

## 用于 Ad Hoc 网络的自适应多速率多播拥塞控制策略<sup>\*</sup>

徐伟强<sup>1,2</sup>, 吴铁军<sup>2</sup>, 汪亚明<sup>1</sup>, 张云华<sup>1</sup>, 陈积明<sup>2+</sup>

<sup>1</sup>浙江理工大学 信息电子学院, 浙江 杭州 310018)

<sup>2</sup>(浙江大学 信息科学与工程学院, 浙江 杭州 310027)

### Adaptive Congestion Control Strategy for Multirate Multicast Sessions in Ad Hoc Networks

XU Wei-Qiang<sup>1,2</sup>, WU Tie-Jun<sup>2</sup>, WANG Ya-Ming<sup>1</sup>, ZHANG Yun-Hua<sup>1</sup>, CHEN Ji-Ming<sup>2+</sup>

<sup>1</sup>(College of Informatics and Electronics, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

<sup>2</sup>(College of Information Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-571-87953762, Fax: +86-571-87951879, E-mail: jmchen@iipc.zju.edu.cn

**Xu WQ, Wu TJ, Wang YM, Zhang YH, Chen JM. Adaptive congestion control strategy for multirate multicast sessions in ad hoc networks. *Journal of Software*, 2008,19(3):769–778. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/769.htm>**

**Abstract:** It is vital to implement multicast congestion control in networks as multicast improves the link's transmission efficiency, but it is apt to cause network congestion. However, multicast congestion control designed for Internet isn't fit for Ad Hoc networks, due to the following features: (1) multi-hop wireless-based transmission resulting in the contention relationship between flows in both the time domain and the spatial domain; (2) and frequent node mobility leading to the time-varying network situations. In this paper, the notion of the link's interference set is introduced to describe the characteristics of the contention relationship between flows, and a nonlinear optimization problem is presented to formulate the multirate multicast congestion control problem for small time interval where network situations can be regarded as time-invariant. The penalty function method and the subgradient method are jointly applied to obtain the optimal solution, and thus the distributed iterative algorithm is proposed. On the basis of this distributed algorithm, an adaptive congestion control strategy for multirate multicast sessions ( $AC^2M^2$ ) is proposed to cope with the time-varying network situations, by means of network status detection and receding optimization. Simulation results show that the proposed distributed algorithm can quickly converge to globally optimal solutions; and, compared to the AIMD algorithm in TCP-Reno,  $AC^2M^2$  is more adaptive to time-varying network situations, and achieves better network performance.

**Key words:** ad hoc network; congestion control; multirate multicast; receding optimization

**摘要:** 多播提高了链路的传输效率,但易于造成网络拥塞.因此,在网络中实施多播拥塞控制至关重要.然而,由于

---

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60702081, 60604029, 60473038 (国家自然科学基金); the Joint Funds of NSFC-Guangdong of China under Grant No.U0735003 (国家自然科学基金委-广东省联合重点基金项目); the National Natural Science Foundation of Zhejiang Province of China under Grant Nos.Y107309, Y106384 (浙江省自然科学基金); the Science Foundation of Zhejiang Sci-Tech University of China under Grant No.0604302 (浙江理工大学科研启动基金)

Received 2006-12-03; Accepted 2007-05-24

Ad Hoc 网络的两个本质特点,为 Internet 设计的多播拥塞控制不适合 Ad Hoc 网络:(1) 无线多跳连接引起了信息流之间在时间域和空间域的竞争;(2) 节点频繁移动导致了网络状态不断变化.首先提出了链路干扰集的概念来描述信息流竞争的特点,将网络状态不变的小时间段内的多速率多播拥塞控制问题表达成一个非线性优化问题,联合运用罚函数法和次梯度法获得此问题的优化解,相应地提出了一种有效的分布式迭代算法.在此算法基础上,针对网络状态的时变性,设计了一种基于状态检测和滚动优化的自适应多速率多播拥塞控制策略——AC<sup>2</sup>M<sup>2</sup>.仿真结果表明,分布式算法能够快速收敛到最优解;AC<sup>2</sup>M<sup>2</sup>(adaptive congestion control strategy for multirate multicast sessions)策略对网络状态的变化具有较好的自适应能力,所获得的网络性能比 TCP-Reno 要优越得多.

关键词: Ad Hoc 网络;拥塞控制;多速率多播;滚动优化

中图分类号: TP301 文献标识码: A

Ad Hoc 网络是由不确定数量的无线节点组成的自组织网络系统,具有无中心控制、拓扑时变、无线多跳连接的特点.在 Ad Hoc 网络中,利用无线介质的广播特性,多播能够提高无线链路的传输效率.因此,研究者们提出了许多适用于 Ad Hoc 网络的多播路由协议,例如文献[1].然而,多播的引入带来了网络拥塞问题,如果多播应用不能对网络拥塞作出正确响应,将会带来比单播应用引发拥塞更为严重的影响.这是因为:(1) 多播数据流沿多条投递路径广泛分布于网络;(2) 多播数据流接收端具有异构性,不同接收端的处理能力不同.因此,如何有效地提高多播拥塞控制机制在 Ad Hoc 网络中的性能,是一个重要的、亟待解决的课题.

Internet 网络上的多速率多播拥塞控制问题已有一些基于优化理论的解决方案.研究人员提出的优化算法可以分成两大类:对偶算法<sup>[2-4]</sup>和主算法<sup>[5,6]</sup>.Kar 等人在文献[2]中首次提出了 Internet 网络多速率多播拥塞控制的优化模型,在文献[3]中用 Lagrangian 松弛法和动态规划法求解了这个优化命题,在文献[5]中基于不可导优化方法导出了新算法.Deb 等人在文献[6]中用罚函数法得到了有很好伸缩性的算法.Wang 等人在文献[4]中基于对偶方法导出了多速率多播效用最大化问题取得了最优解的充分和必要条件.

但上述这些解决方案不能直接应用于 Ad Hoc 网络.这是因为与 Internet 网络相比,Ad Hoc 网络存在节点变动、无线多跳连接的新特点.前者导致了网络状态不断发生不可预测且不可忽略的变化,后者引起了与 Internet 网络不同的信息流竞争新特点<sup>[7]</sup>.本文首先从信息流竞争新特点出发,提出了一种适合在小时间段内网络状态不变的高效的分布式求解算法;然后,针对 Ad Hoc 网络状态的时变性,设计了一种基于状态检测和滚动优化的自适应多速率多播拥塞控制策略 AC<sup>2</sup>M<sup>2</sup>(adaptive congestion control strategy for multirate multicast sessions).

为考察本文所提出算法的有效性,分别针对分布式求解算法的收敛性以及网络状态变动情况下 AC<sup>2</sup>M<sup>2</sup> 的自适应优化性能设计了两个仿真实验.实验结果表明,分布式算法具有良好的收敛性,而 AC<sup>2</sup>M<sup>2</sup> 对网络状态的变化具有有效的自适应能力,与 TCP-Reno 的 AIMD 算法相比,所获得的解能使网络的性能更优.

## 1 基本问题及其分布式算法

Ad Hoc 网络的一个重要特点是其参数和拓扑结构一直在发生不可预测且其影响不可忽略的变化,这种不确定性时变的特点使在其他网络中行之有效的办法(如 Internet 网络上的多速率多播拥塞控制方法)不能简单地移植到 Ad Hoc 网络中来.为了解决不确定性时变情况下 Ad Hoc 网络的多速率多播拥塞控制问题,本文将整个问题的求解分为两部分:

(1) 将网络的运行时间切割成一系列足够小的时间段,并假设在每一个时间段内网络的参数和拓扑结构均不发生变化.在此基础上,将该时间段内的 Ad Hoc 网络多速率多播拥塞控制问题表达成一个确定性的非线性优化问题(本文称其为基本问题),并提出一种高效的分布式求解算法.

(2) 在上述基本问题求解的基础上,设计一种基于状态检测和滚动优化的自适应策略来适应 Ad Hoc 网络参数和拓扑结构的不确定时变性.

## 1.1 拥塞控制基本问题

首先给出基本问题及其求解算法.设在  $t \in [t_i, t_i + \Delta t_i], i=1, 2, \dots$  ( $\Delta t_i$  是足够小的时间段)上所考察的 Ad Hoc 网络参数和结构不变,以下所述结论均在该时间段上有效.为叙述方便,下文中所有时变参数均省略了时间标记  $t$ .

设 Ad Hoc 网络拓扑结构可用无向图  $G(N, L)$  来描述,其中,  $N = \{1, 2, \dots, N\}$  是无线节点集合,  $L = \{1, 2, \dots, L\}$  是无线链路集合.设无线链路  $l \in L$  的传输容量为  $C_l$ ,  $S = \{1, 2, \dots, S\}$  是分享网络资源的多播任务集合(每个与多播任务相关的信息已经事先通过多播路由获得).构成多播任务  $s \in S$  有如下要素:唯一的源节点  $s$ 、接收端集合  $R_s = \{R_{s,i}, i \in I_s = \{1, 2, \dots, n_s\}\}$ 、若干中间节点和无线链路,其中,  $n_s$  是多播任务  $s$  中含有接收端的个数.如果我们把从源节点  $s$  出发经过若干无线链路到达接收端  $R_{s,i}$  的信息流视为多播任务  $s$  中的一个虚任务  $(s, i)$ , 那么,整个网络资源实际上就是被这些虚任务  $(s, i), s \in S, i \in I_s$  所分享.  $L(s, i)$  表示虚任务  $(s, i)$  所经路由上所有链路的集合;  $S(l)$  表示流过链路  $l$  的所有多播任务的集合;  $V_s(l)$  表示任务  $s$  中流经链路  $l$  的所有虚任务的集合.每个接收端  $R_{s,i}$  (或者说虚任务  $(s, i)$ ) 都有一个相应的单调递增且严格凹的二阶连续可微的效用函数与之对应:  $U_{s,i}(x_{s,i}): \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$ , 其中,  $x_{s,i}$  是虚任务  $(s, i)$  的信息请求速率.根据多速率多播实现机制,多播任务  $s$  在无线链路  $l$  的速率  $x_s^l$  应该是该多播组中所有共享该链路的虚任务的请求速率的最大值,即  $x_s^l = \max_{(s,i) \in V_s(l)} x_{s,i}$ .

在 Ad Hoc 网中,通过无线链路  $l$  的信息子流面临两种竞争:(1) 所有从无线链路  $l$  的发射器出发的子流之间相互竞争无线链路  $l$ ; (2) 如果无线链路  $l$  在某些无线链路的干扰范围以内,那么在这些链路上传输的信息子流也会竞争无线链路  $l$  的资源.为了形式化描述子流之间的这种竞争关系,我们引入了无线链路干扰集的概念.无线链路  $l$  的干扰集  $IS_l$  是指那些干扰了信息子流在无线链路  $l$  上传输的无线链路集合.在这些相互竞争的信息子流中,在某个时刻只能有一个信息子流可以真正占用无线链路  $l$ .因此,在干扰集的所有无线链路上传输的信息流的累加速率不能超过无线链路  $l$  的信道容量,有如下表达式:

$$\sum_{k \in IS_l} \sum_{s \in S(k)} x_s^l = \sum_{k \in IS_l} \sum_{s \in S(k)} \max_{(s,i) \in V_s(k)} x_{s,i} \leq C_l \quad (1)$$

结合信息流竞争的新特点,将文献[2]中适用 Internet 的多速率多播效用最大化问题推广,Ad Hoc 网络中多速率多播拥塞控制问题就可以表达成一个非线性优化问题,其目标是最大化所有接收端的总效用,有如下形式:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{x}} U(\mathbf{x}) &= \sum_s \sum_i U_{s,i}(x_{s,i}) \\ \text{s.t.} \quad &\sum_{k \in IS_l} \sum_{s \in S(k)} \max_{(s,i) \in V_s(k)} x_{s,i} \leq C_l, \forall l \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{x} \in \mathbf{X} = \{x_{s,i} \mid x_{s,i}^{\min} \leq x_{s,i} \leq x_{s,i}^{\max}, s \in S, i \in I_s\}$ ,  $x_{s,i}^{\min}$  和  $x_{s,i}^{\max}$  分别是虚任务  $(s, i)$  允许的最小和最大信息传输速率.

由于 Ad Hoc 网络是一个无中心控制器的网络,求解式(2)所描述问题的算法需要满足以下要求:1) 不需要事先将式(2)所描述问题中所有参数的信息收集起来构成完整的式(2)所描述问题的形式;2) 求解方式应能在各接收端和中间节点分布式并行实施,从而提高求解的效率;3) 不需要任何起中心控制器作用的节点进行协调指挥.

## 1.2 分布式求解算法

在式(2)所描述问题中,目标函数是关于虚任务请求速率  $x_{s,i}$  的连续的严格凹函数,而且不等式限制是凸和紧的.所以,基于优化理论,式(2)所描述问题存在着关于虚任务请求速率的唯一最优解.本文采用罚函数法将原问题转化成无约束最优化问题,然后应用次梯度法求解转化后的问题.构造如下形式的罚函数形式:

$$P_l(\mathbf{x}) = \max \left\{ 0, \sum_{k \in IS_l} \sum_{s \in S(k)} \max_{(s,i) \in V_s(k)} x_{s,i} - C_l \right\} \quad (3)$$

因为链路  $l$  上的数据流量超出该链路传输能力是导致网络拥塞的根源,因此,用  $P_l(\mathbf{x})$  来表示网络的拥塞程度是合理的.

基于罚函数法,则上述优化式(2)所描述问题可以转化为无约束最优化问题:

$$\max_{\mathbf{x}} \left[ \sum_s \sum_i U_{s,i}(x_{s,i}) - \sigma P_l(\mathbf{x}) \right] \quad (4)$$

其中,  $\sigma$  被称为惩罚标度因子. 根据文献[8]中定理 9.2.2, 只要惩罚标度因子  $\sigma$  足够大, 从罚函数法转化得到问题的优化解就能任意接近原问题的最优解.

通过次梯度法迭代来求解式(4). 用  $x_{s,i}(n)$  来表示在第  $n$  次迭代时  $x_{s,i}$  的值,  $\alpha(n)$  是在第  $n$  次迭代时的步长, 则接收端(虚任务)的请求速率可按下式更新:

$$\begin{aligned} x_{s,i}(n+1) &= \left[ x_{s,i}(n) + \alpha(n) \left( U'_s(x_{s,i}(n)) - \sigma \sum_l \left( CI_l(n) \sum_{k \in IS_l} \sum_{s \in S(k)} I_{x_{s,i} = \max_{\forall (s,j) \in V_s(k)} x_{s,j}, (s,i) \in V_s(k)} \right) \right) \right]_{x_{s,i}^{\min}}^{x_{s,i}^{\max}} \\ &= \left[ x_{s,i}(n) + \alpha(n) \left( U'_s(x_{s,i}(n)) - \sigma \sum_{m \in L(s,i)} I_{x_{s,i} = \max_{\forall (s,j) \in V_s(m)} x_{s,j}} \left( \sum_{l \in IS_m} CI_l(n) \right) \right) \right]_{x_{s,i}^{\min}}^{x_{s,i}^{\max}} \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $I_z$  是指示函数: 当  $z$  取得真值时,  $I_z=1$ , 否则,  $I_z=0$ ;  $[z]_a^b = \min\{\max\{z, a\}, b\}$ ,  $z$  是实数;  $CI_l(n)$  是在第  $n$  次迭代时无线链路  $l$  的拥塞指示, 按下式计算:

$$CI_l(n) = \begin{cases} 0, & \sum_{k \in IS_l} \sum_{s \in S(k)} \max_{(s,i) \in V_s(k)} x_{s,i}(n) - C_l \leq 0 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

采用类似文献[5]的证明过程, 可以证明式(5)、式(6)构成的迭代算法能够收敛到原式(2)所描述问题的最优解. 证明过程应用了数列  $\|x_{s,i}(n) - x_{s,i}^*\|^2, \forall s, \forall i$  逐渐递减的性质, 其中,  $x_{s,i}^*$  是全局最优解, 这保证了每一次迭代获得的解总是比上一次迭代获得的解更趋向于全局最优解. 限于篇幅, 本文省略这一证明过程.

本算法与一般优化问题的迭代求解算法不同, 具有以下特点:

(1) 本算法是一种分布式算法, 即无线链路  $l$  从它的干扰集内所有无线链路中获取信息流速率  $\sum_{(s,i) \in V_s(k)} x_{s,i}(n), k \in IS_l$  后, 能够独立地执行式(6)获得新的链路拥塞指示; 虚任务  $(s,i)$  在获取所经链路干扰集的总拥塞信息后就能够独立地解出式(5), 获得优化的请求速率, 不需要任何其他虚任务的配合. 每个链路和接收端不需要事先将式(2)所描述问题中所有参数信息收集起来就能并行地执行该算法, 克服了 Ad Hoc 网络无中心控制器的缺点, 并显著提高了问题求解的效率.

(2) 本算法是一种实时算法, 即每一轮迭代时, 通过式(5)中的  $\sum_{l \in IS_m} CI_l(n)$  实时采集无线链路上的与干扰集相关的无线链路拥塞信息, 在此基础上求得的中间解  $x_{s,i}(n+1)$  都立即被用作各接收端的实际请求速率. 这种计算方式特别适合 Ad Hoc 网络拓扑结构无法事先设定的特点. 由于迭代的收敛性(即在网络状态不变的情况下, 每一次迭代获得的解总是比上一次迭代获得的解更趋向于全局最优解), 这不会对网络的运行产生不利的影响.

(3) 式(5)中的  $I_{x_{s,i} = \max_{\forall (s,j) \in V_s(m)} x_{s,j}}$  表明: 当且仅当此虚任务  $(s,i)$  的请求速率  $x_{s,i}$  是多播任务  $s$  中所有经过链路  $l$  的虚任务里的最高请求速率时, 此虚任务才对此链路的干扰集内的所有无线链路的拥塞产生影响. 当一个多播任务  $s$  中所经过链路  $l$  的虚任务里有多个具有最高请求速率时, 采用的策略也是一样的, 不需要像文献[2-6]中那样, 将链路的拥塞指示信息在多个具有最高请求速率的虚任务之间划分, 这也是该算法的优势之一.

上述分布式算法的计算过程可描述如下:

在第  $n$  次迭代过程中, 无线链路  $m$  的算法(在其发射器上执行).

(1) 从无线链路  $m$  干扰集中的所有无线链路  $l, \forall l \in IS_m$  中获取此链路的关于累积数据传输速率的信息  $\sum_{s \in S(l)} x'_s(n)$  和拥塞指示信息  $CI_l$ ;

(2) 当无线链路  $m$  有 2 个或 2 个以上的下行链路时, 无线链路  $m$  需要从下行链路中获取每多播任务的请求速率信息, 从而得到  $\max_{(s,i) \in V_s(m)} x_{s,i}$ , 进一步获得  $\sum_{s \in S(m)} \max_{(s,i) \in V_s(m)} x_{s,i}(n)$ . 当无线链路  $m$  只有 1 个下行链路时, 无线链路  $m$  只需从下行链路中获取每多播任务的具有最大请求速率信息虚任务的序号, 测量得到

$$\sum_{s \in S(m)} \max_{(s,i) \in V_s(m)} x_{s,i}(n);$$

(3) 基于式(6)得到无线链路  $m$  新的拥塞指示  $CI_m$ ;

(4) 将新的无线链路  $m$  拥塞指示信息  $CI_m$  和累积数据传输速率的信息  $\sum_{s \in S(m)} \max_{(s,i) \in V_s(m)} x_{s,i}(n)$  告诉干扰集中的所有其他无线链路;

(5) 将总的拥塞指示信息  $\sum_{l \in IS_m} CI_l$  告诉所有经过链路  $m$  的多播任务中有最高请求速率的虚任务  $(s,i)$ .

在第  $n$  次迭代过程中,接收端  $R_{s,i}$  的算法.

(1) 接收端  $R_{s,i}$  获取信息流所经无线链路的总拥塞指示信息  $\sum_{m \in L(s,i)} I_{x_{s,i} = \max_{\forall (s,j) \in V_s(m)} x_{s,j}} \left( \sum_{l \in IS_m} CI_l(n) \right)$ ;

(2) 基于式(5)调整新的接收端请求速率  $x_{s,i}(n+1)$ ;向它的路径发送关于新的请求速率  $x_{s,i}(n+1)$  的信息.

## 2 自适应优化策略 $AC^2M^2$

应该指出,当且仅当在 Ad Hoc 网络的参数和拓扑结构不变的情况下,第 1 节中基本优化问题的解有效,因此,上述分布式算法原则上只能适用于足够小时间段上的多速率多播拥塞控制问题.而实际上,Ad Hoc 网络参数和拓扑结构的时变性是不可忽略且无法预测的,因此,在应用上述算法求解实际的 Ad Hoc 网络多速率多播拥塞控制问题时,必须考虑这种时变性.本节给出一种基于网络状态检测和滚动优化的自适应拥塞控制策略来解决网络状态的不确定性时变问题.

### 2.1 网络状态检测

由于 Ad Hoc 网络的参数和拓扑结构变化具有不可预测性,无法事先(离线地)建立网络模型,准确预测网络的行为,并在此基础上进行拥塞控制优化.因此,要使拥塞控制能够自动地适应网络变化,网络节点必须能够实时地辨识网络当前所处的状态.

Ad Hoc 网络的参数和拓扑结构变化可分为两类:(1) 网络参数和拓扑结构改变,但未导致原有的路由中断;(2) 网络拓扑结构的突变导致原有的路由中断.这两类变化均导致式(2)所描述问题的约束条件不再有效,因此,必须重新探测网络状态.

事实上,在第 1.2 节给出的迭代求解算法中,已经包含了一种网络状态探测机制,那就是由式(6)定义的无线链路拥塞指示  $CI_l$ .当网络参数或拓扑结构发生变化时,接收端可以通过式(6)的无线链路拥塞指示  $CI_l$  所携带的信息来反映网络的变化情况:源端或接收端的位置变化(包括加入和退出网络)引起虚任务的变化会体现在式(6)中  $(s,i)$  的改变上;中间节点位置的变化引起的无线链路干扰集的变化会体现在式(6)中集合  $IS_l$  内元素的改变上;无线链路容量的变化会体现在式(6)中  $C_l$  的改变上.

当网络状态发生剧烈变化导致原有路由中断时,根据路由中断前网络状况计算出的优化解对于路由中断后的网络状况而言已经不再适合,因此,不必再在老优化解上作迭代修改了.此时,通过无线链路拥塞指示来探测网络状态的机制不能快速、及时地探测到新路由及新路由的连接可用带宽,因此,需要采用网络层反馈和探测包联合机制:发生路由中断处的中间节点及时把“路由中断”的消息通知源端;源端立即以一定的时间间隔发送探测包去探测是否已经有路由可用.一旦有路由可用,探测包就去探测关于新网络状态所允许的数据包传输速率.

所有上述的网络探测机制都是实时进行的,这使得接收端能够实时地辨识网络当前所处的状态,以便及时改变请求速率.

### 2.2 滚动优化

滚动优化是预测控制(predictive control)理论<sup>[9]</sup>中用于适应控制对象不确定性变化的一种系统优化机制,其基本思想是:(1) 在有限长度的时间窗口内求解优化问题;(2) 求解结果被应用后将时间窗口向前推移;(3) 时间窗口每推移一次就启动一次新的优化求解过程.本文借鉴上述思想并结合 Ad Hoc 网络的特点,提出一种适应网络参数和结构变化的多速率多播拥塞控制优化策略.

在第 2.1 节讨论的两种不同情况下,根据网络探测机制的不同,式(5)所构成的分布式算法将以不同的方式运行,来适应网络参数和拓扑结构的改变.

当网络参数和拓扑结构发生改变,但没有发生路由中断时,探测网络状态是通过无线链路拥塞指示  $CI_l(n)$  来实现的;而从式(5)可知, $CI_l(n)$ 的变化也会实时地体现在接收端请求速率的变化;因此,式(5)、式(6)所构成的分布式算法自动地适应了网络状态的变化,此时,接收端请求速率  $x_{s,i}$  的迭代求解继续进行下去,无须做额外的工作。

但必须指出,虽然迭代计算公式(5)在形式上没有发生变化,但实际上,由于反映网络状态变化的基本优化式(2)所描述问题的参数( $s,i$ ), $IS_l$  和  $C_l$  已经发生改变,事实上,式(5)、式(6)所构成的分布式算法已经根据网络变化后的状态启动新的迭代求解过程.网络状态改变前最后一次迭代获得的解,实际上是网络状态变化后新问题求解过程的初始解。

当网络的拓扑结构突变导致了原有路由中断时,采取的策略是:(1) 在路由恢复之前,源端停止发送任何数据包,因为重发的数据仍会因为无法路由而被抛弃,这会浪费网络资源;(2) 立即以一定的时间间隔发送探测包,去探测是否已经有路由可用.一旦有路由可用,探测包中携带的关于新网络状态所允许的数据包传输速率就被接收端设置为在新网络状态的初始请求速率,即作为式(5)的新初始解,开始执行其后的迭代.这样就能快速、及时地探测新路由的连接可用带宽。

总之,基本优化问题的求解都是滚动进行的——每当网络的状态发生变化时,无论原优化问题的迭代求解是否已经收敛,都将启动新的求解过程.这使得优化过程对于 Ad Hoc 网络的变化具有良好的适应性和实时响应性。

### 2.3 AC<sup>2</sup>M<sup>2</sup>的实施流程

将上述网络状态检测和滚动优化方法相结合,可以获得完整的 Ad Hoc 网络自适应多速率多播拥塞控制策略.该策略的实施方案可用流程图 1 表示,其过程如下:

在源端和接收端开始建立连接时,源端用探测包机制来获取网络允许的数据包传输速率,接收端将以此速率作为初始请求速率,即作为基本问题求解算法的初始解,开始迭代执行该算法.每一轮迭代获得的中间解都立即被用作各接收端的实际请求速率。

在迭代执行算法的过程中,如果没有发生“路由中断”,不停地迭代执行基本问题求解算法.即使在迭代执行算法的过程中网络状态已经发生了变化,也继续迭代执行该算法,因为该算法能够自适应网络状态的变化。

在迭代执行算法的过程中,如果有“路由中断”的报告,源端停止发数据包,立即发送探测包,将探测包指示的速率作为初始解开始执行新一轮的迭代。

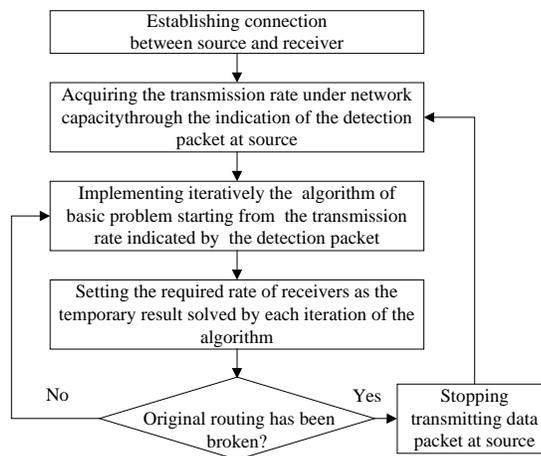


Fig.1 Flow chart of AC<sup>2</sup>M<sup>2</sup>

图 1 AC<sup>2</sup>M<sup>2</sup> 的流程图

### 3 仿真研究

仿真的 Ad Hoc 网络场景如图 2 所示.在 $[0,1] \times [0,1]$ 的平面内,随机分布着 30 个节点,假定节点之间的距离小于 0.25 时,存在无线链路可以直接通信.链路  $l$  干扰集是那些其中点和链路  $l$  的中点之间距离小于 0.25 的所有链路.图 2 的网络场景表现了 3 个阶段的网络状态:在第 1 阶段,网络状态如细线标记;在第 2 阶段,由于  $R_{1,4}$  从原来的位置移动到了  $R'_{1,4}$  的位置,如粗点状线标记;在第 3 阶段,节点  $N_1$  退出了网络,路由发生了中断;节点  $N_2$  从原来的位置移动到了  $N'_2$  的位置形成了新的路由,如粗点划线标记.

设多播任务  $S_1$  和  $S_2$  都经历了网络状态的以上 3 个阶段,与这些多播任务相应的源端、接收端、多播路由标记在图 2 中.各虚任务的信息传输速率限制在 0~1 000 之间.链路 3,4,13 和 14 的容量为 1 000,链路 7(7')和 9(9')的容量为 2 000,链路 10(10')和 12 的容量为 3 000,链路 2,5,6 和 8(8')的容量为 4 000,链路 1 和 11 容量为 5 000.按比例,公平模型<sup>[10]</sup>将总的接收端效用函数设定为  $U(\mathbf{x}) = \sum_{s=1}^2 \sum_{i=1}^4 \log x_{s,i}$ .

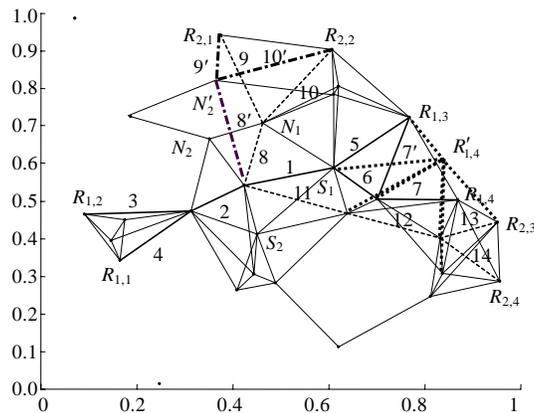


Fig.2 The network scenario

图 2 网络场景

在上述网络场景的基础上进行了两个实验,分别考察网络状态不变的情况下,本文提出了基本问题,式(5)、式(6)所构成的分布式算法的收敛性以及网络状态变动情况下  $AC^2M^2$  的自适应优化性能.所有的实验都是通过 MATLAB 仿真来完成.同时,将相应的优化问题用集中式优化算法(MATLAB 中的最优化工具包)离线解出全局最优解,以便与上述实验结果进行比较.

在第 1 个实验中,假设网络状态维持在第 1 阶段不变,算法由探测包机制获取初始解.考虑到探测包机制指示的速率可能存在测量误差,因此,以全局最优解的 70% 作为基本问题求解算法迭代的初始解考察算法的收敛性能.该项实验的结果如表 1 和图 3 所示.表 1 显示了算法迭代到 300 次时得到的解,这些解与相应全局最优解的最大误差小于 2.5%,其目标函数的相对误差只有 0.01573%,这表明,得到的解已十分接近全局最优解.

图 3 的曲线轨迹显示了接收端请求速率在迭代过程中以振荡的方式渐近收敛于最优解.这种迭代中间解的振荡主要来自两个原因:(1) 式(2)所描述问题的约束项中含有的 Max 函数是不可导的;(2) 由式(6)可知,当某链路上的累加速率在链路容量附近发生变化时,链路的拥塞指示就会在 0,1 之间振荡,由式(5)可知,这样的振荡会导致请求速率的振荡.

在第 2 个实验中,假设当算法迭代到 100 次时,网络状态从第 1 阶段变化到第 2 阶段,但未发生路由中断,因此, $AC^2M^2$  采用了“忽略”策略,继续执行原来的基本问题求解算法.当算法迭代到 200 次时,网络状态从第 2 阶段变化到第 3 阶段,此时发生了路由中断、网络层反馈和新路由重建,因此, $AC^2M^2$  采用了探测包机制.同样考虑测量误差,将新路由真正允许的信息传输速率的 70% 作为路由中断后的新一轮基本问题求解算法的迭代初始解.需要指出的是,这里假定了路由中断、新路由重建和探测包测得信息传输速率都在同一时刻发生,即算法迭代

到 200 次时.

**Table 1** Comparison between the global optimum and the solution by the proposed algorithm

表 1 全局优化解与所提算法解之间的对比

Variables	Global optimum	Solution by the proposed algorithm	Relative error (%)
$x_{11}$	333.387 4	332.119 1	0.380 4
$x_{12}$	333.225 1	333.889 7	0.199 4
$x_{13}$	487.024 3	484.298 0	0.559 8
$x_{14}$	269.463 5	267.895 9	0.581 7
$x_{21}$	556.423 5	554.253 9	0.389 9
$x_{22}$	553.765 5	554.712 9	0.171 7
$x_{23}$	243.512 2	249.143 0	2.312 3
$x_{24}$	243.512 0	249.039 0	2.269 7
Total utility	47.031 5	47.024 1	0.015 73

此外,为了考察  $AC^2M^2$  的优化性能,采用 TCP-Reno 的拥塞控制机制(AIMD 算法)对同样的网络变化场景进行了测试.考虑到本文的篇幅,图 4 只显示了 AIMD 算法的接收端请求速率  $x_{11}$  和  $x_{21}$  的变化情况,其他请求速率的变化情况是类似的.从图 4 可以看到,无论网络状态是否发生变化,AIMD 算法求得的请求速率在迭代过程中始终处于振荡中,并不渐近收敛于任何一个稳定的解.这种情况与文献[11]在 NS 仿真下考察 TCP-Reno 的吞吐量时观察到的结果相符合.

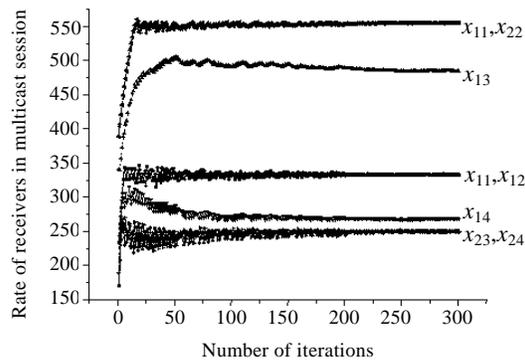


Fig.3 Rate of receivers in groups  $S_1$  and  $S_2$  ( $AC^2M^2$ )  
图 3 多播任务  $S_1$  和  $S_2$  的接收端速率变化( $AC^2M^2$ )

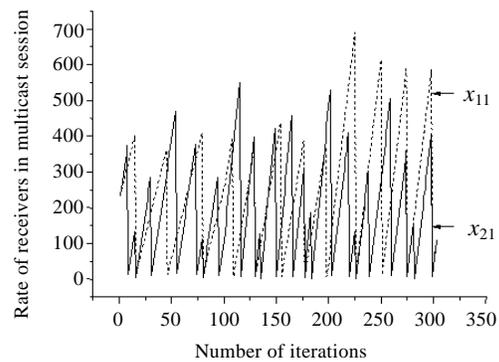


Fig.4 Rate of receivers in groups  $S_1$  and  $S_2$ (AIMD)  
图 4 多播任务  $S_1$  和  $S_2$  的接收端速率变化(AIMD)

同时,我们对 AIMD 算法和  $AC^2M^2$  的在 3 个阶段的总效用函数值与对应的理想总效用函数值作了比较,结果见图 5 和表 2.由图 5 可知,在网络状态变化的每个阶段, $AC^2M^2$  均以相当快的速度渐近收敛于最优目标值.而 AIMD 算法在迭代过程中则呈现出了与图 4 类似的振荡情况.

为了考察系统的总体性能,我们计算了网络变化各阶段总效用函数的时间平均值,表 2 列出了算法在各个阶段都迭代到了 100 次的情况.由表 2 可知, $AC^2M^2$  在网络状态变化的 3 个阶段的平均总效用都非常接近理论上的平均总效用值,最大的相对误差为 0.3909%;而 AIMD 算法的平均总效用和理论上的平均总效用偏差非常大,相对误差最小的也有 14.2853%.由此可见, $AC^2M^2$  所获得的解的性能与 AIMD 算法所获得的解的性能相比要优越得多,能够较好地提高网络性能.

**Table 2** Average total utility and relative error of receivers (Comparison among global optimum,  $AC^2M^2$  and AIMD)

表 2 接收端平均总效用值及相对误差(全局优化解、 $AC^2M^2$  和 AIMD 之间的比较)

Network situation	First stage		Second stage		Third stage	
	Average total utility	Relative error	Average total utility	Relative error	Average total utility	Relative error
Global optimum	47.031 5	0	48.852 1	0	49.701 8	0
$AC^2M^2$	46.928 8	0.218 4%	48.676 1	0.360 3%	49.507 5	0.390 9%
AIMD	40.312 9	14.285 3%	40.509 1	17.078 1%	41.022 1	17.463 6%

为了考察  $AC^2M^2$  对网络的动态变化实时响应性能,我们详细分析了在采用  $AC^2M^2$  策略时,接收端总效用函数的时间平均值( $\sum_1^n$ 接收端总效用函数值)/ $n$ , $n$ 是算法迭代次数)与全局最优的总效用函数值之间的相对误差,其结果如图 6 所示.由图 6 可知, $AC^2M^2$  在 3 个阶段的相对误差都随着迭代过程的不断进行而越来越小,而且都在迭代了 10 次后就能使误差小于 3%,充分说明了  $AC^2M^2$  对网络的动态变化有令人满意的实时响应性.

由式(5)可知,每次算法的迭代,接收端需要所经链路干扰集的总拥塞信息.进行这样一次拥塞信息的交换,即一次算法的迭代需要花费一个 RTT 的时间.通常,一个 RTT 在数毫秒到 10 毫秒的数量级之间<sup>[12]</sup>,由此可以推断出  $AC^2M^2$  接近全局最优的总效用函数值所需的时间很短.

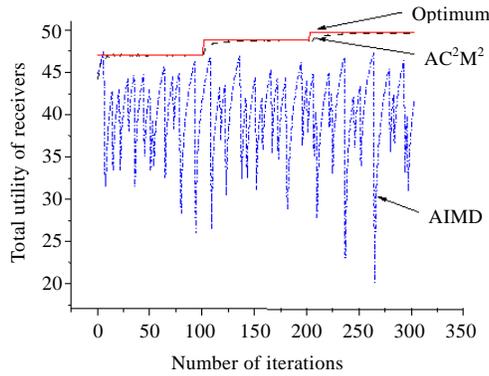


Fig.5 Total utility of receivers (Comparison among global optimum,  $AC^2M^2$  and AIMD)

图 5 接收端总效用函数值(全局优化解、 $AC^2M^2$  和 AIMD 之间的比较)

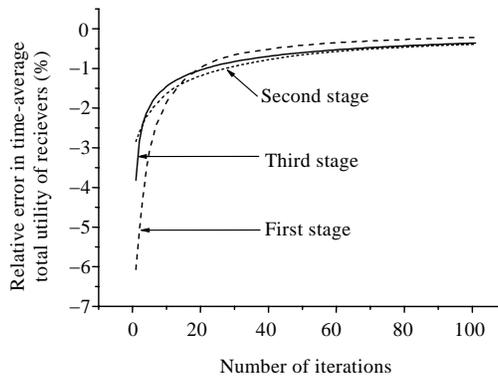


Fig.6 Relative error of time-average total utility of receivers in  $AC^2M^2$

图 6  $AC^2M^2$  中接收端总效用函数时间平均值的相对误差

#### 4 结 论

Ad Hoc 网络的节点变动和无线多跳连接的特点,导致了网络状态不断的变化,信息流竞争的特点与 Internet 显著不同.本文首先从信息流竞争的新特点出发,提出了一种适合在小时间段内网络状态不变的分布式求解算法;然后,针对网络状态的不确定时变性设计了一种基于状态检测和滚动优化的自适应多速率多播拥塞控制策略  $AC^2M^2$ .仿真实验分别考察了分布式求解算法的收敛性、 $AC^2M^2$  的适应性和解的最优性.仿真结果表明, $AC^2M^2$  能够有效提高网络性能.今后值得进一步研究的内容包括: $AC^2M^2$  在信息传输延时情况下的性能,将  $AC^2M^2$  在 NS 中协议化,进一步考察  $AC^2M^2$  在多种网络环境下的相关性能指标,例如吞吐量、时延和传送率.

**References:**

- [1] Chen JH, Guo JH, Wang CC. M3RP: Multi-Rate/Multi-Range multicast routing protocol for mobile ad hoc networks. In: Schmitz R, ed. Proc. of the 63rd IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC 2006-Spring). Helsinki: IEEE Press, 2006. 628–632.
- [2] Kar K, Sarkar S, Tassiulas L. Optimization based rate control for multirate multicast sessions. In: Broder A, ed. Proc. of the 20th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM). Helsinki: IEEE Press, 2001. 123–132.
- [3] Kar K, Tassiulas L. Layered multicast rate control based on Lagrangian relaxation and dynamic programming. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006,24(8):1464–1474.
- [4] Wang WH, Palaniswami M, Low SH. Necessary and sufficient conditions for optimal flow control in multirate multicast networks. IEE Proceedings Communication, 2003,150(5):385–90.
- [5] Kar K, Sarkar S, Tassiulas L. A scalable, low-overhead rate control algorithm for multirate multicast sessions. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002,20(8):1541–1557.
- [6] Deb S, Srikant R. Congestion control for fair resource allocation in networks with multicast flows. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2004,12(2):274–285.
- [7] Xue Y, Li B, Nahrstedt K. Optimal resource allocation in wireless ad hoc networks: A price-based approach. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2006,5(4):347–364.
- [8] Mokhtar S, Bazaraa C, Shetty M. Nonlinear Programming: Theory and Algorithms. New York: Wiley, 1979. 337–339.
- [9] Rawlings JB. Tutorial overview of model predictive control. IEEE Control Systems Magazine, 2000,20(3):38–52.
- [10] Kelly FP, Maulloo A, Tan D. Rate control for communication networks: Shadow prices, proportional fairness and stability. Journal of Operations Research Society, 1998,49(3):237–252.
- [11] Fu Z, Meng X, Lu S. How bad TCP can perform in mobile ad-hoc networks. In: Corradi A, Daneshmand M, eds. Proc. of the 7th Int'l Symp. on Computers and Communications (ISCC). Helsinki: IEEE Press, 2002. 298–303.
- [12] Wang X, Kar K. Cross-Layer rate optimization for proportional fairness in multihop wireless networks with random access. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006,24(8):1548–1559.



徐伟强(1975—),男,浙江杭州人,博士,副教授,主要研究领域为 Ad Hoc 网络,无线传感器网络,拥塞控制,网络资源优化分配,跨层优化.



吴铁军(1950—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为大系统智能控制与优化,人机协同控制与决策,混杂系统智能控制,多智能体分散控制.



汪亚明(1972—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机图像,运动估计,计算机网络,智能算法.



张云华(1965—),男,博士,研究员,主要研究领域为计算机网络,软件工程,计算机控制.



陈积明(1978—),男,博士,副教授,主要研究领域为无线传感器/执行器网络,弱硬实时调度.