i 的拥塞趋势 (CT_{ji}) 如下:

$$CT_{ji} = CI_j - r_{ji} \times T, \forall j \in C(i) \quad (8)$$

其中, CT_{ji} 表示在时间间隔 T 内停止从节点 j 发送业务量到节点 i 时, 节点 j 发生拥塞的可能性. 如果 $CT_{ji} < 0$, 意味着当由于节点 i 发生拥塞而抑制 r_{ji} 时, 其子节点 j 可能会在下一时间间隔发生拥塞. 因此, CT_{ji} 的绝对值越大, 应分配给节点 j 的业务传输速率相应越大. 如果 $CT_{ji} \geq 0$, 表示即使抑制 r_{ji} , 节点 i 在下一时间间隔也不会发生拥塞. 所有满足 $CT_{ji} < 0$ 的 CT_{ji} 的绝对值总和 CT_i 定义如下:

$$CT_i = \sum_{j \in C(i)} |CT_{ji}|, \forall CT_{ji} < 0 \quad (9)$$

定义节点 i 的业务传输容量 TC_i 如下:

$$TC_i = BS_{\text{unoccupancy}}^i + \sum_{k \in P(i)} r_{ik} \times T \quad (10)$$

这里, TC_i 表示节点 i 在下一时间间隔能够容纳业务分组的能力. 为了检查 TC_i 是否足够大以满足所有 $CT_{ji} < 0$ 的子节点, 进一步定义 TC'_i 如下:

$$TC'_i = TC_i - CT_i \quad (11)$$

当 $TC'_i \geq 0$ 时, 节点 i 的业务传输容量能够满足 $CT_{ji} < 0$ 的子节点的需求. 业务传输速率将会首先分配给 $CT_{ji} < 0$ 的子节点, 剩余的业务传输容量将按照业务优先权分配给节点 i 和其它子节点. 于是, 可计算 $TC'_i \geq 0$ 时新的业务传输速率 r_s^i 和 r_{ji}^i 如下:

$$r_{s_new}^i = PR_s^i \times TC'_i \times \frac{1}{T} \quad (12)$$

$$r_{ji}^{new} = \begin{cases} (|CT_{ji}| + PR_{ji} \times TC'_i) \times \frac{1}{T}, & \text{if } (CT_{ji} < 0) \\ PR_{ji} \times TC'_i \times \frac{1}{T}, & \text{if } (CT_{ji} \geq 0) \end{cases} \quad (13)$$

当 $TC'_i < 0$ 时, 节点 i 的业务传输容量不能满足 $CT_{ji} < 0$ 的子节点的需求, 业务传输速率将只会分配给 $CT_{ji} < 0$ 的子节点. CT_{ji} 的绝对值越大, 分配给节点 j 的业务传输速率将会越大. 于是, 可计算 $TC'_i < 0$ 时新的业务传输速率 r_s^i 和 r_{ji}^i 如下:

$$r_{s_new}^i = 0 \quad (14)$$

$$r_{ji}^{new} = \begin{cases} TC_i \times \frac{|CT_{ji}|}{CT_i} \times \frac{1}{T}, & \text{if } (CT_{ji} < 0) \\ 0, & \text{if } (CT_{ji} \geq 0) \end{cases} \quad (15)$$

另一方面, 当 $CI_i \geq 0$ 时, 节点 i 不会发生拥塞, 不需要进行速率调节. 不过, 为了充分利用带宽, 可计算新的业务传输速率 r_s^i 和 r_{ji}^i 如下:

$$r_{s_new}^i = r_s^i + PR_s^i \times CI_i \times \frac{1}{T} \quad (16)$$

$$r_{ji}^{new} = r_{ji}^i + PR_{ji}^i \times CI_i \times \frac{1}{T} \quad (17)$$

此外, 为了减少控制开销, 当业务分组在层间传递时, 将拥塞探测中的 CI_i 、 TC_{ji} 记入业务分组的分组头中, 通过这种捎带的方式可以实现信息的跨层传递, 更新的业务传输速率和 CT_{ji} 同样以捎带的方式分别通知子节点和父节点, 由此完成逐跳的业务传输速率调节以实现拥塞控制, 因此本协议的通信开销较小. 各节点有关公式的计算仅仅限于本身及其子节点, 不会带来太大的计算开销. 另外, 每个节点只需要存储拥塞指数 (CI_i)、业务优先权 (TP_i)、拥塞趋势 (CT_{ji})、业务传输容量 (TC_i) 等几个参数, 存储开销较小.

4 性能评估

仿真评估场景为如图 1 所示的树形拓扑, 所有节点向汇聚节点发送业务分组形成多对一传输, 每个节点的优先权不尽相同, 具体仿真参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数

参数	取值
仿真区域	200 × 200 m ²
最大传输距离	50 m
数据速率	1 Mbps
分组长度	1024 bits
MAC 层协议	IEEE 802.11
缓冲器大小	10 ~ 100 packets
时间间隔 T	1 sec
ω	0.1
仿真时间	400 sec
源业务优先权 ($SP_0 \sim SP_9$)	1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 3, 1, 2

下面通过仿真软件 OPNET10.0 分别仿真比较 UCC、PCCP、CCF 三种协议的吞吐量、公平性和分组丢失率等性能.

4.1 归一化吞吐量

试验 1 假设所有节点的优先权相等,缓冲器中最多可容纳 60 个分组;在 $[100\text{sec}, 250\text{sec}]$ 时间间隔内节点 1 处于休眠状态.

图 4 为三种协议的归一化网络吞吐量.从图中可以看出,CCF 协议在 $[100\text{sec}, 250\text{sec}]$ 时间间隔内吞吐量较低,这是因为它使用了 work-conservation 调度算法,剩余传输容量不能得到有效地分配.而 UCC 和 PCCP 协议通过其各自的率调节算法对业务传输容量进行了合理的分配,因此维持了较高的吞吐量.

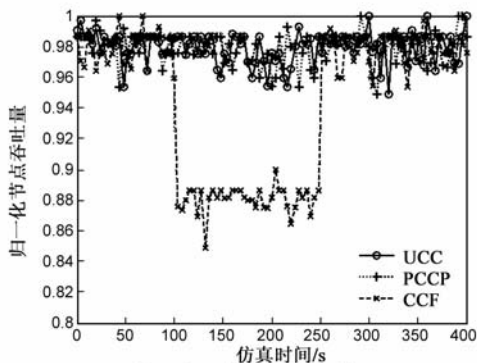


图4 归一化网络吞吐量

4.2 基于优先权的公平性

试验 2 假设所有节点的优先权如表 1 所示,缓冲器中最多可容纳 60 个分组;节点 6 仅在 $[100\text{sec}, 250\text{sec}]$ 时间间隔内保持激活状态并持续产生业务分组,业务传输速率与 SP_6 相对应.

图 5 为 UCC 协议中节点 5、6、7 的归一化吞吐量 ($SP_5 = 1, SP_6 = 2, SP_7 = 3$).从图中可以看出,UCC 协议基本维持了具有优先权的公平性.在 $[0\text{sec}, 100\text{sec}]$ 和 $[250\text{sec}, 400\text{sec}]$ 时,共有 9 个节点处于激活状态,总 SP 为 12,经业务传输速率分配后,节点 5 和 7 的吞吐量约为 $1/12$ 和 $1/4$.当节点 6 在 $[100\text{sec}, 250\text{sec}]$ 时间间隔内激活时,全部 10 个节点处于激活状态,总 SP 为 14,经业务传输速率分配后,节点 5、6、7 的吞吐量分别变为 $1/14, 1/7, 3/14$ 左右.因此,UCC 协议通过定义节点的业务优先权和业务速率调节算法有效地维持了基于优先

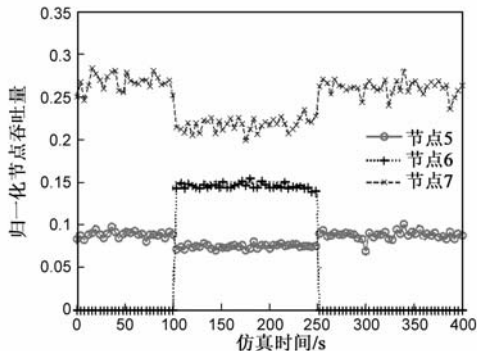


图5 UCC协议的归一化节点吞吐量

权的公平性.图 6 为 UCC 和 PCCP 协议所实现的公平性比较.从图中可以看出,两种协议都基本实现了基于优先权的公平性,但 UCC 协议表现更好.在轻度拥塞的情况下,PCCP 协议在增加子节点的业务传输速率时并没有考虑各节点的优先权,而 UCC 协议在所有拥塞状况下都基于 CI, CT, TC 和节点的业务优先权调节本地节点和子节点的业务传输速率.因此,UCC 协议比 PCCP 协议维持了更好的公平性.

4.3 分组丢失率

试验 3 假设所有节点的优先权如表 1 所示,缓冲器中最多可容纳的分组数量由 10 个逐渐增加到 100 个.

在文献[11]中已经证明 PCCP 协议比 CCF 协议具有更低的分组丢失率,因此我们仅仅比较 UCC 和 PCCP 协议在不同缓冲器大小下的分组丢失率,如图 7 所示.从图中可以看出,在 PCCP 协议中,缓冲器可容纳的分组数量越小,分组丢失率越高.因为 PCCP 协议仅仅通过调节子节点的速率来控制本地节点的拥塞,当缓冲器可容纳的分组数量很小时,在下一时间间隔由于输出业务速率的变化子节点极易发生拥塞,从而导致了分组的丢失.而 UCC 协议基于子节点的拥塞趋势和本地节点的业务传输容量分配速率,防止了下一时间间隔拥塞的发生,从而减少了不必要的分组丢失.

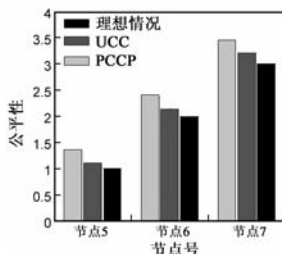


图6 基于优先权的公平性

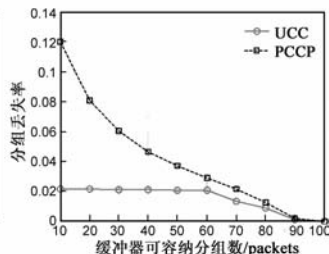


图7 不同缓冲器大小下的分组丢失率

5 结论

为了实现无线传感器网络中多对一传输时的准确拥塞控制,本文提出了一种基于跨层设计的拥塞控制协议,即 UCC 协议.该协议利用节点在 MAC 层中未占用的缓冲器区间大小和所预测的通信流量进行拥塞探测,结合节点的拥塞等级指示和优先权分配上一跳节点的业务传输速率,从而实现了逐跳的传输速率调节、减轻了网络拥塞.仿真结果表明,与 CCF 和 PCCP 协议相比,UCC 协议在保证基于优先权的公平性情况下,较好地避免了网络拥塞.

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: A survey [J]. Computer Networks, 2002, 38 (4): 393 - 422.

- [2] Wang C, Li B, Sohraby K, et al. A Survey of transport protocols for wireless sensor networks[J]. IEEE Network Magazine, 2006, 20(3): 34 – 40.
- [3] 彭立宏, 张鹤颖, 姜新文, 窦文华. 一种快速公平收敛的拥塞控制算法[J]. 电子学报, 2010, 38(8): 1918 – 1922.
Peng Li-hong, Zhang He-ying, Jiang Xin-wen, Dou Wen-hua. A congestion control method with quick fairness convergence speed[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(8): 1918 – 1922. (in Chinese)
- [4] 刘俊, 隆克平, 徐昌彪, 杨丰瑞. 两种改善无线 TCP 性能的新机制[J]. 电子学报, 2004, 32(12): 2056 – 2058.
Liu Jun, Long Ke-ping, Xu Chang-biao, Yang Feng-rui. Two new mechanisms for improving the performance of wireless TCP[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(12): 2056 – 2058. (in Chinese)
- [5] 邬海涛, 程时端, 隆克平, 马健. 区分服务网络中直接拥塞反馈机制与动态流量调节[J]. 电子学报, 2003, 31(4): 481 – 486.
Wu Hai-tao, Cheng Shi-duan, Long Ke-ping, Ma Jian. Direct congestion control scheme and dynamic traffic conditioning in differentiated services IP networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(4): 481 – 486. (in Chinese)
- [6] Harks T, Poschwatta T. Congestion control in utility fair networks[J]. Computer Networks, 2008, 52(15): 2947 – 2960.
- [7] Wan C Y, Eisenman S B, Campbell A T. CODA: congestion detection and avoidance in sensor networks[A]. Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems[C]. Los Angeles, CA, USA: ACM, 2003. 266 – 279.
- [8] Hull B, Jamieson K, Balakrishnan H. Mitigating congestion in wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems[C]. Baltimore, MD, USA: ACM, 2004. 134 – 147.
- [9] Wang X, Perkins D. Cross-layer hop-by-hop congestion control in mobile ad hoc networks[A]. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C]. Las Vegas, Nevada, USA: IEEE, 2008. 2456 – 2461.
- [10] Ee C T, Bajcsy R. Congestion control and fairness for many-to-one routing in sensor networks[A]. Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems[C]. Baltimore, MD, USA: IEEE, 2004. 148 – 161.
- [11] Wang C, Li B, Sohraby K, et al. Upstream congestion control in wireless sensor networks through cross-layer optimization [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(4): 786 – 795.
- [12] Yaghmae M H, Adjeroh D A. Priority-based rate control for

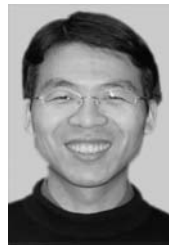
service differentiation and congestion control in wireless multimedia sensor networks [J]. Computer Networks, 2009, 53(11): 1798 – 1811.

- [13] Vuran M C, Gungor V C, Akan O B. On the interdependence of congestion and contention in wireless sensor networks[A]. Proceedings of the ACM International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems[C]. San Diego, CA, USA: ICST, 2005. 136 – 147.
- [14] Gungor V C, Vuran M C, Akan O B. On the cross-layer interactions between congestion and contention in wireless sensor and actor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2007, 5(6): 897 – 909.
- [15] Melodia T, Vuran M C, Pompili D. The state of the art in cross-layer design for wireless sensor networks[J]. Springer Lecture Notes in Computer Science, 2006, 3883(1): 78 – 92.
- [16] Akyildiz I F, Melodia T, Chowdhury K R. A survey on wireless multimedia sensor networks [J]. Computer Networks, 2007, 51(4): 921 – 960.

作者简介



张玉鹏 男, 1986 年 11 月出生, 河北沧州人. 2010 年毕业于西安电子科技大学电子工程系, 其后进入北京航空航天大学电子信息工程系攻读硕士学位. 从事无线网络方面的有关研究.
E-mail: angle.-zhang@163.com



刘凯 男, 1973 年 1 月出生, 山西孝义人. 副教授、中国电子学会高级会员、IEEE 会员. 分别于 1994 年、1997 年和 2001 年在西安电子科技大学获得工学学士、硕士和博士学位. 2000 年 3 月至 2001 年 2 月在日本静冈大学作访问研究, 2002 年 1 月至 2004 年 2 月在美国伊利诺斯理工学院做博士后, 2004 年 3 月起在北京航空航天大学工作. 主要研究方向包括移动通信网、卫星通信网络、无线传感器网络、移动 Ad Hoc 网络、协作通信网络、认知无线电网络和物联网. E-mail: liuk@buaa.edu.cn



王广学 男, 1983 年 6 月出生, 山东烟台人. 2010 年毕业于北京航空航天大学电子信息工程学院并获工学硕士学位, 现在中国联通北京市分公司工作. 主要从事网络路由、拥塞控制及系统设计等方面的研究.