

# 无线 mesh 网络中效用与链路强度联合优化的覆盖多播

朱翠涛<sup>1,2</sup> 杨宗凯<sup>1</sup> 程文青<sup>1</sup> 吴 砥<sup>1</sup>

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)<sup>1</sup> (中南民族大学电子信息工程学院 武汉 430073)<sup>2</sup>

**摘要** 支持多播通信是无线 mesh 网络(WMNs)的一个重要应用。采用基于效用的定价机制,通过拉格朗日(Lagrange)对偶分解法获得一个基于价格的分布式算法。以该分布式算法为核心,作为 mesh 网络中数据流速率和链路强度调整的优化策略,每条链路根据自己的拥塞状况合理地定价,通过价格机制来调节链路的强度和数据流的速率,使网络净效用最大化。实验结果表明该算法是有效可行的。

**关键词** 无线 mesh 网络,覆盖多播,对偶分解

## Joint Utility and Link Stress Optimization for Overlay Multicast in Wireless Mesh Networks

ZHU Cui-tao<sup>1,2</sup> YANG Zong-kai<sup>1</sup> CHENG Wen-qing<sup>1</sup> WU Di<sup>1</sup>

(Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)<sup>1</sup>

(Department of Electronics and Information Engineering, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430073, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Multicast support is a critical and desirable feature of wireless mesh networks (WMNs). We proposed an approach to joint optimizing rate allocation of flows and stress of links for forwarding data flows. We developed a distributed algorithm based on pricing scheme by using dual decomposition technique. Each individual network link adjusts its congestion price according to the traffic load. Each flow in turn collects the prices of all links along its multicast path and calculates the overall network price. Then, it adjusts the streaming rate and link stress such that its "net benefit," the utility minus the link stress, is maximized. The validity and effectiveness of our approach are demonstrated in simulations.

**Keywords** Wireless mesh networks, Overlay multicast, Dual decomposition

## 1 引言

无线 mesh 网络已成为人们关注的热点之一。在 WMNs 中,各节点不仅是一般的计算终端,还可以为其它节点转发数据流<sup>[1]</sup>。由于 WMNs 的这些特性,有助于实现多个成员间的协同通信。因此,支持多播通信是 WMNs 的一个重要应用。多播是一种有效的一点对多点、多点对多点的通信方式。IP 多播是人们最先提出的一种多播技术,它主要是根据最短路径的单播路由由协议构造多播树,因此 IP 多播树是最短路径树(SPT)。最短路径树的构造比较容易,但链路带宽的利用并非最优,有时会引起较高带宽浪费。而且,IP 多播服务在部署的过程中会遇到许多困难。为此,人们转而希望在应用层解决 IP 多播面临的问题,提出了覆盖多播(Overlay Multicast)的概念。

覆盖多播<sup>[2]</sup>作为提供多播服务的一种可行途径正不断为人们所认可。然而,覆盖多播面临长时延和链路强度等问题,特别对于以实时多媒体分发为代表的典型应用,这些问题显得更加突出。因此,人们试图利用各种方法来解决这些问题。例如,Y. De-Nian 等<sup>[3]</sup>提出了一种 MOM 覆盖多播机制,以提高链路带宽利用效率。Cui Yi 等<sup>[4]</sup>提出了在网络容量及数据

受限的条件下,通过调整覆盖多播的流速率分配使网络效用最大化。Han Dai 等<sup>[5]</sup>针对无线网络支持 VOD 应用提出了一种快速补丁的覆盖策略,使流的播放保持连续性。K. Kim<sup>[6]</sup>提出了一种基于带宽感知的覆盖多播树结构,利用可用带宽来构造多播树,减少包的丢失。诸如此类的研究工作将网络效用最大化、时延约束、带宽的有效性等引入到多播树的构造中。

在上述研究基础上,本文提出了在无线 mesh 网络中联合优化效用和链路强度使网络的净效用最大化。因为仅仅寻求效用最大化,数据流都将以最大的速率和最短的路径进行传输,这将使一些链路的强度增加,不仅浪费链路的带宽,而且容易导致在这些链路上出现拥塞现象,使得网络性能严重下降。为了避免拥塞的产生,提高系统的性能,本文将链路的强度引入到网络效用最大化的架构中。同时,采用基于效用的定价机制,通过拉格朗日对偶分解方法获得一个基于价格的分布式算法。以该分布式算法为核心作为链路强度调整和速率分配优化策略。每条链路根据自己拥塞状况合理地定价,通过价格机制来调节链路的强度和数据流的转发速率,使整个网络性能最优。

到稿日期:2008-04-16 本文受国家自然科学基金项目(编号:60772088)资助。

朱翠涛 博士研究生,主要研究方向为无线 mesh 网络关键技术,E-mail: zhucuitao@gmail.com; 杨宗凯 教授,博士生导师,研究方向为多媒体网络通信、网络教育等;程文青 教授,博士生导师,研究方向为无线传感网络;吴 砥 博士,研究方向为网络教育。

## 2 系统模型和问题描述

### 2.1 网络模型

假设一个静态的 WMNs, 用图  $G=(V, L)$  表示,  $V$  表示节点的集合,  $L$  表示物理链路的集合。在此物理网络中, 考虑一个覆盖网络, 用图  $G_c=(V_c, L_c)$  表示,  $V_c$  表示覆盖节点的集合,  $L_c$  表示覆盖结构中边的集合。如图 1 所示, 在多播会话 (session) 中, 节点  $s$  作为会话的源节点, 其它节点利用 Peer-to-Peer 通过单播方式中继或接收多播流。由  $s$  和  $V_c$  中的其它覆盖节点组成多播树  $T$ , 在多播树  $T$  中包含有多个端到端的单播流, 所有单播流的集合用  $F$  表示, 用  $x_f$  表示流  $f$  的速率,  $f \in F\{1, \dots, F\}$ ,  $x_f$  满足  $m_f \leq x_f \leq M_f$ , 其中  $m_f$  和  $M_f$  分别表示流  $f$  的最小和最大传输速率。  $F(l)$  表示经过物理链路  $l$  的流的集合。依据 DCF 算法<sup>[7]</sup>, 定义  $a_l$  为在链路  $l$  上的介质访问概率, 链路  $l$  的容量为  $c_l$ 。每条链路  $l$  上总流量应满足该链路的容量约束:

$$\sum_{f \in F(l)} x_f \leq c_l a_l, \forall l \in L \quad (1)$$

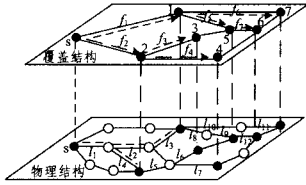


图 1 覆盖结构与物理结构间的对应关系

在无线 mesh 网络中, 一个覆盖节点转发流的能力是有限的, 而且可能同时转发多个覆盖流。因此, 一个中继节点转发流的速率不能超过其接收流的速率。也就是说, 在覆盖多播会话中, 除了链路的容量约束外, 对中继节点而言, 还存在下载流的速率与上传流的速率间的约束关系。如果一个覆盖节点是流  $f$  的目的地节点, 又是流  $f'$  的起始节点, 那么流  $f'$  是流  $f$  的子流, 表示为  $f \rightarrow f'$ 。同样, 如果一个覆盖节点是流  $f^p$  的目的节点, 同时又是流  $f$  起始节点, 那么流  $f^p$  是流  $f$  的父流, 表示为  $f^p \rightarrow f$ 。如图 1 所示, 对于节点 2, 流  $f_3$  和  $f_4$  是流  $f_2$  的子流, 其它流之间有类似的情况。

如果一个流有一个父流, 那么它的速率不能超过其父流的速率, 即  $f \rightarrow f'$ ,  $x_{f'} \leq x_f$ 。因此, 本文定义覆盖多播树中父流与子流之间的关系为:

$$b_{ff'} = \begin{cases} -1, & \text{if } f \rightarrow f' \\ 1, & \text{if } f' = f, \text{ and } f \text{ has a parent flow} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$b_{ff'}$  表示在覆盖多播中中继与数据流间的依赖关系。根据参考文献<sup>[4]</sup>, 可定义覆盖多播中数据约束如下:

$$\sum_{f \in F} b_{ff'} x_f \leq 0, \forall f' \in F \quad (3)$$

### 2.2 链路的强度

**定义 1** 关于链路  $l \in L$  的强度 (stress) 定义为: 在一个覆盖多播会话树  $T$  中同时经过链路  $l$  的具有相同内容的覆盖流的总数。本文将流的速率引入链路的强度中, 那么覆盖多播会话树  $T$  中链路  $l$  的强度定义为:

$$S(l, T) = \sum_{f \in F} Y_l^f x_f \quad (4)$$

其中,  $Y_l^f$  表示流  $f$  是否经过链路  $l$ 。若经过,  $Y_l^f = 1$ , 否则  $Y_l^f = 0$ 。

在一个覆盖多播树  $T$  中使用的所有链路的强度之和为:

$$S_T = \sum_{l \in L} \sum_{f \in F} Y_l^f x_f \quad (5)$$

为了提高网络资源的利用率及系统的效率, 要求链路的强度尽可能地小, 因为链路的强度越大, 浪费链路的带宽就越多, 也容易造成网络的拥塞, 导致系统性能下降。因此, 要求:

$$\min \sum_{l \in L} \sum_{f \in F} Y_l^f x_f \quad (6)$$

### 2.3 问题描述

设每个流  $f$  对应一个效用函数为  $U_f(x_f)$ , 同时将流所经过的链路强度引入到网络效用最大化架构中, 也就是说, 本问题的优化目标是网络总的净效用最大化。网络的净效用指它的效用与链路强度 (流消耗的链路带宽) 之差, 即

$$\sum_{f \in F} U_f(x_f) - \sum_{l \in L} \sum_{f \in F} Y_l^f x_f$$

假定效用函数  $U_f(x_f)$  是关于  $x_f$  的严格凹的连续函数, 且随  $x_f$  的增加而增加, 则可以获得所求问题的优化模型:

$$\begin{aligned} \max & \sum_{f \in F} U_f(x_f) - \sum_{l \in L} \sum_{f \in F} Y_l^f x_f \\ \text{s. t.} & \sum_{f \in F} Y_l^f x_f \leq c_l a_l, \forall l \in L \\ & \sum_{f \in F} b_{ff'} x_f \leq 0, \forall f' \in F \\ & Y_l^f \in \{0, 1\}, 0 \leq a_l \leq 1 \end{aligned} \quad (7)$$

在问题(7)中, 将链路的强度引入到网络效用最大化结构中, 是因为在链路带宽受限的无线 mesh 网络中, 如果仅仅是寻求效用最大化, 那么数据流都将以最大的速率和最短的路径进行传输, 这将使一些链路的强度增加, 不仅浪费链路的带宽, 而且容易导致在这些链路上出现拥塞现象, 使得网络性能严重下降。为此, 本文提出了通过联合优化流的传输速率和链路的强度, 在满足用户要求的条件下, 减少链路的强度, 避免拥塞的产生, 提高系统的性能。问题(7)正是基于这种思想对无线 mesh 网络中多播流分发过程进行抽象和建模的。

## 3 基于对偶分解的分布式算法

### 3.1 对偶问题

利用对偶分解方法来求解问题(7), 通过拉格朗日数乘松弛问题(7)中的两个约束, 得到问题(7)的拉格朗日函数如下:

$$\begin{aligned} L(x_f, Y_l^f; \lambda_l, \mu_f) &= \sum_{f \in F} U_f(x_f) - \sum_{l \in L} \sum_{f \in F} Y_l^f x_f + \sum_{l \in L} \lambda_l (c_l a_l - \sum_{f \in F} Y_l^f x_f) - \\ & \sum_{f' \in F} \mu_{f'} (\sum_{f \in F} b_{ff'} x_f) \\ &= \sum_{f \in F} \mu_f (x_f) - \sum_{l \in L} \sum_{f \in F} Y_l^f x_f - \sum_{l \in L} \lambda_l \sum_{f \in F} Y_l^f x_f + \sum_{l \in L} \lambda_l c_l a_l - \\ & \sum_{f \in F} x_f \sum_{f' \in F} \mu_{f'} b_{ff'} \\ &= \sum_{f \in F} \mu_f (x_f) - \sum_{f \in F} x_f \sum_{l \in L} Y_l^f - \sum_{f \in F} x_f (\sum_{l \in L} \lambda_l Y_l^f) - \sum_{f \in F} x_f \sum_{f' \in F} \\ & \mu_{f'} b_{ff'} + \sum_{l \in L} \lambda_l c_l a_l \\ &= \sum_{f \in F} (\mu_f (x_f) - x_f \sum_{l \in L} \lambda_l (2 \sum_{l \in L} Y_l^f + \sum_{f' \in F} \mu_{f'} b_{ff'})) + \sum_{l \in L} \\ & \lambda_l c_l a_l \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $\lambda_l$  和  $\mu_f$  是拉格朗日数乘。参考经济学的概念, 这里它们分别表示为链路的拥塞价格和单位数据流经过物理链路时付给网络的价格。因此, 根据上述的拉格朗日函数得到问题(7)的对偶函数如下:

$$D(\lambda_l, \mu_f) = \max_{x_f, Y_l^f} L(x_f, Y_l^f; \lambda_l, \mu_f) \quad (9)$$

根据对偶函数, 进一步可以得到问题(7)的对偶问题为

$$\begin{aligned} \min & D(\lambda_l, \mu_f) \\ \text{s. t.} & \lambda_l \geq 0, \mu_f \geq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

### 3.2 分布式求解算法

根据上面的变形可知,为了求解对偶问题(10),先通过固定原问题中的变量  $x_f$  和  $Y_l^f$ ,而原变量又通过固定对偶变量  $\lambda_l, \mu_f$  求得,这样循环下去就形成了一个迭代算法。这个迭代算法通过在各链路和数据流之间交换对偶变量(可以理解为价格信息)而收敛到原问题(7)的全局最优解。

下面通过这样的算法来求解价格(对偶变量) $\lambda_l$  和  $\mu_f$ ,通过(8)式可知,  $L(x_f, Y_l^f; \lambda_l, \mu_f)$  中的  $x_f (\sum_{l \in L} Y_l^f + \sum_{l \in L} \lambda_l Y_l^f + \sum_{f \in F} \mu_f b_{ff})$  偶合了变量  $x_f$  和  $Y_l^f$ 。为了确保全局最优和问题的分解,同时又不影响原问题的最终解,令  $\bar{x}_f = \ln x_f$ , 即

$$\begin{aligned} D(\lambda_l, \mu_f) &= \max_{\bar{x}_f, Y_l^f} \sum_{f \in F} (\mu_f (e^{\bar{x}_f}) - \bar{x}_f - \ln(\sum_{l \in L} Y_l^f + \sum_{l \in L} \lambda_l Y_l^f + \sum_{f \in F} \mu_f b_{ff})) + \sum_{l \in L} \lambda_l c_l a_l \\ &= \max_{\bar{x}_f} \sum_{f \in F} (\mu_f (e^{\bar{x}_f}) - \bar{x}_f) + \max_{Y_l^f} \sum_{l \in L} \lambda_l c_l a_l - \sum_{f \in F} \ln(2 \sum_{l \in L} Y_l^f + \sum_{f \in F} \mu_f b_{ff}) \end{aligned}$$

因此,对偶函数  $D(\lambda_l, \mu_f)$  分解成了几个独立的子问题,采用梯度法<sup>[8]</sup>可以得到  $\lambda_l, \mu_f$  的迭代更新式子为

$$\begin{aligned} \lambda_l(t+1) &= \left[ \lambda_l(t) - \gamma \frac{\partial D(\lambda_l, \mu_f)}{\partial \lambda_l} \right]^+, \forall l \in L \\ \mu_f(t+1) &= \left[ \mu_f(t) - \gamma \frac{\partial D(\lambda_l, \mu_f)}{\partial \mu_f} \right]^+, \forall f \in F \end{aligned}$$

其中  $\gamma$  为迭代步长。根据(8)式可得到:

$$\frac{\partial D(\lambda_l, \mu_f)}{\partial \lambda_l} = c_l a_l - \sum_{f \in F} Y_l^f x_f$$

另外,由于  $\sum_{f \in F} \mu_f b_{ff} = \mu_f - \sum_{f \in F} \mu_f$ , 再结合(8)式,可得到

$$\frac{\partial D(\lambda_l, \mu_f)}{\partial \mu_f} = x_f(t) - x_{f^p}(t)$$

于是,得到如下分布式算法 1。

**算法 1** 设  $t$  为迭代次数,  $t=1, 2, \dots$

链路价格更新:

(1) 收到所有的  $x_f(t)$  和链路强度信息  $Y_l^f, f \in F(l), l \in L$ ;

(2) 按照下面式子更新价格:

$$\lambda_l(t+1) = \left[ \lambda_l(t) - \gamma (c_l a_l - \sum_{f \in F} Y_l^f x_f) \right]^+, \forall l \in L$$

(3) 发送  $\lambda_l(t+1)$  到所有流  $f \in F(l)$ 。

转发价格更新:

(1) 流  $f$  从其父流  $f^p$  收到速率  $x_{f^p}(t)$ ;

(2) 更新价格:

$$\mu_f(t+1) = \left[ \mu_f(t) - \gamma (x_f(t) - x_{f^p}(t)) \right]^+, \forall f \in F$$

(3) 发送  $\mu_f(t+1)$  到所有流  $f^p$ 。

链路强度调整:

(1) 链路收到  $\lambda_l(t)$  和  $\mu_f(t)$ ;

(2) 根据下面的优化子问题,确定  $Y_l^f$ :

$$\max_{Y_l^f} \sum_{l \in L} \lambda_l c_l a_l - \sum_{f \in F} \ln(2 \sum_{l \in L} Y_l^f + \sum_{f \in F} \mu_f b_{ff})$$

流速率调整:

(1) 收到所有链路的价格信息  $\lambda_l(t)$ ;

(2) 每个流求解下面的优化子问题,确定其新的发送速率:

$$\max_{x_f} \sum_{f \in F} (\mu_f (e^{\bar{x}_f}) - \bar{x}_f) + \sum_{l \in L} \lambda_l (x_f - Y_l^f)$$

算法 1 是一个分布式算法,存在一些反馈信息的交互问

题,每条链路  $l$  需要知道经过它的所有数据流愿意提供的价格,可以通过将这些价格信息放在这些数据流中发送过来。同时,每个流  $f$  需要知道沿着它经过的链路的拥塞价格,这可以通过来自这些链路反馈的 ACK 数据包告知。每条链路  $l$  需要知道经过它的数据流的总速率,这可以通过它自己观测获得。也就是说,每条链路根据它的局部信息就可以调整自己的拥塞价格。而每个流  $f$  需要知道经过的路径上链路的强度之和,这也可来自这些链路的返回 ACK 数据包告知。

利用对偶分解理论得到了上述分布式算法后,采用文献[9]中的分布式梯度算法收敛性分析的标准方法,容易证明下面的收敛性定理成立。

**定理 1** 当迭代步长满足  $\alpha(t) \rightarrow 0, \sum_{t=1}^{\infty} \alpha(t) = \infty$  和  $\beta(t) \rightarrow 0, \sum_{t=1}^{\infty} \beta(t) = \infty$  时,算法中的对偶变量  $(\lambda(t), \mu(t))$  收敛到对偶问题(10)的最优解  $(\lambda^*, \mu^*)$ 。

### 4 实验及结果分析

利用 MATLAB 仿真工具对本文所提出的算法进行了数字仿真分析。在实验中,产生了一个由 18 个节点、分布在  $800 \times 800 \text{m}^2$  的范围里的无线 mesh 网络,每个 mesh 节点的通信范围和相应的干扰范围分别为 250m 和 450m,其中覆盖节点为 8 个,7 个覆盖多播流,下层物理链路有 23 条,如图 1 所示。假定每个流  $f$  的效用函数为

$$U_f(x_f) = \log(x_f), 0 \leq x_f \leq 2 \text{Mbps}, \forall f \in F$$

在实验中,设链路  $l$  的容量  $c_l = 10 \text{Mbps}$ ,在链路  $l$  上的介质访问概率  $a_l$  设置为 0.2~0.4 之间取任意值。

首先,在实验中验证了算法的收敛性,如图 2 所示。

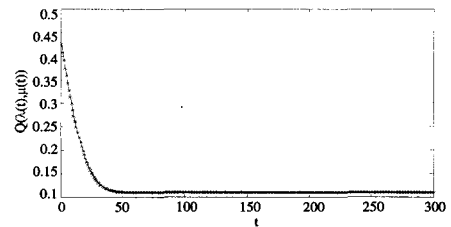


图 2 对偶函数的收敛情况

从图 2 中可以看到,算法 1 在迭代大约 50 次就收敛了,说明对偶函数能以较快的速度收敛到最优解。

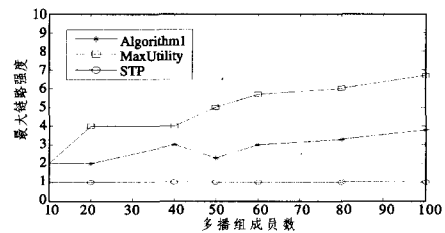


图 3 最大链路强度比较

同时,对算法 1 的性能进行了仿真分析。在由不同规模的覆盖多播节点组成的不同多播组情况下,比较了本文所提出的算法 1、只追求效用最大化算法 MaxUtility<sup>[4]</sup> 以及最短路径算法 SPT 这 3 种算法所获得的最大链路强度,如图 3 所示。为了图示直观,图 3 所示的链路强度是经过归一化后的值,在实现中将式(4)中的经过链路  $l$  的流  $f$  与速率归一化为

(下转第 73 页)

也较大。当多播成员数目增加时,NICE 的数据传输效率显著降低。

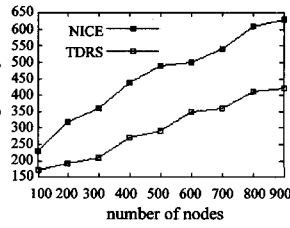
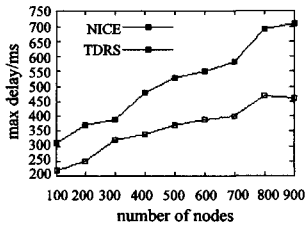


图5 多播成员数 vs 路径最大时延 图6 多播成员数 vs 路径平均时延

以上分析说明,TDRS 模型同时而有效地平衡了传输时延和链路压力两个参数。NICE 模型由于 RP 负责对所有节点的控制,虽然在节点管理上有较好的特性,可在链路压力和时延的控制上却不够理想。TDRS 二维模型的提出,结合了 ALM 层次型与树型模型的优点,对于网络数据传输性能的改进意义深远。

**结束语** 本文提出了一种基于域饱和度的二维应用层多播模型,将同属于一个物理平面上的终端节点映射为网络二维逻辑结构。模型通过以域饱和度为基础的综合参数平衡选取法确定目标加入域,并运行带宽约束的最小半径支撑树算法 DCMR 来产生域内数据路由,同时采用基于优先级的动态规划法改变拓扑中各域中心节点所在的逻辑层次,以此达到 ALM 拓扑网络传输性能的整体优化。此外,模型利用节点冗余信息存储、链路数据预留来增强在网络拓扑异动下的自愈能力。

TDRS 致力于对拓扑网络数据传输通道性能进行优化,而对数据传输的安全关注不足。随着应用层多播技术应用的

日益广泛,加强多播通信安全是今后的一个重要研究方向。

## 参考文献

- [1] Francis P. Yoid; Extending the Multicast Internet Architecture. White paper. [http:// www. aciri. org/yoid/](http://www.aciri.org/yoid/), 1999
- [2] Chu Y-H, Rao S G, Zhang H. A Case for End System Multicast // Proceedings of ACM SIGMETRICS. 2002, 20(8): 1456-1471
- [3] Banerjee S, Bhattacharjee B, Kommareddy C. Scalable Application Layer Multicast // Proceedings of ACM Sigcomm. Aug. 2002; 205-217
- [4] Prim R C. Shortest Connection Networks and Some Generalizations [J]. Bell System Technical Journal, 1957, 36: 1389-1401
- [5] Kruskal B. On the Shortest Spanning Subtree of a Graph and the Traveling Salesman Problem [J] // Proc. of the American Mathematics Society, 1956, 7(1): 48-50
- [6] Jin Xing, Wong Wan-Ching, Chan S-H G. High Performance Switching and Routing (HPSR) // 2005 Workshop. May 2005; 432-436
- [7] Zegura K C, Bhattacharjee S. How to Model an Internet network // Proceedings of IEEE Infocom. 1996
- [8] Broash E, Shavitt Y. Approximation and Heuristic Algorithms for Minimum Delay Application-Layer Multicast Trees // Proc. of IEEE INFOCOM 2004. March 2004
- [9] Shi S Y, Turner J S. Multicast Routing and Bandwidth Dimensioning in Overlay Networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(8): 1444-455
- [10] Tan S W, Waters G. Building low delay application layer multicast trees // Merabti M, Pereira R, eds. Proc. of the 4th Annual PostGraduate Symp. The Convergence of Telecommunications, Networking & Broadcasting, EPSRC. 2003; 27-32

(上接第 53 页)

一个强度单位。从实验结果可以看出,最短路由算法 SPT 不管在什么情况下,链路的强度都为 1。而在其他两种算法中,链路的最大强度随着多播组中多播节点数量的增加而增大,但是 MaxUtility 算法增加的幅度要比算法 1 快得多,说明了本文实现的算法在实现网络效用最大化的同时,能够降低链路的强度,减少拥塞现象的发生,提高系统的可靠性。

**结束语** 本文主要研究了在无线 mesh 网络中联合优化效用和链路强度使网络的净效用最大化。在追求效用最大化的同时,降低链路的强度,避免链路带宽的浪费和减少拥塞现象的产生,提高系统的性能。同时,利用对偶分解法,获得一个新的基于价格的分布式算法,该算法联合优化了各个数据流的速率调整和流所经过的各条链路的强度。实验结果证实了算法的有效性。由于无线 mesh 网络是新兴起的一种宽带无线接入技术,还有许多问题需要解决,例如在无线 mesh 网络中有关覆盖多播的时延和多信道分配等问题有待于进一步研究,这是作者后继工作的研究重点。

## 参考文献

- [1] Akvildiz I, Wang F X. A survey on wireless mesh networks [J]. IEEE Radio Communications, 2005, 24(9): 23-30
- [2] Chu Y, Rao R, Zhang H. A case for end system multicast [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 22(8): 1456-1471
- [3] De-Nian Y, Wanjiun L. On Bandwidth-efficient Overlay Multicast [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2007, 18(11): 1503-1514
- [4] Cui Y, Xue Y, Nahratedt K. Optimal resource allocation in overlay multicast [J]. IEEE Transaction on Parallel and distributed Systems, 2006, 17(8): 808-823
- [5] Han D, Chan E. Quick Patch: an overlay multicast scheme for supporting video on demand in wireless networks [C] // 28th Int. Conf. Information Technology Interfaces (ITI). 2006; 613-618
- [6] Kim K. Bandwidth dependent overlay multicast scheme [C]. Communication Systems, ICCS, 2006; 1-5
- [7] Eren G, Kim A N. Utility optimal real-time multimedia communication in wireless mesh networks [C]. Packet video, 2007; 234-242
- [8] Bertsekas D. Nolinear Programming [M]. 2nd edition. Athena Scientific, 1999
- [9] Shor N Z. Minimization methods for non-differentiable functions [M]. Springer-Verlag, 1985