

MANET 网络中基于队列长度的逐跳 AC 自适应调整机制

齐法制^{1,2} 张红梅¹ 张瀚文³ 孙智慧¹ 曾珊¹ 夏明山¹

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)¹ (中国科学院大学 北京 100049)²

(中国科学院计算技术研究所 北京 100190)³

摘要 提出了一种适用于 MANET 网络的基于队列长度的逐跳 AC 自适应机制(QLACSA)。QLACSA 机制的设计目标是解决 EDCA 在 MANET 网络中不同长度的业务流间的不公平竞争问题,为时延敏感的业务流提供可靠的端到端时延保证。QLACSA 机制作用于 MAC 层,对时延敏感的业务流,将其全局时延需求合理地划分成逐跳的期望时延,根据数据包的实际时延状况,执行逐跳的 AC 重估,并在 AC 的选择过程中综合考虑数据包的延迟状态、本地时延需求和队列的排队情况,以保证各数据包能在 QoS 要求的端到端时延要求内到达目的节点。QLACSA 还采用了整流策略,通过主动丢包实现“优胜劣汰”,将已经过期或有可能过期的数据包丢弃,从而降低可能的信道资源浪费,为具有更高传输成功率的数据包提供更多的传输机会。仿真结果表明,QLACSA 机制在满足端到端时延需求的同时,将路径较长的业务流吞吐量提高了 211%~245%左右。

关键词 Ad Hoc, multi-hop, 802.11e, EDCA, AC

中图分类号 TP393

文献标识码 A

DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.3.017

Queue Length Based Per-hop AC Self Adaptation for MANET

QI Fa-zhi^{1,2} ZHANG Hong-mei¹ ZHANG Han-wen³ SUN Zhi-hui¹ ZENG Shan¹ XIA Ming-shan¹

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)¹

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)²

(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)³

Abstract This paper proposed a queue length based per-hop AC self adaptation (QLACSA) mechanism for Mobile Ad Hoc networks (MANET). The objective of QLACSA is to balance the end-to-end delay for packets with different routing path, thus to guarantee the end-to-end delay for delay sensitive services. QLACSA serves in the MAC layer. For the flows with delay requirement, QLACSA divides the flows' total delay requirement into each-hop expected delay requirement, and dynamically adjusts the AC priority for each packet hop-by-hop according to the packet's delay situation, local delay requirements, and each AC queue's state, such that the packets can reach their destination within the required end-to-end delay specified by the QoS requirement. QLACSA utilizes the policy of "survival of the fittest" through a traffic shaping strategy. It drops the packets which can probably not reach the destination before the deadline in time, thus to release all the associated resources for other packets. Simulation results show that QLACSA is able to guarantee end-to-end delay for the delay sensitive services. The throughput of the flows with long hop increases by 211%~245%.

Keywords Ad Hoc, Multi-hop, 802.11e, EDCA, AC

1 引言

随着智能手机、平板电脑等移动终端的普及,基于 IEEE 802.11 的无线 Ad Hoc 网络(Mobile Ad Hoc Network, MANET)由于灵活低廉的无线接入能力,正得到越来越广泛的应用。另一方面,随着用户行为模式的改变,用户期望通过 MANET 网络承载的主流业务也逐渐从 Web 访问、邮件浏览等传统数据业务向音视频等多媒体实时业务转变^[1]。实时多

媒体业务具有严格的时延、吞吐量和丢包率等 QoS 需求,然而,当前 MANET 网络还无法实现对实时多媒体业务的 QoS 支持。

为实现应用层端到端的 QoS 支持,首先需在 MAC 实现 QoS 支持。为此,IEEE 提出了 802.11e 协议^[2],通过引入混合协调功能(Hybrid Coordination Function, HCF)对 802.11 MAC 进行了服务质量功能增强。增强型分布式协调接入(Enhanced Distributed Channel Access, EDCA)即是 IEEE

到稿日期:2015-03-24 返修日期:2015-07-24 本文受战略性先导科技专项(A类)(XDA100109),国家自然科学基金项目(11305196)资助。

齐法制(1978—),男,博士生,高级工程师,主要研究方向为高性能计算网络、移动网络、可信网络, E-mail: qfz@ihep.ac.cn; 张红梅(1977—),女,硕士,副研究员,主要研究方向为移动网络、数据库技术; 张瀚文(1981—),女,博士,副研究员,主要研究方向为移动网络、可信网络; 孙智慧(1985—),男,硕士,助理研究员,主要研究方向为高性能计算网络、未来网络。

802.11e 针对 IEEE802.11 DCF 的 QoS 扩展方案。EDCA 引入了 4 种接入类别 (Access Category, AC): AC_VO(语音业务)、AC_VI(视频业务)、AC_BE(尽力而为业务)、AC_BK(背景业务级别)对业务类型进行区分,根据具体的业务类型将上层数据包映射到相应的 AC 队列。通过为 4 个 AC 队列分配不同的退避参数 (AIFS、CW_{min}、CW_{max} 和 TXOP),使得各 AC 队列接入信道的优先级各不相同,从而实现不同类型业务的 QoS 区分与保障。

然而,由于 EDCA 最初主要是针对单跳的 WLAN 网络而提出的,将其直接应用于多跳的 MANET 网络中会存在同种类型不同传输路径长度的业务流之间的不公平竞争问题,从而难以实现实时业务的 QoS 保障。如图 1 所示,4 个视频流 (flow0—flow3) 在 EDCA 模式下将被映射到相同的 AC 队列 AC_VI,具有同样的优先级。从源节点到目的节点,flow0 需经过 2 跳,flow1 需经过 4 跳,flow2 需经过 1 跳,flow3 需经过 2 跳。该场景下存在不同传输路径长度的业务流间的不公平竞争问题,包括:

1) 节点内的不公平竞争: flow0 和 flow1 都要经过 Node2,那么 flow0 和 flow1 的数据包将以平等的机会竞争节点 2 中有限的 AC_VI 缓冲区,这是节点内部的不公平竞争。flow1 的数据包因为是经过 2 次的排队时延、接入时延、传输时延和传播时延才到达节点 2,因此在 Node2 处相对于 flow0 数据包应该优先对待,应该具有更高的优先级。

2) 节点间不公平竞争: Node1、Node2、Node4 处在相互干扰的范围内,Node1 中 flow1 数据包、Node4 中 flow0 数据包,以及 Node2 中 flow0 或 flow1 数据包以相同的优先级竞争信道,这是节点间的不公平竞争。

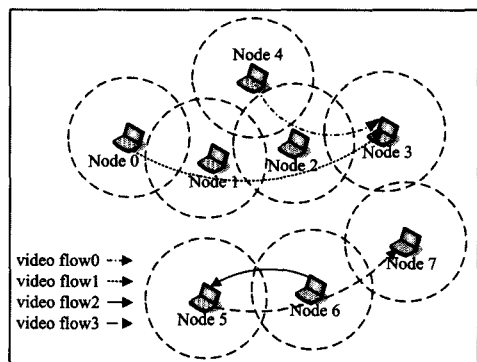


图 1 典型多跳场景

EDCA 机制通过设置不同的退避参数集 (AIFS_N、CW_{min}、CW_{max}、TXOP) 实现不同 AC 类别的优先级区分。但 EDCA 的核心参数固定不变,不能适应多变的网络环境。目前已有大量针对单跳 WLAN 网络提出的 EDCA 核心参数动态调整方案^[3-8],这些方案明显提升了 WLAN 网络的信道利用率及吞吐量。针对 MANET 网络,也有多种改善 EDCA 在多跳网络中的性能^[9-11]的参数调控机制被提出。然而,EDCA 核心参数调整仅仅能改变不同 AC 对信道访问的优先级,而对于图 1 中的映射于相同 AC 的同类业务流,是无法实现优先级区分的。因此,多跳 MANET 网络中存在的因业务流传输路径长度差异产生的不公平竞争问题,是无法通过退避参数调整解决的。于是文献[12-14]先后提出了 AC 调整方案,此类方案的共同点是数据包的优先级不再保持不变,而是

根据其在网络中累积的传输情况或本地节点的信道状况进行权衡,从而分配至合适的 AC 队列。

文献[12]提出了 APHD 机制,文献[13]在此基础上提出的 EDCA-TM 机制具有类似的基本思想,都是根据数据包已经历的时延和跳数,综合考虑信道状态或节点本地带宽,基于数据包的紧急程度,将数据包分配至合适的 AC,以保证数据包在过期之前到达目的节点。这两种机制都是在数据包早于预计时间到达时从最低优先级至最高优先级执行 AC 选择;而在数据包晚于预计时间到达时从最高优先级至最低优先级执行 AC 选择。不同的是,APHD 的 AC 选择判据是传输时延,而 EDCA-TM 的 AC 选择判据是传输速率。它们执行 AC 选择时均未考虑 AC 队列缓冲区的饱和情况,当 AC 队列缓冲区饱和时,后续到达该 AC 的数据包将被直接丢弃;并且这两种机制都依赖路由协议初始寻路的跳数,需要禁用路由的本地修复机制。

文献[14]提出了一种基于跳数的优先级调整机制 HBP,该机制认为累积跳数越多,数据包的优先级应该越高,故每经过一跳,数据包 IP 头部的优先级增加 1。根据 IP 优先级与 AC 映射关系可知,实际上相当于每经过两跳,数据包将被分配至更高一级优先级的 AC。HBP 没有严格的时延权衡策略,故多媒体应用的时延需求能否得到保证还有待验证。

针对现有研究的不足,本文提出了一种 AC 自适应机制 (AC Self Adaptation) QLACSA。该机制作用于 MAC 层,仅对有时延需求的数据包进行特殊处理,对没有时延需求的数据包依然采用 EDCA 模式进行处理。数据包在第一跳节点处执行首跳 AC 重估,权衡指标为数据包面临的路径长度;在路径中间节点根据时延情况执行迟到 AC 重估或早到 AC 重估,权衡指标为 AC 的平均发送时延和队长。QLACSA 是一种分布式的决策,不会为节点带来过多的计算开销,也不会对现有机制进行更改。

本文第 2 节详细介绍本文提出的 QLACSA 机制;第 3 节通过仿真实验分析对比 QLACSA 的性能;最后对全文进行总结。

2 QLACSA 机制

QLACSA 为时延敏感的业务流提供可靠的端到端时延保证,缓解 EDCA 在 MANET 网络中的不公平竞争问题,实现业务均衡。其设计思路是:上层数据包到达 MAC 层时,首先检查其是否有时延需求,若有时延需求,则 AC 保持不变,进入对应的 AC 队尾进行排队等待;若有时延需求,判断数据包是否过期,如果过期,直接丢弃数据包,未过期则进入 AC 重估环节,为数据包重新选择合适的 AC。

AC 重估环节是整个 QLACSA 机制的核心部分,包括 3 种 AC 重估方法。

1) 首跳 AC 重估:数据包在路由的第一跳节点处执行,权衡指标为数据包的源至目的路径长度。

2) 迟到 AC 重估:数据包晚于期望时延到达时执行,从 AC_VO 和 AC_BE 之中选出满足时延需求的 AC,权衡指标为 AC 的平均发送时延和队长。

3) 早到 AC 重估:数据包早于期望时延到达时执行,从 AC_VI 和 AC_BK 之中选出满足时延需求的 AC,权衡指标为

AC 的平均发送时延和队长。

QLACSA 将业务流中间路径节点中的 4 个 AC 队列分成两类:AC_VO 和 AC_BE 为晚于期望时间到达的数据包提供服务,为其提供较快速的传输机会;AC_VI 和 AC_BK 为早于期望时间到达的数据包提供服务,放慢其传输速率。因为有时延需求的业务流一般都是视频流或语音流,采用这种队列分类的方法可以实现尽快的数据包转发,尽量避免数据包被分配至 AC_BE 或 AC_BK 处而进行长期等待,以致出现堆积现象。QLACSA 的权衡指标综合考虑了 AC 的平均发送时延和队列长度,其中平均发送时延是指通过该 AC 成功发送一个数据包所需要的平均时间,包括信道接入时延和无线传播时延。

QLACSA 采用了适当的整流策略,主动丢弃已经过期的或传输成功率低的数据包,降低可能的信道资源浪费,为其他数据包提供更多的传输机会,实现“优胜劣汰”。

QLACSA 在 802.11e 头部的基础上扩展 tol_delay 和 hops_so_far 两个字段:tol_delay 用于记录端到端时延需求,该字段从源至目的保持不变;hops_so_far 用于记录已经经历过的跳数,该字段需要逐跳更新。QLACSA 的具体流程如图 2 所示。

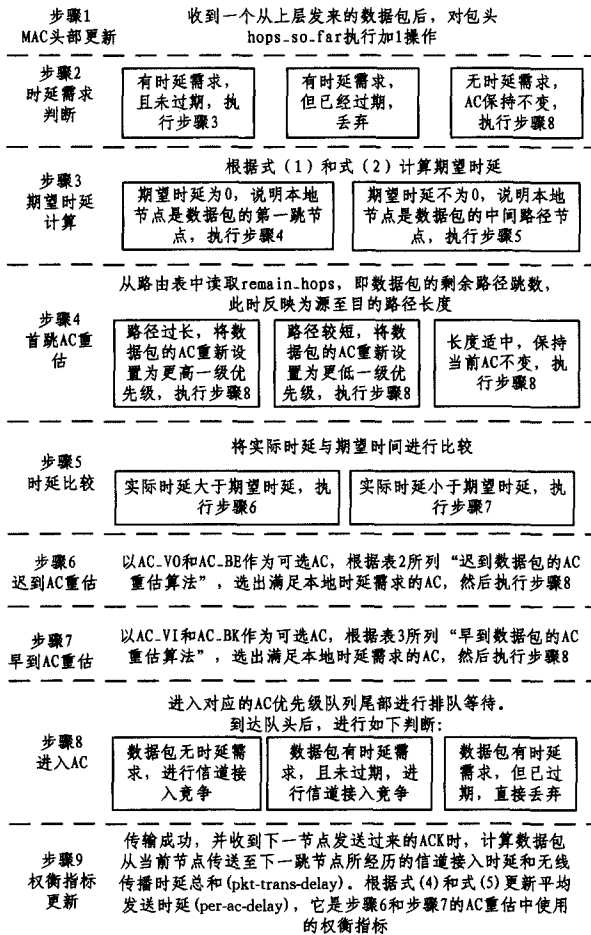


图2 QLACSA 机制的整体流程

其中,相关参数的计算方法如下(相关参数定义如表 1 所列):期望时延(delay_budget)

$$per_hop_delay_budget = \frac{delay_req}{hops_so_far + remain_hops} \quad (1)$$

$$delay_budget = hops_so_far \times per_hop_delay_budget \quad (2)$$

本地时延需求(local_delay_req)

$$local_delay_req = \frac{delay_req - delay_so_far}{remain_hops} \quad (3)$$

平均发送时延(per_ac_delay)

$$pkt_trans_delay = T_{recvACK} - T_{sendPKT} \quad (4)$$

$$AC[i].per_ac_delay = (1 - \rho) \times AC[i].per_ac_delay + \rho \times pkt_trans_delay \quad (5)$$

其中, $T_{sendPKT}$ 是本地节点记录的数据包发送时刻, $T_{recvACK}$ 是本地节点记录的 ACK 到达时刻,单次时延影响因子 ρ 越大越能及时反映当前的网络情况,QLACSA 中将其设置为 0.8。

表1 参数说明

参数	意义描述
per_ac_delay	AC 的平均发送时延,即通过该 AC 成功发送一个数据包所需要的平均时延
qlen	当前队列长度
QMAX	队列最大长度
ρ	单次时延影响因子
tol_delay	端到端时延需求
hops_so_far	经历过的累积路由跳数
remain_hops	路径剩余跳数
delay_budget	期望时延,即数据包到达本节点时的预计累积时延
delay_so_far	实际时延,即数据包到达本节点时所经历的累积时延
local_delay_req	本地时延需求,即数据包被当前节点成功发送至下一跳节点的时延成本
local_delay_est	本地时延估计,即数据包被当前节点成功发送至下一跳节点的时延估计
level	数据包将要分配至的 AC 队列标识

表2 迟到数据包的 AC 重估算法

```

If(delay_so_far >= delay_budget) //依次从 AC_VO、AC_BE 进行选择
{ for(i=AC_VO; i<=AC_BK; i+=2)
{ local_delay_est=(qlen+1)*AC[i].per_ac_delay;//本地时延估计
if(AC[i].qlen<=QMAX && local_delay_req>= local_delay_est)
//队列未满且本地时延估计满足本地时延需求
{ level=i;
selected=true;
break;//选出满足需求的 AC
}
}
else continue;
}
if(selected==false) drop packet; //若无满足要求的 AC,丢包
}

```

表3 早到数据包的 AC 重估算法

```

If(delay_so_far < delay_budget) //依次从 AC_VI、AC_BK 进行选择
{ for(i=AC_VI; i<=AC_BK; i+=2)
{ local_delay_est=(qlen+1)*AC[i].per_ac_delay;//本地时延估计
if(AC[i].qlen<=QMAX && local_delay_req>= local_delay_est)
//队列未满且本地时延估计满足本地时延需求
{ level=i;
selected=true;
break;//选出满足需求的 AC
}
}
else continue;
}
//若无满足要求的 AC,则不改变数据包的 AC
}

```

3 仿真实验

3.1 仿真场景及参数设置

在 NS2 下分别实现了 QLACSA、EDCA、APHD^[12]、ED-

CA-TM^[13]和HBP^[14],通过仿真实验对方案的端到端时延、吞吐量及丢包率等性能参数进行评价。

仿真场景如图3所示,仿真时长为100s,flow0在1s时启动传输,从源至目的需要经过5跳,99s时结束传输;flow1在flow0传输了一段时间后,即8s时启动传输,从源至目的需要经过2跳,98s时结束传输。flow1在flow0具有相同的优先级,时延需求都是1s,也就是如果1s之内还没有达到目的节点,数据包就过期了。接口队列类型采用Queue/DTail/PriQ,队列长度是55,采用先来先服务的排队方式,在队列已满的情况下,后续到达的数据包都将被丢弃,路由协议采用AODV。

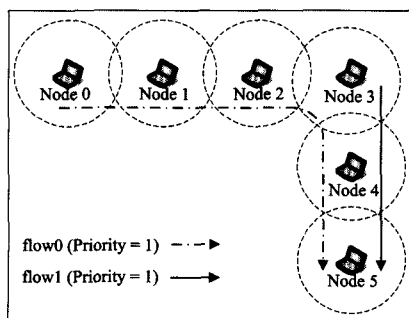


图3 仿真场景

3.2 仿真结果分析

图4和图5分别给出了两种流的平均端到端时延随仿真时间的变化情况,其中端到端时延均值每10s统计一次。

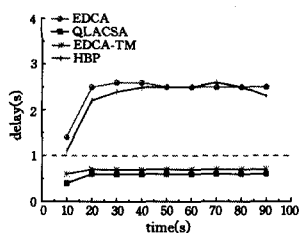


图4 flow0的端到端时延

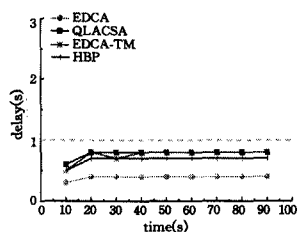


图5 flow1的端到端时延

由图4可以看出,QLACSA和EDCA-TM均很好地改善了flow0的时延问题,将其平均时延维持在了1s之内。flow0的端到端时延需求在QLACSA和EDCA-TM下才得到保证,这是因为QLACSA和EDCA-TM主动将过期的数据包丢弃了,并且QLACSA方案使flow0的时延比EDCA-TM方案的时延更低。由图5可以看出,跳数少给flow1带来的优势无疑是非常巨大的,各个方案下它的端到端时延都能得到稳定良好的保证。QLACSA和EDCA-TM虽然时延有所增加,但依然维持在1s之内。

图6和图7分别给出了两种流的端到端平均吞吐量随仿真时间的变化情况,其中吞吐量均值每10s统计一次。

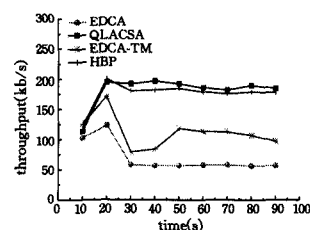


图6 flow0的端到端吞吐量

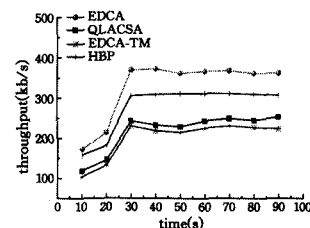


图7 flow1的端到端吞吐量

由图6可以看出,QLACSA极大地提高了flow0的吞吐量,增量上的优势超过了所有方案,将其吞吐量在EDCA基础上提高了211%~245%左右,而EDCA-TM仅提高了35%~106%左右。HBP虽然使flow0吞吐量提升至接近QLACSA的水平,但是却不能保证其端到端时延。由图7可以看出,QLACSA和EDCA-TM提高flow0吞吐量的代价是从flow1处剥夺了部分吞吐量,改善了部分路径网络带宽被flow1独占的现象,但是依然保证flow1具有足够的吞吐量。QLACSA方案中flow1的吞吐量仍然高于EDCA-TM。

图8给出了各种方案下,flow0和flow1的丢包率统计结果。从图中可以看出,相比于其它方案,QLACSA很好地实现了不同长度业务间的均衡,使得flow0和flow1因为传输路径长度不同而产生的丢包率差异大幅度缩小。

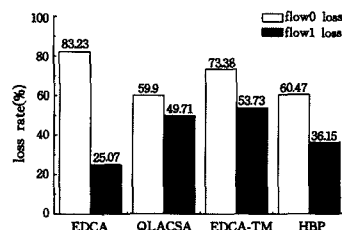


图8 丢包率

结束语 针对EDCA在MANET网络中应用时存在的不公平竞争问题,本文提出了一种基于队列长度的逐跳AC自适应机制QLACSA。该机制作用于MAC层,仅对有时延需求的数据包进行特殊处理:将其全局时延需求合理地划分成逐跳的期望时延,根据数据包的实际时延状况,执行AC重估,并在AC的选择过程中综合考虑数据包的本地时延需求、队列的排队情况、成功传输的数据包平均时延。QLACSA还采用了整流策略,通过适当的丢包实现“优胜劣汰”,将已经过期或有可能过期的数据包丢弃,从而降低可能的信道资源浪费,为具有更高传输成功率的数据包提供更多的传输机会。仿真结果表明,QLACSA机制在满足端到端时延需求的同时,将路径较长的业务流吞吐量提高了211%~245%左右。

参考文献

[1] Yi Sun, Yang Guo, et al. The Case for P2P Mobile Video System

- over Wireless Broadband Networks; A Practical Study of Challenges for a Mobile Video Provider [J]. IEEE Network, 2013, 27(2): 22-27
- [2] IEEE Computer Society. IEEE Standard for Information technology Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks Specific requirements-Part 11; Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications A-Amendments 8; Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements [S]. New York: IEEE, 2005
- [3] Chunyu H, Jennifer H. A Novel Approach to Contention Control in IEEE 802. 11e-Operated WLANs [C]// The 26th IEEE Int Conf on Computer Communications (INFOCOM). 2007: 1190-1198
- [4] Ge Ye, Hou J, Choi S. An analytic study of tuning systems parameters in IEEE 802. 11e enhanced distributed channel access [J]. Computer Networks, 2007, 51(8): 1955-1980
- [5] Min Ge-yong, Hu Jia, Jia Wei-jia, et al. Performance Analysis of the TXOP Scheme in IEEE 802. 11e WLANs with Bursty Error Channels [C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conf (WCNC). 2009: 1-6
- [6] Nuno F, Sugiyama T, Morikura M. QoS control scheme that uses back pressure traffic control for Wireless LANs [C]// IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). 2012: 1442-1447
- [7] Yao Xin-wei, Wang Wan-liang, et al. A Novel Hybrid Slot Allocation Mechanism for 802. 11e EDCA Protocol [J]. Information Processing Letters, 2014, 114(1/2): 25-30
- [8] Kim S, Lee H-Y. Cooperative Communication Protocol Based on EDCA in IEEE 802. 11e WLANs [M]// Computer Science and its Applications. 2015: 771-776
- [9] Yong L J, Jun L S, Keun J J, et al. A QoS Tracking Algorithm for Multimedia Requirements over IEEE 802. 11e Multihop Networks [C]// IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). 2010: 2455-2459
- [10] Igartua M A, Frias V C, Llopis Luis J C, et al. Dynamic framework with adaptive contention window and multipath routing for video-streaming services over mobile ad hoc networks [J]. Telecommunication Systems, 2010, 49(4): 379-390
- [11] Chakraborty S, Swain P, Nandi S. Proportional fairness in MAC layer channel access of IEEE 802. 11s EDCA based wireless mesh networks [J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(1): 570-584
- [12] Li Jian, Li Zhi, Prasanth M. Adaptive Per Hop Differentiation for End-to-End Delay Assurance in Multihop Wireless Networks [J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(6): 1169-1182
- [13] Min-Soo K, Shrestha D M, Young-Bae K. EDCA-TM: IEEE 802. 11e MAC Enhancement for Wireless Multi-hop Networks [C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conf (WCNC). 2009: 1-6
- [14] Lee S-H, Yoo C. Hop-Based Priority Technique Using 802. 11e for Multimedia Streaming [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2010, 56(1): 48-53

(上接第 74 页)

两次提升小波变换的低频系数。由于图像中低频反映的是图像轮廓信息,经上述处理后的图像包含了图像大部分信息并把每张图像维数降至 4800。从表 3 中发现,与几种聚类方法相比,基于时间特性的子空间聚类方法 (OFSC) 表现出良好的鲁棒性,特别是视频质量下降越明显时,所提算法效果越突出。

结束语 本文提出了一种基于时间特性的子空间聚类方法,并利用噪声大小来动态设置惩罚因子。所提方法在合成谱数据、人脸聚类和视频场景分类中均有较好表现。在算法中主要考虑相邻样本间的连续特征,而根据样本内部数据间的特征进行自适应子空间聚类,则是下一步要考虑的工作。

参 考 文 献

- [1] Tierney S, Gao J B, Guo Y. Subspace clustering for sequential data [C]// 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2014: 1019-1026
- [2] Vidal R. A tutorial on subspace clustering [J]. Signal Processing Magazine, IEEE, 2011, 28(2): 52-68
- [3] Elhamifar E, Vidal R. Sparse subspace clustering: algorithm, theory, and applications [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE TR, 2013, 35(11): 2765-2781
- [4] Feng Jia-shi, Lin Zhou-chen, Xu Huan. Robust Subspace Segmentation with Block-diagonal Prior [C]// Computer Vision and Pattern Recognition. 2014
- [5] Bako L. Subspace clustering through parametric representation and sparse optimization [J]. Signal Processing Letters, IEEE, 2014, 21(3): 356-360
- [6] Guo Y, Gao J, Li F. Spatial subspace clustering for hyperspectral data segmentation [C]// Conference of The Society of Digital Information and Wireless Communications. 2013
- [7] Chen Li-fei, Guo Gong-de, Jiang Qing-shan. Adaptive Algorithm for Soft Subspace Clustering [J]. Journal of Software, 2010, 21(10): 2513-2522 (in Chinese)
- 陈黎飞,郭躬德,姜青山. 自适应的软子空间聚类算法 [J]. 软件学报, 2010, 21(10): 2513-2522
- [8] Liu G, Lin Z, Yu Y. Robust subspace segmentation by low-rank representation by low-rank representation [C]// International Conference on Machine Learning. 2010: 663-670
- [9] Liu J, Chen Y, Zhang Y, et al. Enhancing Low-Rank subspace clustering by manifold regularization [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(9): 4022-4030
- [10] Sweldens W. The lifting scheme: a construction of second Generation of wavelets [J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 1998, 29(2): 511-546
- [11] Shi J, Malik J. Normalized cuts and image segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(8): 888-905
- [12] Boyd S, Parikh N, Chu E, et al. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers [J]. Foundations and Trends in Machine Learning, 2010, 3(1): 1-122
- [13] Georgiades, Athinodoros S, Belhumeur, et al. From few to many: Illumination cone models for face recognition under variable lighting and pose [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(6): 643-660