

适合 GEO 卫星网络的分层组播拥塞控制算法^{*})

刘功亮 顾学迈 郭庆

(哈尔滨工业大学通信技术研究所 哈尔滨 150001)

摘要 针对 GEO 卫星网络高误码率、长延时的特点,提出了一种适合 GEO 卫星分层组播的拥塞控制算法,SLMCC。采用系统瓶颈处的队列信息作为调整层的依据,能够及时对网络状况做出反应,解决了卫星网络长延时特性带来的 IGMP 离开延时大的问题。通过周期性的比较组播数据流和 TCP 流的平均速率,动态调整组播层,满足了 TCP 友好性;针对不同分层体制的组播数据流,提出一种基于累积速率的层优先级调整策略,保证了多个不同分层体制的组播流之间的带宽公平性。另外,SLMCC 设置一个比较系数,避免了卫星 TCP 性能下降导致组播数据流吞吐量的同步下降。仿真结果证明了 SLMCC 在 GEO 卫星网络环境中的有效性。

关键词 下一代互联网,卫星网络,分层组播,拥塞控制,层优先级调整

Layered Multicast Congestion Control Algorithm for GEO Satellite Networks

LIU Gong-Liang GU Xue-Mai GUO Qing

(Communications Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract A new layered multicast congestion control algorithm SLMCC is proposed for GEO satellite networks in this paper, aiming at the network characteristics of high BER and long propagation delays. In SLMCC, the queue information at system bottlenecks is used in adjusting the multicast layers in time, which eliminates the influence of the GEO long propagation delays. The average rate of multicast flows and of TCP flows passing through the bottlenecks are measured and compared for TCP-friendliness, and a novel rate-based layer priority modification policy is designed for bandwidth fairness among heterogeneous multicast sessions. In order to avoid the unnecessary decrease of multicast rate along with the bad-performance TCP flows in high BER satellite channels, a comparison coefficient α is adopted in SLMCC. Simulation results show that SLMCC significantly improves the performance of layered multicast in GEO satellite environments.

Keywords Next generation Internet, Satellite networks, Layered multicast, Congestion control, Layer priority modification

IP 组播技术具有网络利用率高、带宽开销小、可扩展性强等优点,近年来在大量新型的网络应用中发挥了重要的作用,如视频会议、远程教育、文件分发、实时信息发布、交互式游戏等等。然而,对于多媒体组播传输来说,网络异构性严重影响了系统的性能。分层组播^[1]正是针对这一问题而提出的。分层组播方案将多媒体数据分割成多个层次并发送到不同的接收者。由于充分考虑网络和接收者的异构性,提高了网络带宽的利用率,分层组播协议越来越受重视。

随着全球网络化、信息化需求的不断发展,地面通信网络已不能满足人们日益增长的多媒体通信需求,卫星网络由于具有覆盖范围广、网络配置灵活、可扩展性强等优点,将成为下一代互联网的重要组成部分,尤其在地面网络没有覆盖的稀路地区,卫星通信可以大大延伸下一代互联网的触角。而 GEO 卫星网络的大范围广播特性,使得卫星网络在下一代互联网大规模组播应用中具有得天独厚的优势。

然而,现有的分层组播协议^[1~5]主要是针对地面有线网络设计的,如果应用到卫星网络环境中就会带来一些新的问题。传统分层组播方案采取端到端的拥塞控制,把每一个组播层放在一个组播组中进行传输,增加或者丢弃一个层相当

于成员加入或离开一个组播组,卫星信道的长延时特性会显著增加 IGMP 离开延时^[6],因此不能对网络拥塞做出及时的响应;而且,接收端驱动的拥塞控制方式会引起组成员频繁的加入和离开组,造成组播数据流的不稳定。另外,卫星信道的高误码率会引起组播数据包的非拥塞丢失,基于丢包信息的分层组播拥塞控制协议将导致不必要的速率降低。

本文提出了一种新的适合卫星环境的分层组播拥塞控制算法 SLMCC,采用系统瓶颈处的缓冲区队列信息而不是接收者处的丢包信息作为调整层的依据,避免了因把链路差错引起的丢包作为拥塞的信号而错误的降低吞吐量。通过在瓶颈处直接对组播层进行阻塞/释放操作,避免了长延时卫星网络中 IGMP 离开延时的影响。SLMCC 引入了比较系数 α ,解决了卫星网络高误码率情况下 TCP 吞吐量下降引起组播吞吐量同步下降的问题。针对网络中存在不同分层体制组播流的情况,采用基于速率的层优先级调整策略,解决了不同组播数据流之间的带宽公平性,满足异构网络的要求。

文章首先给出了卫星组播系统结构,第 2 部分详细描述了 SLMCC 算法,第 3 部分通过仿真验证了算法的性能,最后总结全文。

^{*})基金项目:国家自然科学基金(60532030);国家发改委 CNGI 大规模路由和组播技术的研究与试验项目(CNGI-04-13-2T)。刘功亮 博士研究生;顾学迈 教授,博士生导师;郭庆 教授,博士生导师。

1 卫星组播系统结构

本文考虑的 GEO 卫星组播系统结构如图 1 所示。地面有线网络中的组播源(Sender)经过一个卫星网关(Gateway)向卫星发送数据,并通过星上交换,将数据组播到各个接收者(Receiver)。同时,卫星网络中还存在 TCP 数据流。为了简化问题,不考虑星上排队和处理。设卫星上行信道为 2Mbps,而地面链路带宽为 10Mbps,因此系统瓶颈在上行卫星网关,这种情形也与实际情况相符。

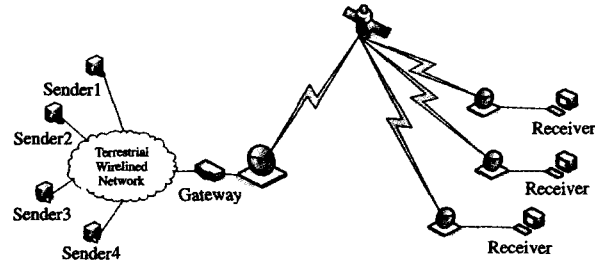


图 1 卫星组播系统结构示意图

2 SLMCC 算法描述

2.1 SLMCC 基本的组播层调整策略

SLMCC 的基本思想是在系统瓶颈处采用输出队列信息作为调整组播层的依据。根据网关输出队列的归一化长度 Q ,定义三个拥塞控制阶段:如果 $Q \leq th_1$,为启动阶段;如果 $th_1 < Q < th_2$,为稳定增加阶段;如果 $Q \geq th_2$,为拥塞规避阶段。在不同的拥塞控制阶段采取相应的组播层调整策略。SLMCC 的状态转移图如图 2 所示。

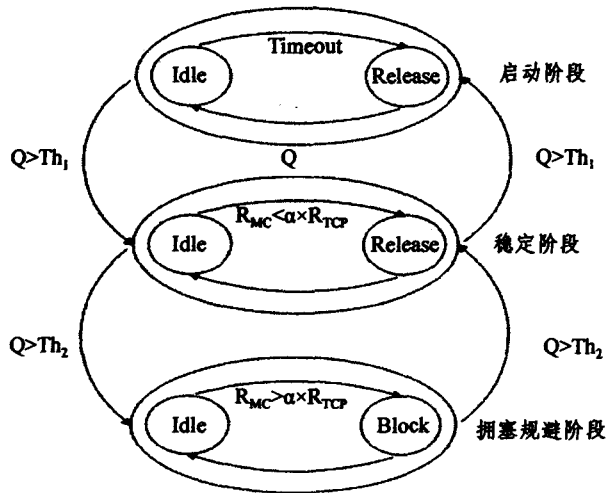


图 2 SLMCC 算法状态转移图

在启动阶段,设置一个定时器 $timer_1$,如果 $timer_1$ 超时,则释放一个组播层;在稳定增加阶段,周期性的计算并比较组播流平均速率 R_{MC} 和 TCP 流平均速率 R_{TCP} ,如果 $R_{MC} < R_{TCP}$,并且这种关系保持一段时间 T ,则释放一个组播层,否则,不进行组播速率调整;在拥塞规避阶段,周期性的计算并比较组播流平均速率 R_{MC} 和 TCP 流平均速率 R_{TCP} ,如果 $R_{MC} > R_{TCP}$,并保持一段时间 T ,则阻塞一个组播层,否则,不进行组播速率调整。

所谓阻塞组播层,就是通过修改瓶颈处的路由表,阻止一个组播层通过瓶颈;反之,释放组播层,就是通过修改瓶颈处

的路由表,允许一个被阻塞的组播层通过瓶颈。阻塞/释放组播层,不同于传统的分层组播拥塞控制策略中增加/丢弃组播层的操作,不需要组播源和接收端的驱动和应答,而是在拥塞发生处直接进行层调整,能够迅速对网络拥塞做出响应,避免了卫星信道长延时的影响。

计算 R_{MC} 和 R_{TCP} 的具体方法是:监测一段时间 T_0 内通过地面网关的组播会话数量 N_{MC} ,组播数据包的数量 M_{MC} ,以及 TCP 连接数 N_{TCP} ,TCP 数据包的数量 M_{TCP} ,为了方便比较,假定组播数据包和 TCP 数据包的大小相同。则组播流的平均速率和 TCP 流的平均速率分别为(单位为 $packets/s$):

$$R_{MC} = M_{MC} / (N_{MC} \times T_0)$$
 (1)

$$R_{TCP} = M_{TCP} / (N_{TCP} \times T_0)$$
 (2)

2.2 基于累积速率的组播层优先级调整策略

由分层编码机制可知,在一个组播会话中,从基本层到最高增强层,各层的数据重要性逐层降低,因而从低层到高层优先级也依次降低。在进行层调整的时候要按照一定的优先级对属于不同组播流的层进行操作。也就是说,在进行阻塞组播层操作时,首先阻塞低优先级的层;而在释放组播层时,首先释放高优先级的层。

对于分层体制不同的多个组播流(也称为异构组播流),SLMCC 采用一种基于累积速率的层优先级调整策略来保证各组播流之间的带宽公平性:

(1)首先保证所有组播会话基本层的传输。不同组播会话的基本层之间,低速率的基本层拥有更高的优先级。

(2)在所有增强层中,根据累积速率(注:确切的说是从基本层到该层的累积速率,这里为了表述简便,直接称为该层的累积速率,下同)的高低设置优先级,累积速率较低的层拥有较高的优先级;对于不同组播会话中累积速率相同的层,根据其在各自组播会话中的层标记设置优先级,层标记较小的层拥有较高的优先级。

例如,有两个组播会话 multicast1 和 multicast2 经过同一瓶颈,multicast1 有 1 个基本层和 3 个增强层,基本层到增强层的累积速率分别为 200kbps,400kbps,800kbps,1600 kbps,3200 kbps;multicast2 有 1 个基本层和 4 个增强层,基本层到增强层的累积速率分别为 50 kbps,100 kbps,200 kbps,400kbps,800kbps。按照上述方法调整后的优先级如表 1。这样,不同组播会话的累积速率会保持相近,可以保证组播流之间的带宽公平性。

表 1 不同分层方式的组播会话通过瓶颈链路时的层优先级

会话编号	层标记	原优先级标记	累积速率(kbps)	调整后的优先级
multicast1	0	4	200	7
	1	3	400	5
	2	2	800	3
	3	1	1600	1
	4	0	3200	0
multicast2	0	4	50	9
	1	3	100	7
	2	2	200	6
	3	1	400	4
	4	0	800	2

2.3 比较系数的引入

卫星网络特点带来的另外一个特殊问题是,在信道误码率比较高的时候,TCP 会不必要地减小拥塞窗口,从而降低

TCP 速率。如果在卫星分层组播拥塞控制中仍然采取基本的组播层调整策略,就会引起组播速率不必要的降低,造成信道浪费。解决此问题的方法是在 TCP 速率前增加一个比较系数 α ,即根据 R_{MC} 与 $\alpha \times R_{TCP}$ 的关系来作为层调整的依据。在误码率低的信道条件下,取 α 为 1;但是在高误码率环境中可以通过适当增大 α 来提高组播速率,从而避免高信道误码率造成组播速率随 TCP 速率的同步下降。但是,增大比较系数 α 带来的一个问题是,会造成带宽公平性的下降。在后面的仿真中,分析了 α 对系统性能的影响。在选择 α 时,应该综合考虑信道利用率和带宽公平性的折衷。

3 仿真结果和分析

为了评价 SLMCC 在卫星环境中的有效性,我们按照图 1 所示的拓扑结构建立仿真模型。sender1 和 sender2 为分层组播信源,分别发送组播流 multicast1 和 multicast2,分层结构如表 1 所示;sender3 和 sender4 为 TCP 信源。队列状态门限值取 $th_1=0.2, th_2=0.9$,层调整前的等待时间 $T=2RTT$,TCP 和 multicast 数据包尺寸都取 536bytes。

3.1 吞吐量性能

在误码率为 10^{-6} 的信道条件下,组播流(multicast1 和 multicast2)和 TCP 流(TCP1 和 TCP2)的吞吐量性能曲线如图 3 所示。仿真初始时刻,只有组播流 multicast1 经过网关; $t=100s, 200s$ 和 $300s$ 时,分别有组播流 multicast2,单播 TCP1 和 TCP2 加入;TCP1 和 TCP2 分别于 $t=400s$ 和 $500s$ 时停止。从图 3 中可以看出,由于 SLMCC 直接在系统瓶颈处根据监测的信息做出层调整,故能对网络状况做出迅速的响应,避免了卫星信道长延时和频繁的增加/丢弃层引起的组播流量的剧烈波动,组播流量满足 TCP 友好性和速率的平滑性。

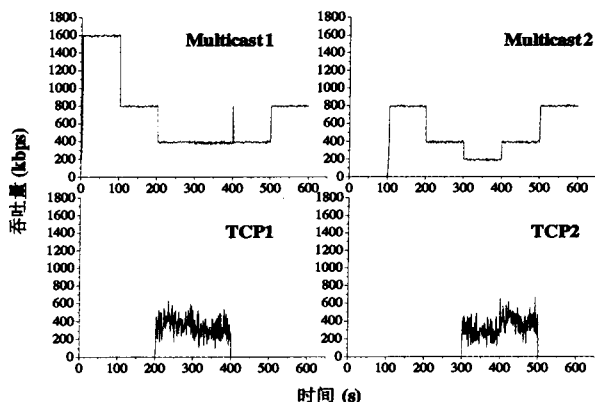


图 3 分层组播流与 TCP 流的吞吐量性能

3.2 比较系数 α 的影响

为了验证算法在高误码率环境中的有效性以及比较系数 α 的作用,我们考虑如下的仿真场景:仿真初始时刻,只有 TCP1 经过网关; $t=100s$ 时,组播流 multicast1 开始发送流量,并设置 $\alpha=1.0$ 。于 $t=300s, 400s, 500s$ 时,分别将 α 调整为 1.5, 2.0, 2.5。在信道误码率为 10^{-5} 时,得到的吞吐量性能曲线如图 4 所示;图 5 反映了比较系数 α 对带宽公平性的影响。带宽公平性用公平性指数(Fairness Index, FI)^[7]来表示:

$$FI = \frac{(\sum_{i=1}^N T_i)^2}{N \cdot \sum_{i=1}^N T_i^2} \quad (3)$$

上式中, N 表示通过瓶颈链路的数据流的数量, T_i 表示其中第 i 个数据流的吞吐量。

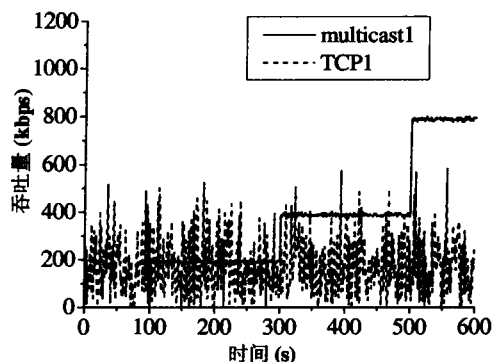


图 4 比较系数对吞吐量的影响

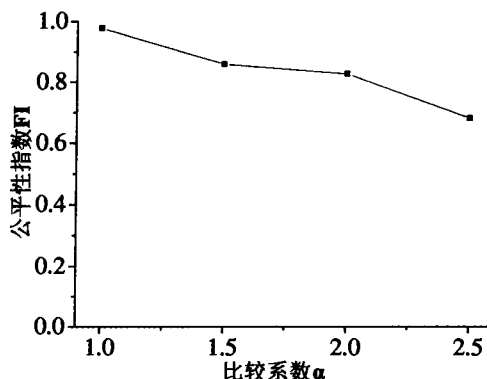


图 5 比较系数对带宽公平性的影响

从图 4 中可以看出,在 100s 到 300s 之间, $\alpha=1$,组播速率会因为卫星环境中 TCP 性能的下降而处于较低的水平,造成信道利用率的严重浪费。在 300s 到 600s 之间,随着 α 的增加,组播会话的速率得以提高。尽管这样会引起公平性的一定程度下降,如图 5 所示,但是这种调整对于解决高误码率卫星环境中低效的 TCP 流对系统吞吐性能的制约是有积极意义的。而且组播会话的吞吐性能会影响一大批接收者,所以让组播速率适当的高于 TCP 速率也是合理的。在实际应用时,需要考虑信道利用率和带宽公平性的折衷。

3.3 优先级调整策略对异构组播流带宽公平性的影响

图 6(a)给出了在 3.1 节所述的仿真场景下,采用本文提出的基于累积速率的层优先级调整策略时,得到的异构组播流 multicast1 和 multicast2 的吞吐量曲线;图 6(b)给出了同样的场景下,不进行层优先级调整,而是直接根据每个组播会话中各层的原优先级标记作为层调整(阻塞/释放组播层)的顺序时,得到的异构组播流 multicast1 和 multicast2 的吞吐量曲线。

从图 6(a)可以看出,由于 SLMCC 中采用的基于累积速率的层优先级调整策略是以不同组播会话拥有相近的速率作为调整层的目标,而不是简单的追求各组播会话层数相等,因此对于异构分层组播会话来说,采用本方案可以取得较好的组播流量间的公平性。

如果不进行层优先级调整,那么在进行阻塞组播层的操作时,首先阻塞拥有层数最多的组播会话的最高层;而在释放组播层时,首先释放拥有层数最少的组播会话的最低层。这样可以简单的实现各组播会话的层数相等,对于相同编码规则的组播流,是一种简单有效的实现组播流之间带宽公平性的方法,但是对于异构组播流来说,显然会引起组播流之间的

带宽不公平,图 6(b)清楚的显示了 multicast1 和 multicast2 之间的带宽不公平性。

结束语 本文在分析 GEO 卫星网络特点及其对分层组播影响的基础上,提出了一种适合 GEO 卫星分层组播的拥塞控制算法,SLMCC。该算法直接在系统瓶颈处根据队列信息对组播层做出调整,避免了卫星长延时带来的性能下降;通过实时比较组播数据流和 TCP 单播数据流的平均速率并动

态进行调整,解决了 TCP 友好性问题。为了解决不同分层体制的组播会话之间的带宽公平性,SLMCC 采用了一种基于速率的层优先级调整策略。在信道误码率较高的情况下,SLMCC 通过设置比较系数 α ,避免了卫星 TCP 性能下降带来组播数据流吞吐量的同步下降。如何根据带宽公平性和信道利用率的综合指标来确定最优的比较系数,是下一步的重点研究工作。

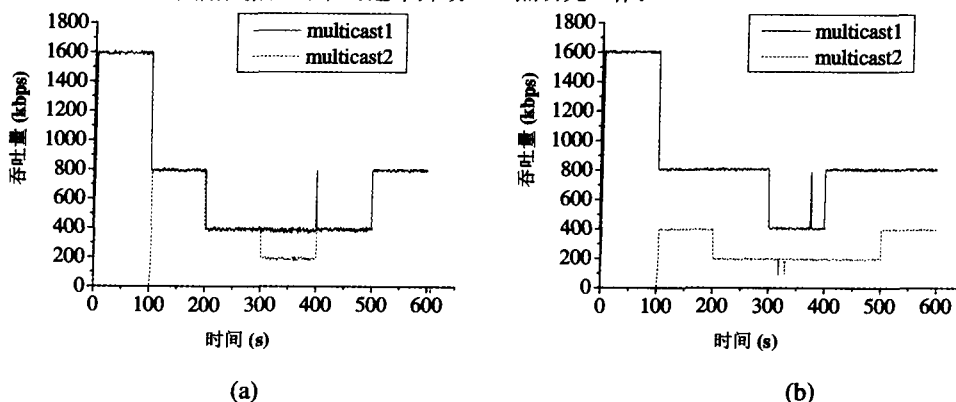


图 6 采用和不采用本文提出的基于累积速率的层优先级调整策略时,异构组播流带宽公平性的比较

参考文献

- McCanne S, Jacobson V, Vetterli M. Receiver-driven layered multicast[A]. In: Proc. of ACM SIGCOMM 1996[C], New York, 1996
- Vicisano L, Rizzo L, Crowcroft J. TCP-like congestion control for layered multicast data transfer[A]. In: Proc. of IEEE INFOCOM 1998[C], New York, 1998
- Byers J, Frumin M, et al. FLID-DL: Congestion control for layered multicast[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(8): 1558~1570
- Byers J, Kwon G, et al. Fine-grained layered multicast with STAIR[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2006, 14(1): 81~93
- Legout A, Biersack E W. PLM: fast convergence for cumulative layered multicast transmission schemes[A]. In: Proc. of ACM SIGMETRICS[C], Santa Clara, CA, 2000
- IETF RFC 2236. Internet group management protocol, Version 2[S]
- Rhee I, Balaguru N, Rouskas G. MTCP: Scalable TCP-like congestion control for reliable multicast[J]. Computer Networks, 2002, 38(5): 553~575
- Ye F, Zhong G, Cheng J, et al. PEAS: A Robust, Energy Conserving Protocol for Long-lived Sensor Networks. In: Proc of the Twenty Third International Conference on Distributed Computing Systems, 2003
- Wang X, Xing G, Zhang Y. Integrated Coverage and Connectivity Configuration in Wireless Sensor Networks. In: Proc of the First International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Los Angeles, California, USA, 2003
- Tian D, Georganas N D. A node scheduling scheme for energy conservation in large wireless sensor networks. Wireless Communications and Mobile Computing, 2003, 3(2): 271~290
- Pack S, Choi J, Kwon Taekyoung, et al. Application Aware Data Aggregation in Wireless Sensor Networks. In: Proc IEEE International Workshop on Adaptive Wireless Networks (AWiN), November 2005
- He T, Blum B M, Stankovic J A, et al. Aida: Adaptive application independent data aggregation in wireless sensor networks. In: ACM Transactions on Embedded Computing System, 2003
- Chen M, Fowler M L. Data compression trade-offs for multiple inferences in sensor networks. In: CD-ROM Proceedings of the Conference on Information Sciences and Systems, Princeton University, March, 2004
- Song Lin, Gunopulos D, Kalogeraki V, et al. A data compression technique for sensor networks with dynamic bandwidth allocation. In: Temporal Representation and Reasoning, TIME 2005, 12th International Symposium, June 2005. 186~188
- Ratnasamy S, Karp B, Yin L, et al. Ght: A geographic hash table for data-centric storage. In: First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA), 2002
- Ratnasamy S, Estrin D, Govindan R, et al. Data-centric storage in sensornets. In: First Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets-I), 2002
- 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络. 北京:清华大学出版社, 2005
- Akkaya K, Younis M. A Survey of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks. the Elsevier Ad Hoc Network, Journal, 2005, 3(3): 325~349
- Wang Chonggang, et al. A Survey of Transport Protocols for Wireless Sensor Networks. IEEE Network, May 2006

(上接第 37 页)

角度去深入研究和积极探索。未来的传感器网络管理可能会在以下两方面有所突破:一方面,随着 Web 技术的逐步成熟,网络管理可以借助 Web 进行,这样可以突破传感器网络和管理者之间的地理限制,实现无处不在的管理。另一方面,现有的网络管理大多面向网络设备和对象,容易导致管理和业务的脱节:一旦网络出现问题,业务的使用者只看到服务中断、业务混乱,网络管理者只看到节点或服务事件,却不能及时、准确地判断哪些业务受到影响。这些都会直接影响网络提供的业务质量。传感器网络想要得到大规模的应用,在管理技术上必须采取面向业务的管理方法。

参考文献

- He Y, Raghavendra C S, Berson S, et al. A Programmable Routing Framework for Autonomic Sensor Networks. In: Proc The Autonomic Computing, Workshop IEEE AMS '03, 2003
- Hsin, Liu Mingyan. A Distributed Monitoring Mechanism for Wireless Sensor Networks. In: Proc of 2002 ACM Workshop on Wireless Security (WiSe'02), September, 2002
- Perrig A, Szewczyk R, Wen V, et al. SPINS: security protocols for sensor networks. In: Proc of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking, July 2001. 189~199
- Zhu S, Setia S, Jajodia S. LEAP: Efficient Security Mechanisms for Large-Scale Distributed Sensor Networks. In: Proc of the 10th ACM Conference on Computer and Communication Security, Washington DC, USA, 2003. 62~72
- Zhao J, Govindan R, Estrin D. Residual energy scans for monitoring wireless sensor networks. In: IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'02), vol. 1. Orange County Convention Center, Orlando, FL, USA, March, 2002. 356~362