

WDM 网状网络中静态流量疏导的收发器节约辅助图模型^{*}

姚华雄¹ 杨宗凯¹ 欧亮¹ 谭贤四²

(华中科技大学电信系 武汉 430074)¹ (空军雷达学院 武汉 430019)²

摘要 对于 WDM 光网络中的静态流量疏导,提出了一种收发器节约的辅助图模型(TSAG)。基于辅助图提出了一种收发器节约的方法(TSABAG),针对不同的流量可以给辅助图中不同的边分配不同的权值,以实现不同的疏导策略。仿真试验证明,TSAG 模型极大地节约了占用的收发器资源,而且拥有较高的吞吐量。

关键词 流量疏导,辅助图,收发器节约,波分复用

A Transceiver Saving Auxiliary Graph Model for Static Traffic Grooming in WDM Mesh Networks

YAO Hua-Xiong¹ YANG Zong-Kai¹ OU Liang¹ TAN Xian-Si²

(Dept. Electronic and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)¹

(Air Force of Radar Academy, Wuhan 430019)²

Abstract To solve traffic grooming problem, we propose a transceiver saving auxiliary graph model for WDM mesh networks. By changing the weight of different edges in the auxiliary graph, various grooming policies can be implemented with the transceivers, wavelengths and grooming capabilities as constraints. Based on our proposed auxiliary graph, we propose a transceiver saving method, which can greatly reduce the number of transceivers utilized. This is validated by our numerical simulation results, which also shows that traffic selection schemes using our graph model have higher throughput compared to those in other auxiliary graph model.

Keywords Traffic grooming, Auxiliary graph, Transceiver saving, Wavelength-division multiplexing(WDM)

1 引言

波分复用(WDM)是光网络中增加带宽容量的关键技术。当前每个波长信道的传输容量已经达到 10Gb/s (OC-192),将来还会增长到 40Gb/s (OC-768)^[1]。但是多数客户只需要使用较低的带宽就足够了,比如,155Mb/s(OC-3), 622Mb/s (OC-12)或者 2.5Gb/s(OC-48)。如果将一个波长信道的整个带宽都分配给一个低速的连接,那么将会浪费大部分的传输容量。为了有效地使用网络资源,需要利用流量疏导(traffic grooming)技术将低速的流量有效聚合到高速的光路。

在波长路由网络中,所有的光纤链路由光交叉连接器(OXC)连接起来,它们构成了光网络的物理拓扑。光路是通过多条物理链路的一个波长路径,并且在路径的每个链路上占用一个波长。所有的光路都是由物理拓扑的光纤链路组成,它们构成了光网络的虚拟拓扑,而连接请求都是在虚拟拓扑上转发,因此 WDM 网络中的流量疏导问题就是一个基于物理拓扑和虚拟拓扑的两层路由问题。

在小型网络和静态模式下,流量疏导问题可以公式化为一个整线性设计(ILP)问题^[2]。但是在大型网状网络和动态流量下,这就是一个 NP 复杂问题^[3]。因此建立图模型对问题的分析很有帮助。文[1]提出一种新颖的通用图模型来描述网络状态,使用不同的边来表示不同的资源限制,比如收发器,波长和波长转换能力。通过改变这些边的权值可以获得不同的疏导策略。文[1]主要是用于静态流量疏导,文[4]将相同的图模型用于动态流量疏导。文[5]和文[6]提出了一个更复杂的图模型用于多带宽程度 WDM 网络中不同疏导能力的 OXC 节点和光路。文[7]提出了一种链路捆绑的辅助图

模型,用于波长转换能力受限的动态流量疏导。

文[1]和文[4]将物理网络中的一个节点看作辅助图中的 $4+2W$ 个节点,文[8]和文[9]看作是 $6+2W$ 个节点,其中 W 表示一个光纤链路中波长的个数。这将会使计算复杂度随着波长个数线性增长。文[7]的辅助图将物理网络中的一个节点看作 2 个节点,它简化了计算复杂度,但是它假设所有的流量都必须占用收发器端口,这造成了一部分收发器资源的浪费。本文在静态流量环境下,综合考虑复杂度和资源优化的问题,提出了一种收发器节约的辅助图(TSAG)模型,并介绍了一种基于辅助图的收发器节约算法 TSABAG,对于不需要疏导的流量请求使它不占用收发器端口,从而可以节约使用的收发器资源,提高资源利用率,增加网络吞吐量。

2 疏导结构

OXC 节点的收发器的个数表示了它的疏导能力,一个收发器形成一个疏导端口,收发器由一个发送器和一个接收器组成,发送器负责将多个低速的流量聚合到同一条光路上,接收器负责解析出光路上的低速流量。对于一条有疏导能力的光路,在光路的源端有一个发送器,目的端有一个接收器,这样才能在一条光路上传送多个流量。

图 1 描述了多跳疏导 OXC 节点的疏导结构,一个 OXC 节点由波长交换单元和疏导单元两部分组成。从其他节点进入的流量($\lambda_1 \dots \lambda_n$)经过波长交换单元转发到其他节点。本地流量可以通过本地插入口或疏导插入口添加到波长交换单元。同理,要从波长交换单元分出流量也有两种方式:通过本地分出口或疏导分出口。疏导单元包含有发送部分和接收部分,疏导插入和疏导分出都必须先经过疏导单元。

^{*} 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60572049)。姚华雄 博士生,主要研究方向为 WDM 光网络中的流量疏导;杨宗凯 教授,主要研究方向为现代通信理论;欧亮 博士生,主要研究方向为光突发交换网络;谭贤西 副教授,主要研究方向为宽带通信网。

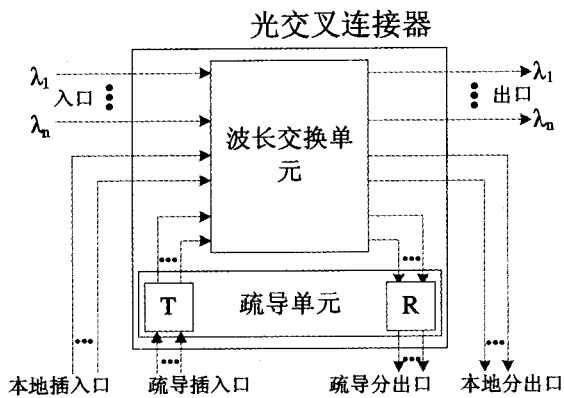


图1 多跳 OXC 节点的疏导结构

文[7]的作者提出一种通用图模型应用于动态流量疏导,这个模型假设所有的流量都是通过疏导插入口和疏导分出口进入 OXC 节点的,所有的流量都必须经过疏导单元到达波长交换单元。基于这样的假设,一旦节点的疏导口全都用完了,即使还有空闲的波长信道,所有后来的流量也会全都被阻塞,这不利于资源的充分利用。

实际上,流量也可以不用通过疏导单元,经过本地插入口和本地分出口直接进入波长交换单元。这样可以控制流量是经过本地口还是经过疏导口,从而可以节约一部分收发器资源,而且当节点没有可用的疏导口时,流量也可以直接进入波长交换单元利用空闲的波长信道,而不会阻塞也不用绕道选用其他路由。

3 收发器节约辅助图(TSAG)模型

基于第2节提出的 OXC 节点的疏导结构,我们提出了一种收发器节约辅助图(TSAG)模型,用于分析 WDM 网络中的流量疏导问题。对于一个物理网络,TSAG 将它分成一个两层的图,每层包括2个节点,这两层分别叫波长层和光路层。物理网络中的每个节点对应于辅助图中两个节点,位于波长层的叫物理节点,位于光路层的叫虚拟节点。

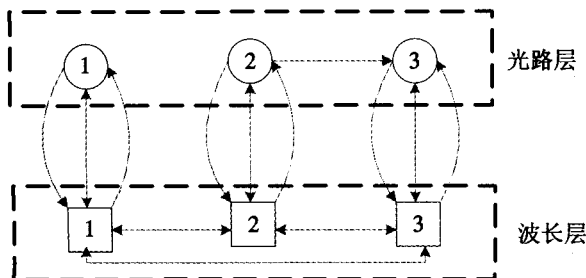


图2 三点网络的 TSAG 模型

波长层内部的几条边代表的是物理拓扑中的波长链路,光路层内部的几条边代表的是虚拟拓扑中建立的光路。波长层和光路层之间的单向边代表节点中的收发器资源,双向边代表的是节点的复用资源,它表示流量可以直接进入(流出)波长交换单元而不占用收发器资源。图2表示了一个3点简单网络的 TSAG 模型的例子。

TSAG 模型有5种不同类型的边:

1)波长边(E_w):物理拓扑中节点 u 到节点 v 的链路如果存在可用的波长,在辅助图的波长层有一条从节点 u 到节点 v 的波长边。在运行的时候,如果一条链路中的波长全部用完,对应的波长边就要从辅助图中去掉,或者将它的权值设为无限大。

2)光路边(E_l):对于虚拟拓扑中从节点 u 到节点 v 的每条光路,辅助图的光路层就有一条从节点 u 到节点 v 的光路边。对于一个具体的连接请求,如果光路的可用带宽小于连接的带宽需求,这条光路边就要暂时去掉,或者将它的权值设为无限大。

3)发送边(E_s):发送边表示网络的发送器资源,如果节点 u 有可用的发送器,辅助图中就有一条发送边从虚拟节点 u 指向物理节点 u 。如果节点 u 的发送器全部用完,该节点 u 的发送边就要从辅助图中去掉,或者将它的权值设为无限大。

4)接收边(E_r):与发送边类似,接收边表示网络的接收器资源,如果节点 u 有可用的接收器,辅助图中就有一条接收边从物理节点 u 指向虚拟节点 u 。如果节点 u 的接收器全部用完,该节点 u 的接收边就要从辅助图中去掉,或者将它的权值设为无限大。

5)复用边(E_m):复用边是连接光路层和波长层的双向边,而发送边和接收边都是单向边。当节点没有多余的疏导口或者疏导策略使疏导口不可用的时候,如果波长层还有空闲的波长链路,流量就会通过复用边在光路层和波长层之间传输。复用边不占用任何网络资源,但是当节点使用复用边时,该节点就不具有疏导能力。

图3表示了用 TSAG 来描述从节点1到节点3的一条路径。如果一个连接转发到这条路径,先要建立一条从节点1到节点2的光路,然后再转发这个连接到虚拟拓扑中的两跳路径。从图3可以看出,TSAG 中的一条有效路径总是开始和结束在光路层。一旦路径通过发送边或复用边进入波长层,就意味着会建立一条新的光路,然后路径就会通过接收边或复用边重新进入光路层。一条路径可能存在多条子路径交替在波长层和光路层,因此一条路径也可能需要建立多条新光路。

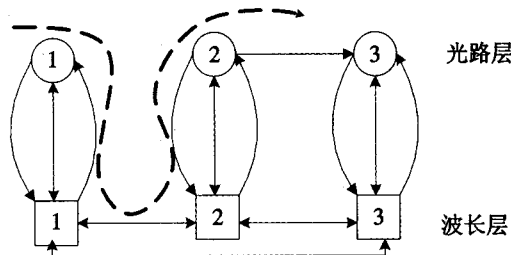


图3 TSAG 模型中的多跳路径

4 基于辅助图的收发器节约算法(TSABAG)

基于 TSAG 模型,我们提出了 TSABAG 算法用于解决静态流量的疏导问题,静态流量的特点是所有流量都是提前知道的,并且一旦建立连接就始终占用。在使用该算法之前要对网络进行初始化配置,包括网络拓扑、节点和链路的配置,使用上节所讨论的方法构建对应的辅助图 G 。路径可以通过发送边和接收边在波长层和光路层交替,也可以通过复用边,路径将自动选择权值较小的边。

TSABAG 算法的输入是一个流量请求,用 $T(s, d, b, m)$ 来表示,其中 s 和 d 分别表示流量的源节点和目的节点, b 表示流量需要的带宽, m 表示流量的连接个数。用 t_i 表示节点 i 的发送器个数, r_i 表示节点 i 的接收器个数, w_{ij} 表示节点 i 到节点 j 的链路中的波长数, C 表示一个波长通道的容量。假设流量需要的带宽 b 小于或等于波长通道的容量 C , 否则波长通道就无法容纳这个流量请求。TSABAG 算法的描述如下:

输入:一个流量请求 $T(s,d,b,m)$ 。

步骤 1:删除空闲带宽小于 b 的波长边,因为它们容纳不了 T 。

步骤 2:根据疏导策略给五类边 (E_w, E_t, E_r, E_i, E_m) 分配权值,其中复用边的权值分配要根据流量的组成情况来判断:

1)如果流量需要的带宽等于波长容量,并且该流量只包含一个请求,即 $m=1, b=C$,那么流量 T 的路径是一个单跳光路,带宽被完全占用,不能再疏导其他流量,因此将源节点 s 和目的节点 d 的复用边分配一个很小的权值。

2)如果流量需要的带宽等于波长容量,并且该流量只包含多个请求,即 $m>1, b=C$,那么流量 T 的路径是一个单跳光路,带宽被完全占用,在目的节点不能再疏导其他流量,但在源节点需要疏导流量 T 的 m 个请求,因此将目的节点 d 上的复用边分配一个很小的权值,将源节点 s 的复用边分配一个很大的权值。

3)其他所有节点和其他情况下的复用边的权值全部设为很大的值,那么路径将自动选择权值较小的发送边和接收边,而不会通过复用边。

步骤 3:在辅助图 G 中寻找从源节点 s 的波长层到目的节点 d 的波长层的最短路径 p 。如果失败,阻塞流量 T ,恢复步骤 1 中删除的边并返回-1。

步骤 4:如果 p 包含波长边 E_w ,就有一条或多条光路需要建立。光路开始于 p 通过一条发送边 E_t ,经过后面的波长边 E_w ,终止于第一个接收边 E_r 。

步骤 5:将流量 T 转发到路径 p 中的已有光路和新建光路。

步骤 6:恢复步骤 1 中删除的边。

步骤 7:根据下面的规则来更新辅助图 G 的状态:

1)对每一条新建的光路,在辅助图 G 的光路层增加一条光路边,其空闲带宽为 $C-b$ 。对 p 经过的已有光路,更新光路的空闲带宽,将其带宽减小 b 。若光路的空闲带宽为 0,则从辅助图 G 中删除对应的光路边。

2) p 每经过一条发送边,将其对应节点的发送器个数 t_i 减 1,若 $t_i=0$ 就删除辅助图 G 中节点 i 的发送边。同样地, p 每经过一条接收边,将其对应节点的接收器个数 r_i 减 1,若 $r_i=0$ 就删除辅助图 G 中节点 i 的接收边。

3) p 每经过一条波长边,将其对应链路的波长数 w_{ij} 减 1,若 $w_{ij}=0$ 就删除辅助图 G 中对应的波长边。

TSABAG 算法可以根据当前的网络状态转发一个特定的流量请求,转发后即时更新网络状态,使得辅助图始终反映了当前的网络状态。在流量疏导问题中,我们需要使用 TSABAG 算法解决一系列的请求,对于静态流量,事先就能知道所有的流量请求,因此流量转发的顺序对于网络性能有很大的影响。如下两种流量选择策略将用于静态流量疏导^[3]:

1)单跳流量最大者优先(MST):这种策略选择节点对之间请求带宽最大的流量优先调度。

2)资源利用率最高者优先(MRU):资源利用率是指节点对之间请求的带宽与该节点对经过物理拓扑的跳数的比值。这种策略选择资源利用率最高的流量优先调度。

5 实验结果

为了评价 TSAG 模型的性能,用 NS 网络仿真器在 NSF 网络中仿真了 TSABAG 算法。如图 4,NSF 网络拓扑包括 14 个节点 21 条链路。每个链路都是双向的,每个波长的容量是 OC-48。所有的节点都有疏导能力和完全波长转换能力。

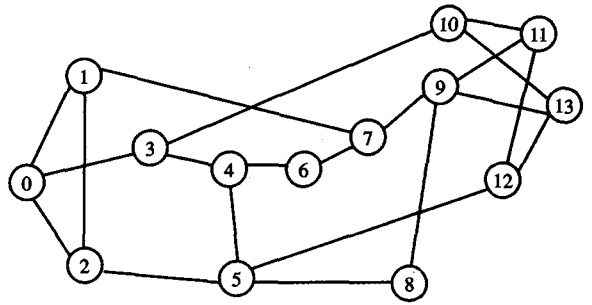


图 4 NSF 网络拓扑结构

流量矩阵是随机产生的,我们假设每一个流量可以是 OC-1, OC-3, OC-12, OC-48 中的任意一种。流量矩阵的产生方法如下:

1)每个节点对之间 OC-1 连接请求的个数满足 0 到 16 之间的均匀随机分布。

2)每个节点对之间 OC-3 连接请求的个数满足 0 到 8 之间的均匀随机分布。

3)每个节点对之间 OC-12 连接请求的个数满足 0 到 2 之间的均匀随机分布。

4)每个节点对之间 OC-48 连接请求的个数满足 0 到 1 之间的均匀随机分布。

在仿真实验中,整个网络中总共有 2457 个连接请求,流量的带宽总和是 10674 个 OC-1。实验使用了动态路由,最先匹配(First-Fit)波长分配法则,疏导策略是使收发器数目最少。

将每个节点的收发器个数和每个链路的波长数设为不同的值,对 TSAG 模型和文[7]提出的没有使用收发器节约方法的 LBAG 模型的流量选择策略进行了比较。

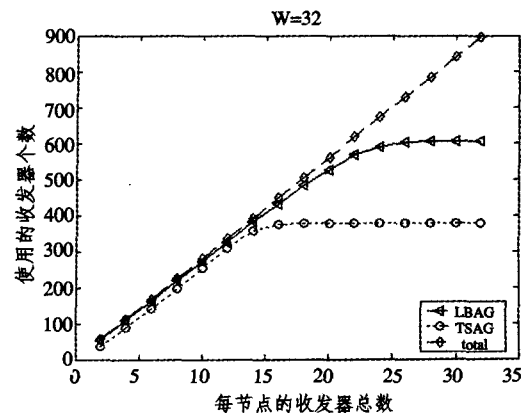


图 5 使用的总收发器数的比较, $W=32$

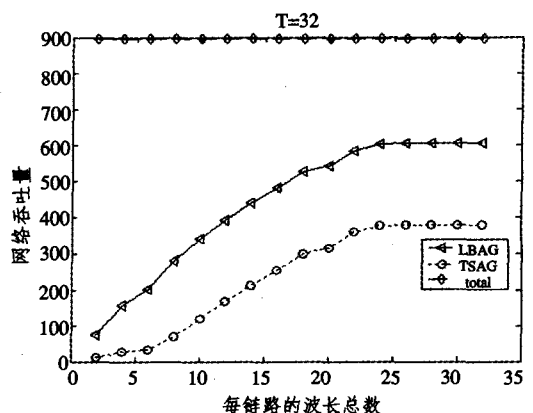


图 6 使用的总收发器数的比较, $T=32$

在非阻塞模式下,所有的连接请求都能满足,因此疏导的目标就是使网络资源耗费最小。图 5 和图 6 比较了使用的收发器个数随着节点的收发器总数和链路波长总数的变化趋势,使用的流量疏导策略是 MST。从图中的比较可以看出,在波长和收发器资源充足的情况下,TSAG 模型极大地减少了占用的收发器。

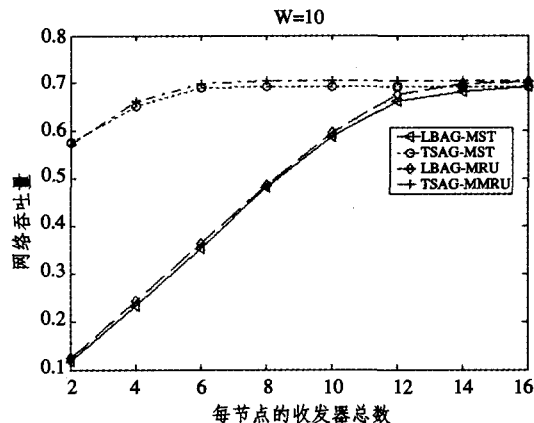


图 7 吞吐量比较, W=10

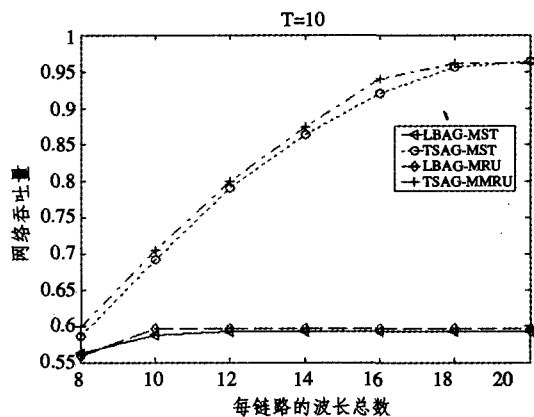


图 8 吞吐量比较, T=10

在网络资源不足的阻塞模式下,疏导的目标就是满足更多的连接请求,使网络吞吐量最大。两种模型的网络吞吐量

的比较如图 7 和图 8 所示。图 7 假设所有的光纤链路有 10 个波长,每节点的收发器数从 2 变化到 16 时,比较了 TSAG 和 LBAG 的吞吐量性能。从图中的比较可以看出,TSAG 的性能要优于 LBAG,并且每节点的收发器越少,TSAG 的优势就越明显。还可以看出 MRU 策略的性能要优于 MST,因为 MRU 分配资源更加有效率。

图 8 假设每节点的收发器个数是 10,每光纤链路的波长数从 8 变化到 20 时,比较了 TSAG 和 LBAG 的吞吐量性能。从图中的比较可以看出,TSAG 的吞吐量高于 LBAG,并且随着每光纤链路的波长数的增加,TSAG 的优势越明显。同样可以看出 MRU 的性能优于 MST。

结论 将流量疏导看成一个两层的路由问题,本文提出了一种应用于静态 WDM 网状网络的收发器节约辅助图 (TSAG) 模型。基于 TSAG 模型,还提出了一种收发器节约算法 TSABAG。仿真数据表明,TSAG 模型与 LBAG 模型相比,节约了收发器资源,并拥有较高的网络吞吐量。将来还要进一步研究动态流量疏导的算法,以及波长转换受到限制时的流量疏导问题。

参考文献

- Zhu Hongyue, Zang Hui, Zhu Keyao, Mukherjee B. A novel Generic Graph Model for Traffic Grooming in Heterogeneous WDM Mesh Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2003, 11(2): 285~299
- Chiu A L, Modiano E H. Traffic Grooming Algorithms for Reducing Electronic Multiplexing Costs in WDM Ring Networks. *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, Jan. 2000, 18: 2~12
- Zhu Keyao, Mukherjee B. Traffic Grooming in an Optical WDM Mesh Network. *IEEE J. Selected Areas in Communications*, Jan. 2002, 20: 122~133
- Zhu Hongyue, Zang Hui, Zhu Keyao, Mukherjee B. Dynamic Traffic Grooming in WDM Mesh Networks Using a Novel Graph Model. *SPIE Optical Networks Magazine*, 2003, 4(3): 65~75
- Zhu Keyao, Zang Hui, Mukherjee B. A Comprehensive Study on Next-Generation Optical Grooming Switches. *IEEE J. Selected Areas in Communications*, 2003, 21(7): 1173~1186
- Zhu Keyao, Zhu Hongyue, Mukherjee B. Traffic Engineering in Multigranularity Heterogeneous Optical WDM Mesh Networks through Dynamic Traffic Grooming. *IEEE Network*, 2003, 17(2): 8~15
- Wang Yao, Ramamurthy B. A Link Bundled Auxiliary Graph Model for Constrained Dynamic Traffic Grooming in WDM Mesh Networks. *IEEE J. Selected Areas in Communications*, 2005, 23(8): 1542~1555

(上接第 31 页)

也不断变差,这是因为路径的建立延迟增大,当节点有数据发送时,路径还没有建立好,采用了路径修复,增大了延迟,或者由于对已经不是最优的旧路由继续使用,导致网络的延迟和能量均衡性能变差。

总结及下一步工作 本文以群树结构与 Internet 相对应,实现了传感器网与 IPv6 的巧妙结合。尽管如此,IPv6 毕竟不是专门面向 WSN 而设计的通信协议,在无线传感器节点上直接运行标准的 IPv6 协议也存在另外一些问题,例如:包头开销问题^[7], IPv6 协议栈的剪裁问题^[8]等。总之,标准全 IPv6 无线传感器网络的相关技术还需要更深入的研究。

参考文献

- Dunkels A, Alonso J, Voigt T, et al. Connecting wireless sensor networks with TCP/IP networks. In: *Proceedings of the Second International Conference on Wired/Wireless Internet Communications (WWIC 2004)*. Germany: Springer, 2004. 143~152
- Zuniga M, Krishnamachari B. Integrating future large-scale wireless sensor networks with the Internet[J/OL]. [USC Computer

- Science Technical Report CS 03-792]. 2003
- Hui D, Richard H. Unifying micro sensor networks with the Internet via overlay networking. In: *Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN 2004)*, Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 2004. 571~572
- Dunkels A, Voigt T. The design and implementation of an IP-based Sensor network for intrusion Monitoring. In: *Swedish National Computer Networking Workshop (SNCNW 2004)*, Karlstad, Sweden, 2004. 31~36
- Mohsin M, Prakash R. IP address assignment in a mobile ad hoc network. In: *Proceedings of Military Communications Conference, California, USA, 2002*. 856~861
- Nesargi S, Prakash R. MANETconf: configuration of hosts in a mobile ad hoc network. In: *Proceedings IEEE INFOCOM 2002*. New York, USA, IEEE Press, 2002. 608~617
- Dunkels A, Alonso J, Voigt T. Making TCP/IP viable for wireless sensor networks. In: Holger Karl, ed. *European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN 2004)*. Berlin, Germany: Springer, 2004. work-in-progress session
- Dunkels A. Full TCP/IP for 8-bit architectures. In: *Proceedings of the First International Conference on Mobile Applications, Systems and Services (MOBISYS 2003)*. Berkeley, CA: USENIX Association, 2003. 85~98