

## Ad Hoc 网络节能型功率控制与拥塞控制的跨层优化\*

张永敏<sup>1,2</sup>, 徐伟强<sup>1</sup>, 黄炯<sup>1</sup>, 汪亚明<sup>1</sup>, 舒挺<sup>1</sup>, 刘良桂<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(浙江理工大学 信息学院, 浙江 杭州 310018)

<sup>2</sup>(浙江大学 控制科学与工程学系, 浙江 杭州 310007)

通讯作者: 黄炯, E-mail: hj\_edu03@126.com

**摘要:** 有限的节点能量和通信带宽, 是 Ad Hoc 网络的两个重要的特点. 节点能量是影响网络容量的关键因素, 也是制约网络寿命的决定因素; 而有限的通信带宽使得网络更容易产生拥塞. 因此, 节能型的功率控制与拥塞控制联合优化在 Ad Hoc 网络中显得尤为重要. 首先, 设计了节能型的网络效用最大化问题, 即在目标函数中引入能量消耗成本函数, 从网络效用和网络寿命两个方面来综合优化网络性能. 其次, 运用对偶分解与梯度投影方法, 提出了相应的节能型功率控制与拥塞控制联合优化算法. 另外, 分析和证明了所提算法的收敛性. 最后, 详细的仿真结果表明了所提算法的有效性: 在保持网络吞吐量基本不变的同时, 可以有效地减少节点的能量消耗, 从而延长网络寿命.

**关键词:** Ad Hoc 网络; 网络效用; 能量消耗; 功率控制; 拥塞控制; 对偶分解; 梯度投影法

**中图法分类号:** TP393      **文献标识码:** A

中文引用格式: 张永敏, 徐伟强, 黄炯, 汪亚明, 舒挺, 刘良桂. Ad Hoc 网络节能型功率控制与拥塞控制的跨层优化. 软件学报, 2013, 24(4): 900-914. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4317.htm>

英文引用格式: Zhang YM, Xu WQ, Huang J, Wang YM, Shu T, Liu LG. Optimal cross-layer power control and congestion control providing energy saving for ad hoc networks. Ruanjian Xuebao/Journal of Software, 2013, 24(4): 900-914 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4317.htm>

### Optimal Cross-Layer Power Control and Congestion Control Providing Energy Saving for Ad Hoc Networks

ZHANG Yong-Min<sup>1,2</sup>, XU Wei-Qiang<sup>1</sup>, HUANG Jiong<sup>1</sup>, WANG Ya-Ming<sup>1</sup>, SHU Ting<sup>1</sup>, LIU Liang-Gui<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(School of Information Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

<sup>2</sup>(Department of Control Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China)

Corresponding author: Huang Jiong, E-mail: hj\_edu03@126.com

**Abstract:** The limited energy of the node and the restricted communication bandwidths are two important features of ad hoc networks. The energy of the node is not only a key factor effecting network capacities, but is also a determinant factor in restricting network lifetime. The limited communication bandwidth makes the network more prone to congestion. Hence, it is particular important to design a joint optimal congestion control and power control algorithm by providing energy saving in ad hoc networks. First, the study proposes a network utility maximization problem that provides energy saving, by introducing the cost function of energy consumption to the objective function of the network utility maximization problem, so the performance of the network can be optimized both in the network lifetime and network utility. Secondly, by the dual decomposition method and gradient projection method, the case proposes a joint power control and congestion control algorithm that provides energy saving to solve this problem. In addition, the project analyzes and verifies the convergence of the proposed algorithm. Finally, simulation results in detail are given to demonstrate the efficiency of the proposed algorithm. The network adapt the proposed algorithm can significantly reduce the energy consumption and prolong the network lifetime, while the remaining network throughput basically unchanged.

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61070063, 61101111, 61272311); 教育部重点科学技术研究项目(212066); 浙江省自然科学基金(LY12F02042, LQ12F01009)

收稿时间: 2011-08-19; 修改时间: 2011-11-02, 2012-02-15; 定稿时间: 2012-08-17

**Key words:** ad hoc network; network utility; energy consumption; power control; congestion control; dual decomposition; gradient project method

Ad Hoc 网络中的节点大多数是由电池来提供能量的.由于电池存储的能量有限,因此,能量资源有限就成为 Ad Hoc 网络长时间连续工作的主要障碍<sup>[1]</sup>.功率控制可以使节点在通信过程中根据网络中其他节点的信息选择恰当的功率,从而减少不必要的能量消耗,主动地采取措施以降低能耗.另外,采用功率控制对于降低网络运行成本和节约自然资源也具有重大意义.节点间通信所采用的无线信道受信号衰减、噪声、干扰等多种因素的影响,信道容量十分有限,而且随着时间不断发生变化.因此,Ad Hoc 网络更容易产生拥塞<sup>[2]</sup>.功率控制可以调整链路的功率以及链路之间的干扰级,提高网络中的信道容量,同时降低能耗.拥塞控制可以合理分配网络中的数据流,从而避免造成拥塞,提高网络资源的利用率.因此,功率控制和拥塞控制联合研究是一项非常有意义的工作.

Chiang 针对无线网络提出了一个通用的网络效用最大化问题,设计了一种跨层设计方案,并结合现有的传输控制协议(TCPs)提出了功率控制的分布式算法<sup>[3]</sup>.这种通用的网络效用最大化问题虽然可以使网络的吞吐量达到最大,但是并不能有效地减少节点的能量消耗.另外,Chiang 等人还在基于价格机制的分布式算法<sup>[4]</sup>、延时敏感性网络中的拥塞控制及其稳定性<sup>[5]</sup>、非凸问题的分布式功率控制等方面进行了深入研究<sup>[6]</sup>,取得了丰硕的研究成果,但均未涉及到节能型网络的效用最大化问题.Lee 等人针对随机信道提出了一种随机最优化问题,通过控制各个链路的功率和用户的数据流速率以实现网络效用的最大化,并提出了一种随机功率调度与端到端速率控制的联合优化算法<sup>[7]</sup>.Kulkarni 等人提出了一种调度、功率控制与拥塞控制的联合优化算法,从而使网络中的端到端的数据流速率最大化,其主要贡献可归纳为两个方面:(1) 使用了恰当的物理层模型提升了空间谱的再利用率;(2) 采用计算效率高的注水算法来解决 MILP(mixed integer linear programming problem),从而提升了算法的可扩展性<sup>[8]</sup>.Ghasemi 等人根据源速率、链路的可用容量和链路功率的竞争模型,提出了速率控制与功率控制的联合优化算法,该算法涉及了 3 个网络层,即在物理层进行功率控制,MAC 层进行链路速率的控制,传输层进行源速率控制<sup>[9]</sup>.Loretti 等人提出了一种多跳无线网络多用户的跨层优化算法,当网络使用一种简单的信道接入方案时,该算法能够使节点在接收邻点发送过来的数据的同时计算出能够使网络性能达到最优的端到端速率、路由以及物理层的参数<sup>[10]</sup>.Zheng 等人提出了能量受限的无线传感网络中功率控制与拥塞控制的联合优化算法<sup>[11]</sup>,虽然也可以减少网络节点的能量消耗,但是这种算法是建立在降低网络效用权重的基础上.在高信噪比取近似值的情况下,Papandriopoulos 基于梯度的方法提出了速率和功率分配的次优化算法<sup>[12]</sup>,Nguyen 提出了传统的速率控制和功率控制的联合优化算法<sup>[13]</sup>,但是这两种算法都只是针对传统的网络效用最大化问题.针对无线网络的资源分配问题,Weeraddana 等人提出了跨层资源分配的次优化算法<sup>[14]</sup>,Xiong 等人设计了考虑到延时性能的跨层优化算法<sup>[15]</sup>,Pradeep 等人从路由、调度、功率控制和拥塞控制等几个方面解决资源分配问题<sup>[16]</sup>,Long 等人针对多跳无线网络提出了一种关于端到端速率控制的优化模型及最优化分配方案<sup>[17]</sup>.然而,上述算法设计的主要目的是实现网络效用的最大化,并不能有效减少节点的能量消耗.

本文设计的算法主要是通过传统的网络效用最大化问题的目标函数中引入一个能量消耗的成本函数,从而在追求网络效用最大化的同时考虑网络运行所消耗的能量,避免出现用巨大的能量消耗来换取网络效用小幅度提升的情况.

本文运用拉格朗日对偶分解的方法将该优化问题转化并分解为两个分别与拥塞控制和功率控制相关的对偶问题,然后根据这两个对偶问题分别设计相应的功率控制与拥塞控制算法.本文还分别通过理论证明和 MATLAB 仿真平台验证了所提功率控制与拥塞控制联合优化算法的收敛性,并分析了算法的性能.MATLAB 仿真结果表明:通过本文所提出的功率控制与拥塞控制联合优化算法,可以在保持网络吞吐量基本不变的情况下,有效地减少节点能量消耗,从而延长网络寿命.

## 1 网络模型及问题描述

### 1.1 网络模型

首先,本文的 Ad Hoc 网络模型是建立在以下几个假设的基础之上:

- (1) 网络中所有节点的天线是全向天线,可以接收来自任何方向的信息;
- (2) 网络中的节点静止或移动速度很慢,算法中不考虑节点的移动性.

用一个有向群 $\mathcal{G}(\mathcal{N}, \mathcal{L})$ 来表示 Ad Hoc 网络,其中, $\mathcal{N}=\{1, 2, \dots, N\}$ 表示节点集, $\mathcal{L}=\{1, 2, \dots, L\}$ 表示逻辑链路集.假设在网络中存在一组端到端的多跳数据流,用 $\mathcal{S}=\{1, 2, \dots, S\}$ 来表示,每个数据流  $s$  通过的逻辑链路集用 $\mathcal{L}(s)$ 来表示, $\mathcal{L}(s) \subset \mathcal{L}$ .同样地, $\mathcal{S}(l)$ 表示经过链路  $l$  的数据流集. $\mathbf{R}=[R_{l,s}]$ 表示路由矩阵,当  $l \in \mathcal{L}(s)$ 时, $R_{l,s}=1$ ;否则, $R_{l,s}=0$ . $x_s$  表示源节点  $s$  发送的数据流速率, $P_l$ 表示链路  $l$  所消耗的功率, $\gamma_l$ 表示链路  $l$  的信噪比(SINR).当所有链路在同一时间进行数据传输时,信噪比由以下公式得出:

$$\gamma_l = \frac{P_l G_{ll}}{\sum_{k \neq l} P_k G_{lk} + \eta_l} \quad (1)$$

其中, $G_{lk}$ 表示从链路  $k$  的发送点到链路  $l$  的接收点的路径损耗, $\eta_l$ 表示链路  $l$  的噪声功率.路径损耗最常用的模型将它作为一个距离的函数: $G=d^{-\alpha}$ ,其中, $\alpha$ 是路径损耗系数<sup>[18]</sup>.由于 Ad Hoc 网络中存在很多信道,链路在一个信道中传输数据,不会对在不同信道中传输数据流的链路造成影响,即不存在干扰,因此,链路只会对使用相同信道的链路产生干扰.在无线网络中,链路的容量并非一个固定值,而是取决于该链路的信噪比、调制、误码率和符号周期<sup>[3]</sup>,由以下公式得出:

$$C_l(P) = \frac{1}{K_1} \log(1 + K_2 \gamma_l) \quad (2)$$

其中, $K_1$ 表示符号周期, $K_2$ 表示调制和误码率.为了简化符号,假设在网络中不存在一般性的误码率,而且符号周期为 1,即  $K_1=K_2=1$ .Ad Hoc 网络通信时还需要满足以下几个条件:

- (1) 所有源节点都具有一个最大发送速率  $x_{\max}$ ,源节点根据网络的拥塞状况在 $(0, x_{\max})$ 之间调整发送速率;
- (2) 为了维持网络通信系统的正常运行,节点必须至少保持一个最小的发射功率  $P_{l,\min}$ ,由于能量受限节点的最大发射功率也限制在  $P_{l,\max}$ ,因此,节点的发射功率,即链路  $l$  的功率  $P_l$ 在 $[P_{l,\min}, P_{l,\max}]$ 之间进行调整.

### 1.2 问题描述

用效用函数  $U_s(x_s)$ 来描述源节点  $s$  所发送的数据速率  $x_s$  所产生的网络效用.作为网络效用函数, $U_s(x_s)$ 必须满足以下两个条件:

- (1)  $U_s(x_s)$ 是一个关于速率  $x_s$  的非减的、严格凹的、而且是二阶连续可微的函数;
- (2) 不同的源节点的效用函数可以不同,但是所有  $U_s(x_s)$ 必须满足条件(1).

因此,传统的网络效用函数可以由下式来表示:

$$U(X) = \sum_{s \in \mathcal{S}} U_s(x_s) \quad (3)$$

由于网络中的节点既可以作为源节点发送数据包,也可以作为中继路由器转发来自其他节点的数据包,这就要求节点在无线链路  $l$  上传输的数据流的累加速率不能超过该无线链路的信道容量  $C_l(P)$ ,可表示为

$$\sum_{s \in \mathcal{S}(l)} x_s \leq C_l(P), \forall l \quad (4)$$

只有满足了这个条件,无线网络才能正常通信;否则,就会出现网络拥塞.通过上述假设,传统的网络效用最大化问题可以表示为

$$\text{Maximize } \sum_s U_s(x_s) \quad (5)$$

$$\text{Subject to } \sum_{s \in \mathcal{S}(l)} x_s \leq C_l(P), \forall l \quad (6)$$

$$0 < x_s \leq x_{\max}, \forall s \quad (7)$$

$$P_{l,\min} \leq P_l \leq P_{l,\max}, \forall l \quad (8)$$

在网络效用最大化问题中,需求出的最优化变量为两种:源速率和节点的发射功率(链路功率).虽然网络效用最大化问题可以通过拥塞控制和功率控制,达到减少网络拥塞、使吞吐量最大化的目的,但是传统的网络效用最大化问题的主要目标是网络效用的最大化,而并没有考虑到如何减少节点能耗、延长节点寿命,因此需要设计一种新的协议,使网络效用最大化的同时减少能量消耗.

为了设计一个能量节约型的网络效用最大化问题,本文在网络效用最大化问题的目标函数中引入一个递增的凹函数  $V_l(P_l)$ ,来表示能量消耗的成本,该函数满足以下性质:

$$\frac{d^2 V_l(P_l)}{dP_l^2} P_l + \frac{dV_l(P_l)}{dP_l} \geq 0 \quad (9)$$

此成本函数有以下两种作用:(1) 由于功率消耗会减少目标函数的值,因此系统会尽量减少不必要的能量消耗,从而使链路工作在低能耗的状态;(2) 当某个链路的容量成为源速率传输的瓶颈时,系统会通过比较网络效用和能量消耗的成本来决定是否允许该链路增大功率以及可增大的尺度.通过在目标函数中引入成本函数,可以达到节约能量的目的.

由于链路的容量与链路的信噪比是息息相关的,如果链路的信噪比处于一个非常低的水平,那么链路的容量就会非常小,从而成为数据传输瓶颈.因此,为了能够调整网络的传输瓶颈,本文还引入了一组信噪比的最小限制量  $\gamma_{l,\min}$ ,使信噪比  $\gamma_l$  必须满足:  $\gamma_l \geq \gamma_{l,\min}$ .另外,只有当信噪比的值超过某一水平时,取高信噪比近似值的链路容量和实际的链路的容量才会十分相近.因此,在本文中引入一组信噪比的最小限制量,从而可以使本文提出的算法与实际算法得出的结果更加接近.

综上所述,本设计提出的 Ad Hoc 网络节能型效用最大化问题可以表示如下:

$$\text{Maximize } \sum_{s \in \mathcal{S}} U_s(x_s) - \sum_{l \in \mathcal{L}} V_l(P_l) \quad (10)$$

$$\text{Subject to } \sum_{s \in \mathcal{S}(l)} x_s \leq C_l(P), \forall l \quad (11)$$

$$0 < x_s \leq x_{\max}, \forall s \quad (12)$$

$$P_{l,\min} \leq P_l \leq P_{l,\max}, \forall l \quad (13)$$

$$\gamma_l \geq \gamma_{l,\min}, \forall l \quad (14)$$

在这个 Ad Hoc 网络节能型效用最大化问题中,第 1 组限制条件确保链路中传输的数据流总速率不会超过其链路容量;第 2 组限制条件确定了源速率的调整范围;第 3 组限制条件规定了链路的功率的调整范围;第 4 组限制条件设定了链路的最小信噪比限制.由于链路信噪比与链路容量是息息相关的,因此,第 4 组限制条件也可以看作是针对链路容量的一个限制条件,即

$$C_l(P) = \frac{1}{K_1} \log(1 + K_2 \gamma_l(P)) \geq \frac{1}{K_1} \log(1 + K_2 \gamma_{l,\min}), \forall l \quad (15)$$

由于网络中的信噪比是一个大于 0 的数,因此为了方便计算,可以将限制条件(14)改写成以下形式:

$$\log(\gamma_l) \geq \log(\gamma_{l,\min}), \forall l \quad (16)$$

通过观察 Ad Hoc 网络节能型效用最大化问题可以发现:虽然源速率和链路功率两种变量在目标函数中是相互独立的,但是两个变量是通过限制条件联系起来的.如果要解决 Ad Hoc 网络节能型效用最大化问题,就必须联合控制源速率的拥塞控制技术和控制链路功率的功率控制技术.

## 2 拥塞控制与功率控制联合优化算法

### 2.1 链路容量取近似值

由于在 Ad Hoc 网络节能型效用最大化问题的限制条件(11)中存在链路容量  $C_l(P)$ ,如果无法判断  $C_l(P)$ 的凹

凸性,那么通过凸优化算法得出的局部最优解就不一定是全局最优解,从而使整个问题复杂化.

如果对于链路容量采用高信噪比近似值,然后通过变量替换  $P_l = e^{\tilde{P}_l}$ , 即  $\tilde{P}_l = \log P_l$ , 问题就可以转化为一个关于  $\{x, \tilde{P}\}$  的凸问题,从而保证了局部最优解是整个问题的全局最优解.因此,当信噪比处于一个较高的水平时,采用高信噪比近似值,公式如下:

$$C_l(P) = \frac{1}{K_1} \log(1 + K_2 \gamma_l) \approx \frac{1}{K_1} \log(K_2 \gamma_l) \quad (17)$$

随着信噪比的增大,采用近似值和原链路容量值之间的误差会越来越小,求出的最优解将越来越接近于全局最优解.

## 2.2 拉格朗日对偶分解

Ad Hoc 网络节能型效用最大化问题是一个多变量、多限制条件的最优化问题,可以将它转化成对偶问题来求解,其对偶问题为

$$D: \min_{\lambda, \rho \geq 0} D(\lambda, \rho) \quad (18)$$

对偶问题  $D$  的目标函数为

$$D(\lambda, \rho) = \max_{x, P} L(x, P, \lambda, \rho) \quad (19)$$

因此,Ad Hoc 网络节能型效用最大化问题所对应的拉格朗日函数如下:

$$L(x, P, \lambda, \rho) = \sum_{s \in \mathcal{S}} U_s(x_s) - \sum_{l \in \mathcal{L}} V_l(P_l) - \sum_{l \in \mathcal{L}} \lambda_l \left( \sum_{s \in \mathcal{S}(l)} x_s - C_l(P) \right) - \sum_{l \in \mathcal{L}} \rho_l (\log(\gamma_{l, \min}) - \log(\gamma_l(P))) \quad (20)$$

由于  $\sum_{l \in \mathcal{L}} \lambda_l \sum_{s \in \mathcal{S}(l)} x_s = \sum_{s \in \mathcal{S}} x_s \sum_{l \in \mathcal{L}(s)} \lambda_l$ , 因此,可将拉格朗日函数改写成以下形式:

$$L(x, P, \lambda, \rho) = \sum_{s \in \mathcal{S}} \left( U_s(x_s) - x_s \sum_{l \in \mathcal{L}(s)} \lambda_l \right) - \sum_{l \in \mathcal{L}} V_l(P_l) + \sum_{l \in \mathcal{L}} \lambda_l C_l(P) - \sum_{l \in \mathcal{L}} \rho_l (\log(\gamma_{l, \min}) - \log(\gamma_l(P))) \quad (21)$$

其中,  $\lambda = (\lambda_l, l \in \mathcal{L})$ ,  $\rho = (\rho_l, l \in \mathcal{L})$  是拉格朗日乘子矢量,拉格朗日乘子  $\lambda_l$  和  $\rho_l$  可分别看作是无线链路  $l$  的拥塞系数和信噪比差值权重.观察拉格朗日函数可以发现,该拉格朗日函数按照变量源速率  $x_s$  和链路功率  $P_l$  进行分解,因此,对偶问题  $D$  可以分解为两个子对偶问题  $D_1$  和  $D_2$ ,如下所示:

$$D_1: \min_{\lambda \geq 0} D_1(\lambda) \quad (22)$$

$$D_2: \min_{\lambda, \rho \geq 0} D_2(\lambda, \rho) \quad (23)$$

其目标函数分别为

$$D_1(\lambda) = \max_x L_1(x, \lambda) = \max_x \sum_{s \in \mathcal{S}} \left( U_s(x_s) - x_s \sum_{l \in \mathcal{L}(s)} \lambda_l \right) \quad (24)$$

$$D_2(\lambda, \rho) = \max_P L_2(\lambda, \rho, P) = \max_P \sum_{l \in \mathcal{L}} \lambda_l C_l(P) - \sum_{l \in \mathcal{L}} V_l(P_l) - \sum_{l \in \mathcal{L}} \rho_l (\log(\gamma_{l, \min}) - \log(\gamma_l(P))) \quad (25)$$

对偶子问题  $D_1, D_2$  分别与拥塞控制和功率控制有关.下面两节分别介绍相关的拥塞控制和功率控制算法.

## 2.3 拥塞控制算法

通过对偶分解的方法将 Ad Hoc 网络节能型效用最大化问题分解成两个对偶子问题  $D_1$  和  $D_2$ , 其中,  $D_1$  是通过传输层的拥塞控制来实现的,本节介绍拥塞控制的具体实现算法.

对偶子问题  $D_1$  是一个无约束的非线性规划问题,可以通过梯度投影法来求解这个问题,即拉格朗日乘子  $\lambda_l$  按梯度的相反方向调整.但是拥塞系数  $\lambda_l$  是与整个对偶问题有关的一个变量,所以求解时要从整个对偶问题的角度来求解,得出链路  $l$  的拥塞系数  $\lambda_l$  的更新公式为

$$\lambda_l(n+1) = \left[ \lambda_l(n) - K_\lambda \frac{\partial D(\lambda, \rho)}{\partial \lambda_l} \right]^+ = \left[ \lambda_l(n) - K_\lambda \left( C_l(P(n)) - \sum_{s \in \mathcal{S}(l)} x_s(n) \right) \right]^+ \quad (26)$$

其中,  $n$  是迭代步数,  $K_\lambda$  是  $\lambda$  的迭代步长,  $[z]^+ = \max\{0, z\}$ . 如果把拥塞系数  $\lambda_l$  看作是数据流通过链路  $l$  的拥塞价格, 那么源节点  $s$  通过网络中无线链路  $l \in \mathcal{L}(s)$  传输数据包, 需要支付的路径总拥塞价格为

$$\lambda^s = \sum_{l \in \mathcal{L}(s)} \lambda_l \quad (27)$$

由于网络的效用函数  $U_s(x_s)$  是一个关于  $x_s$  的二阶连续可微, 非减的严格凹函数, 当  $\lambda_l$  为定值时,  $x_s \sum_{l \in \mathcal{L}(s)} \lambda_l$  是一个关于  $x_s$  的线性函数, 因此, 对偶子问题  $D_1(\lambda)$  的目标函数是一个关于  $x_s$  的凹函数. 如果存在一个  $x_s$  使得  $D_1(\lambda)$  的目标函数达到最大值, 那么在  $x_s$  处, 对偶子问题  $D_1(\lambda)$  对  $x_s$  的偏导为 0, 即

$$\frac{\partial D_1(\lambda)}{\partial x_s} = 0, \forall s \quad (28)$$

通过求解公式(26), 可以得出与中间迭代拥塞价格  $\lambda(n)$  相对应的源速率  $x_s(n+1)$ , 即

$$x_s(n+1) = [U_s^{-1}(\lambda^s(n))]_0^{\max} = \left[ U_s^{-1} \left( \sum_{l \in \mathcal{L}(s)} \lambda_l(n) \right) \right]_0^{\max} \quad (29)$$

其中,  $[z]_0^b = \min\{\max\{z, a\}, b\}$ ,  $U_s^{-1}$  表示  $U_s'$  的逆. 如果  $\lambda$  通过迭代收敛到最优解, 那么所有的  $x_s$  也会收敛到最优解, 从而完成网络的拥塞控制. 拥塞控制算法的收敛性将在下文中加以介绍.

#### 2.4 功率控制算法

作为 Ad Hoc 网络节能型效用最大化问题的第 2 个子问题,  $D_2$  与拥塞系数  $\lambda$ 、信噪比差值权重  $\rho$  以及链路的功率  $P$  有关. 由于拥塞系数  $\lambda$  是与整个对偶问题相关的变量, 通过拥塞控制算法中的公式(26)可以得到中间迭代拥塞系数  $\lambda(n)$  的值, 因此, 在设计功率控制算法时, 可以直接使用该拥塞系数的值, 且不必进行重复的工作.

功率控制算法所要解决的问题就是如何设计算法, 通过该算法能够得出满足最小信噪比要求的链路功率的最优解. 首先, 对于信噪比差值权重  $\rho$ , 对偶子问题  $D_2$  为一个无约束的非线性规划问题, 因此, 信噪比差值权重  $\rho$  与拥塞系数  $\lambda$  求解方法相似, 即通过梯度投影法来求解. 信噪比差值权重  $\rho$  可以看作是一个仅与对偶子问题  $D_2$  有关、而与对偶子问题  $D_1$  无直接关系的对偶变量. 无线链路  $l$  的信噪比差值权重  $\rho_l$  的更新公式为

$$\rho_l(n+1) = \left[ \rho_l(n) - K_\rho \frac{\partial D_2(\lambda, \rho)}{\partial \rho_l} \right]^+ = [\rho_l(n) - K_\rho (\log(\gamma_l(n)) - \log(\gamma_{l,\min}))]^+ \quad (30)$$

其中,  $K_\rho$  是  $\rho$  的迭代步长,  $[z]^+ = \max\{0, z\}$ .

在求解第 2 个对偶子问题时, 把拉格朗日乘子  $\rho$  作为信噪比差值权重的同时, 仍需把拉格朗日乘子  $\lambda$  作为拥塞系数, 从而合理地分配链路的功率, 增加链路容量的同时减少网络“瓶颈”处的拥塞. 使用梯度投影法解决这个对偶子问题, 首先需要证明  $L_2(\lambda, \rho, P)$  是关于功率变量  $P$  可微的凸函数. 虽然  $L_2(\lambda, \rho, P)$  是一个非凸问题, 但是通过对变量进行对数变换,  $P_l = e^{\tilde{P}_l}$ , 可以将问题  $L_2(\lambda, \rho, P)$  转化成为一个关于  $\tilde{P}$  的严格凸问题  $L_2(\lambda, \rho, \tilde{P})$ .

$$\begin{aligned} L_2(\lambda, \rho, \tilde{P}) &= \sum_{l \in \mathcal{L}} \lambda_l C_l(\tilde{P}) - \sum_{l \in \mathcal{L}} V_l(\tilde{P}_l) - \sum_{l \in \mathcal{L}} \rho_l (\log(\gamma_{l,\min}) - \log(\gamma_l(\tilde{P}))) \\ &= \sum_{l \in \mathcal{L}} (\lambda_l + \rho_l) \log \left( \frac{G_{ll} e^{\tilde{P}_l}}{\sum_{k \neq l} G_{lk} e^{\tilde{P}_k} + \eta_l} \right) - \sum_{l \in \mathcal{L}} V_l(\tilde{P}_l) - \sum_{l \in \mathcal{L}} \rho_l \log(\gamma_{l,\min}) \\ &= \sum_{l \in \mathcal{L}} (\lambda_l + \rho_l) \left[ \log G_{ll} e^{\tilde{P}_l} - \log \left( \sum_{k \neq l} G_{lk} e^{\tilde{P}_k} + \eta_l \right) \right] - \sum_{l \in \mathcal{L}} V_l(\tilde{P}_l) - \sum_{l \in \mathcal{L}} \rho_l \log(\gamma_{l,\min}) \end{aligned} \quad (31)$$

经过变量替换后,  $L_2(\lambda, \rho, \tilde{P})$  中括号内的第 1 部分是一个线性函数, 第 2 部分对于  $\tilde{P}$  是一个凹函数<sup>[3]</sup>, 根据  $V_l(P_l)$  的定义可知, 它是一个二次可微的凹函数, 而最后一部分则是一个常量, 因此, 经过变量替换后的  $L_2(\lambda, \rho, \tilde{P})$  是一个关于  $\tilde{P}$  二次可微的凸函数.  $L_2(\lambda, \rho, \tilde{P})$  对  $\tilde{P}$  求偏导可以得到:

$$\frac{\partial \mathbf{L}_2(\lambda, \rho, \tilde{P})}{\partial \tilde{P}_l} = (\lambda_l + \rho_l) - \sum_{j \neq l} (\lambda_j + \rho_j) \frac{G_{jl} e^{\tilde{P}_l}}{\sum_{k \neq j} G_{jk} e^{\tilde{P}_k} + \eta_j} - V'_l(e^{\tilde{P}_l}) e^{\tilde{P}_l} \quad (32)$$

将变量还原,则可以得出:

$$\frac{\partial \mathbf{L}_2(\lambda, \rho, P)}{\partial P_l} = \frac{\partial \mathbf{L}_2(\lambda, \rho, \tilde{P})}{\partial \tilde{P}_l} \times \frac{1}{P_l} = \frac{\lambda_l + \rho_l}{P_l} - \sum_{j \neq l} (\lambda_j + \rho_j) \frac{G_{jl}}{\sum_{k \neq j} G_{jk} P_k + \eta_j} - V'_l(P_l) \quad (33)$$

求出了  $\mathbf{L}_2(\lambda, \rho, P)$  关于  $P_l$  的梯度,无线链路  $l$  根据拥塞价格  $\lambda(n)$ 、信噪比差值权重  $\rho(n)$  以及信道中携带的其他链路的信息  $P(n)$  来调整链路功率  $P_l(n+1)$ , 公式如下:

$$P_l(n+1) = \left[ P_l(n) + K_p \left( \frac{\partial \mathbf{L}_2(\lambda, \rho, P)}{\partial P_l} \right) \right]_{P_{l,\min}}^{P_{l,\max}} \\ = \left[ P_l(n) + K_p \left( \frac{\lambda_l(n) + \rho_l(n)}{P_l(n)} - V'_l(P_l(n)) - \sum_{j \neq l} (\lambda_j(n) + \rho_j(n)) \frac{G_{jl}}{\sum_{k \neq j} G_{jk} P_k(n) + \eta_j} \right) \right]_{P_{l,\min}}^{P_{l,\max}} \quad (34)$$

其中,  $K_p$  是其迭代步长. 为了简化公式, 引入一个信息量函数  $m(n) = \{m_j(n), j \in \mathcal{L}\}$ , 定义如下:

$$m_j(n) = \frac{(\lambda_j(n) + \rho_j(n)) \gamma_j(n)}{G_{jj} P_j(n)} \quad (35)$$

由  $m_j$  的定义可知, 它携带了链路  $j$  的很多信息, 包括当前的拥塞系数、信噪比差值权重、信噪比、链路功率以及路径损耗, 而且其值的计算完全可以在链路  $j$  的发射节点内完成, 并发送给其他相关链路. 因此, 功率控制算法如下:

$$P_l(n+1) = \left[ P_l(n) + K_p \left( \frac{\lambda_l(n) + \rho_l(n)}{P_l(n)} - \sum_{j \neq l} G_{lj} m_j(n) - V'_l(P_l(n)) \right) \right]_{P_{l,\min}}^{P_{l,\max}} \quad (36)$$

信噪比差值权重(公式(30))、信息量函数(公式(34))和链路功率(公式(36))的迭代算法构成了在物理层的功率控制算法, 但是在算法的执行过程中, 需要手动调整信噪比差值权重  $\rho(n+1)$  和链路功率  $P_l(n+1)$  的迭代步长, 从而保证算法的收敛性. 功率控制算法的收敛性说明将在下节加以介绍.

## 2.5 算法描述

上面提出的拥塞控制算法和功率控制算法是联合执行且密切相关的. 本节将介绍算法的执行流程以及算法的主要特点. 虽然拥塞控制算法是在源节点执行的, 而功率控制算法是在链路的发射节点执行的, 但是这两种算法是通过拉格朗日乘子  $\lambda$  紧密联系在一起, 因此, 它们需要联合起来分布式地执行, 其执行步骤如下所示:

在第  $n$  次迭代时:

**Algorithm 1.** 链路的发射节点中执行的算法.

- (1) 收集相关链路的功率  $P(n)$  以及路径损耗矩阵  $G$ , 根据式(37)计算本链路的信噪比:

$$\gamma_l(n) = \frac{P_l(n) G_{ll}}{\sum_{k \neq l} P_k(n) G_{lk} + \eta_l} \quad (37)$$

- (2) 根据链路的信噪比, 通过式(38)更新链路容量  $C_l(n)$ :

$$C_l(n) = \log(\gamma_l(n)) \quad (38)$$

- (3) 根据通过本链路发送的源速率以及本链路的容量, 根据式(39)计算链路的拥塞系数  $\lambda_l(n+1)$ , 并将拥塞信息发送给相关节点:

$$\lambda_l(n+1) = \left[ \lambda_l(n) - K_\lambda \left( C_l(n) - \sum_{s \in \mathcal{S}(l)} x_s(n) \right) \right]^+ \quad (39)$$

- (4) 得出链路的信噪比 $\gamma_l(n)$ 后,根据式(40)更新链路的信噪比差值权重 $\rho_l(n+1)$ :

$$\rho_l(n+1)=[\rho_l(n)-K_\rho(\log(\gamma_l(n))-\log(\gamma_{l,\min}))]^+ \quad (40)$$

- (5) 根据拥塞系数 $\lambda_l(n)$ 、信噪比差值权重 $\rho_l(n)$ 、信噪比 $\gamma_l(n)$ 、链路功率 $P_l(n)$ 以及路径损耗 $G_{ll}$ ,由式(41)更新信息量函数,并将信息发送给相关节点:

$$m_l(n)=\frac{(\lambda_l(n)+\rho_l(n))\gamma_l(n)}{G_{ll}P_l(n)} \quad (41)$$

- (6) 根据接收到的其他节点的信息量函数 $m(n)$ ,以及本链路的拥塞系数 $\lambda_l(n)$ 、信噪比差值权重 $\rho_l(n)$ 、消耗价格 $V_l'(P_l(n))$ 和路径损耗 $G$ ,由式(42)更新链路的功率 $P_l(n+1)$ ,并将链路的功率信息发送给相关节点:

$$P_l(n+1)=\left[P_l(n)+K_p\left(\frac{\lambda_l(n)+\rho_l(n)}{P_l(n)}-\sum_{j \neq l} G_{lj}m_j(n)-V_l'(P_l(n))\right)\right]_{P_{l,\min}}^{P_{l,\max}} \quad (42)$$

**Algorithm 2.** 源节点中执行的算法.

- (1) 源节点 $s$ 处收集它发送的数据所经链路的拥塞信息,即拥塞系数 $\lambda_l(n), l \in \mathcal{L}(s)$ ,然后根据公式(43)更新其总拥塞价格:

$$\lambda^s(n)=\sum_{l \in \mathcal{L}(s)} \lambda_l(n) \quad (43)$$

- (2) 源节点根据路径的总拥塞价格 $\lambda^s(n)$ 调整其发送数据的速率 $x_s(n+1)$ ,即

$$x_s(n+1)=[U_s'^{-1}(\lambda^s(n))]_0^{x_s^{\max}} \quad (44)$$

以上就是整个拥塞控制算法和功率控制算法的联合优化步骤.由于算法的收敛性与变量的迭代步长存在着密切的联系,因此需要将链路拥塞系数 $\lambda_l(n+1)$ 、信噪比差值权重 $\rho_l(n+1)$ 和链路功率 $P_l(n+1)$ 的迭代步长设置得尽量小,以确保算法的收敛性.

## 2.6 收敛性分析

虽然本文通过对整个算法进行仿真,仿真的结果验证了算法的收敛性,但是仍需要分析算法的收敛性.原对偶问题可以分解成为两个对偶子问题,因此,收敛性分析也可以分成拥塞控制算法的收敛性分析和功率控制算法的收敛性分析.

对于拥塞控制的分布式算法的收敛性分析如下所示:

根据库恩-塔克定理<sup>[19]</sup>,如果存在一组对偶问题的最优化解 $\lambda^*$ ,那么 $x(\lambda^*)$ 即为原问题的最优化解,因此,拥塞系数和源速率具有一致的收敛性.对于使用投影梯度算法求解的对偶凸优化问题,证明其算法收敛的一种常用方法就是证明算法的步长 $K_\lambda$ 满足 $0 < K_\lambda < 2/K$ ,其中, $K$ 是对偶目标函数的 Lipschitz 常数<sup>[20]</sup>.

**定理 1.** 如果一个对偶目标问题对于其变量是连续可微的,且目标函数是凸函数,则该对偶目标问题必然存在 Lipschitz 常数.

证明:首先,将对偶变量写成如下形式:

$$\lambda=(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_L)^T \quad (45)$$

对偶子问题 $D$ 对变量 $\lambda$ 求导可以得出:

$$\nabla_\lambda D=C-Rx(\lambda^s) \quad (46)$$

定义 $s_R=\|R\|$ ,其中, $\|\cdot\|$ 表示常用的矩阵范数,根据范数的定义及性质可得到式(47):

$$\|\nabla D(\lambda(n))-\nabla D(\lambda(n+1))\|_2 \leq s_R \|X(\lambda^s(n))-X(\lambda^s(n+1))\|_F \quad (47)$$

其中, $\|\cdot\|_F$ 表示矩阵的 $F$ 范数,用 $p^1$ 和 $p^2$ 分别表示对应的价格变量 $\lambda^s(n)$ 和 $\lambda^s(n+1)$ .

另外,定义 $\tilde{p}_s^{\max}=U_s'(x_s^{\max}), \Pi_s(p)=U_s'^{-1}(p)$ ,则可以得出:

$$\|X(\lambda^s(n))-X(\lambda^s(n+1))\|_F \leq \max_s |\Pi_s'(\tilde{p}_s^{\max})| \cdot \|p^1 - p^2\|_F \quad (48)$$

以及



$$\|p^1 - p^2\|_F \leq 2 \max(s_R) \|\lambda(n) - \lambda(n+1)\|_2 \tag{49}$$

综合不等式(47)~不等式(49),可以得出:

$$\|\nabla D(\lambda(n)) - \nabla D(\lambda(n+1))\|_2 \leq 2(s_R) \times \max(s_R) \max_s |II'_s(\tilde{p}_s^{\max})| \cdot \|\lambda(n) - \lambda(n+1)\|_2 \tag{50}$$

因此,∇D 的 Lipschitz 常数为

$$K = 2(s_R) \times 2 \max(s_R) \max_s |II'_s(\tilde{p}_s^{\max})| \tag{51}$$

得证.因此,当迭代步长  $K_\lambda$  满足  $0 < K_\lambda < 2/K$  时,拥塞控制算法是收敛的. □

功率控制的分布式算法的收敛性分析如下:

当顺着梯度方向的步长为最优时,基于梯度方法的迭代是收敛的<sup>[21]</sup>.本文提出的功率控制算法就是基于梯度的最优化方法来求解对偶子问题  $D_2$ ,其迭代步长为  $K_P$ .如果对偶子问题  $D_2$  具有 Lipschitz 连续性质,即

$$\|\nabla D_2(P_1) - \nabla D_2(P_2)\| \leq L \|P_1 - P_2\|, L > 0 \tag{52}$$

而且如果功率的迭代步长足够小,使得  $\varepsilon \leq K_P \leq (2-\varepsilon)/L, \varepsilon > 0$ ,那么功率控制算法是收敛的.如果  $D_2$  的 Hessian 矩阵  $H$  的 2 阶范数是有限的,那么它就具有 Lipschitz 连续性质<sup>[3]</sup>.

**定理 2.** 如果一个对偶目标问题的目标函数是连续可微的,且其 Hessian 矩阵  $H$  的 1 阶范数与无穷阶范数均有界,则该对偶目标问题必然存在 Lipschitz 常数.

证明:对偶子问题  $D_2$  的 Hessian 矩阵中的元素如式(53)所示:

$$H_{ll} = \sum_{j \neq l} (\lambda_j + \rho_j) \left( \frac{G_{jl}}{\sum_{k \neq j} G_{jk} P_k + n_l} \right)^2 - \frac{\lambda_l + \rho_l}{P_l^2} - V''(P_l) \tag{53}$$

$$H_{li} = \sum_{j \neq l, i} \frac{(\lambda_j + \rho_j) G_{jl} G_{ji}}{\left( \sum_{k \neq j} G_{jk} P_k + n_l \right)^2}, i \neq l \tag{54}$$

由于 Hessian 矩阵中所有的变量拥塞系数  $\lambda$ 、信噪比差值权重  $\rho$ 、链路功率  $P$  的取值范围均为正数,且存在上限,因此 Hessian 矩阵的 2 阶范数是有上限的,且其上限可以通过下面不等式来估计:

$$\|H\|_2 \leq \sqrt{\|H\|_1 \|H\|_\infty} \tag{55}$$

其中,  $\|H\|_1 = \max_j \sum_i |H_{ij}|, \|H\|_\infty = \max_i \sum_j |H_{ij}|$ . 因此,存在 Lipschitz 常数  $L'$ ,满足

$$(L')^2 = \max_i \left( \sum_l \sum_{j \neq l, i} \frac{(\lambda_j + \rho_j) G_{jl} G_{ji}}{\left( \sum_{k \neq j} G_{jk} P_k + n_l \right)^2} + \left| \sum_{j \neq l} (\lambda_j + \rho_j) \left( \frac{G_{jl}}{\sum_{k \neq j} G_{jk} P_k + n_l} \right)^2 - \frac{\lambda_l + \rho_l}{P_l^2} - V_l''(P_l) \right| \right) \times \max_l \left( \sum_i \sum_{j \neq l, i} \frac{(\lambda_j + \rho_j) G_{jl} G_{ji}}{\left( \sum_{k \neq j} G_{jk} P_k + n_l \right)^2} + \left| \sum_{j \neq l} (\lambda_j + \rho_j) \left( \frac{G_{jl}}{\sum_{k \neq j} G_{jk} P_k + n_l} \right)^2 - \frac{\lambda_l + \rho_l}{P_l^2} - V_l''(P_l) \right| \right) \tag{56}$$

得证.当步长  $K_P$  满足以下条件时,功率控制算法收敛

$$\varepsilon \leq K_P \leq (2-\varepsilon)/(L') \tag{57}$$

其中,  $\varepsilon$  是  $(0, 2/(1+L'))$  区间的任意数.由于拥塞系数  $\lambda$  和源速率  $x$  具有一致的收敛性,而使用梯度法求解的所有变量均收敛于最小最大化问题的鞍点<sup>[22]</sup>,因此,功率控制算法与拥塞控制算法的收敛具有一致性. □

链路容量  $C_l$  可以转化成为一个关于  $\tilde{P}$  的凸函数,因此,限制条件(11)可以转化成为一个关于  $(x, \tilde{P})$  的凹函数:  $\sum_{s \in S(l)} x_s - C_l(P) \leq 0, \forall l$ . 那么,整个网络效用最大化问题可以转化成为一个目标函数是一个严格的凸函数、

限制条件为凹函数的最大化问题.因此,算法收敛于全局最优解<sup>[3]</sup>.

### 3 仿真及性能分析

#### 3.1 仿真模型及参数

本文仿真所使用的 Ad Hoc 网络是一个简单的网络拓扑,如图 1 所示.该网络由 25 个节点构成,各节点均可与周围相邻节点形成链路.网络模型中只标注了源节点传输数据所需要的链路以及各个源节点发出的数据流.假设网络模型中的相邻节点之间的距离  $d_0$  是相同的,即  $d_0=200\text{m}$ ,那么链路  $i$  和链路  $j$  之间的距离  $d_{ij}$  的值为链路  $i$  的发送节点到链路  $j$  的接收节点之间的距离.链路  $l$  的最小和最大消耗功率分别为  $P_{l,\min}=1\text{mW}$ ,  $P_{l,\max}=15\text{mW}$ ,源速率在  $[0,30]$  之间调整.假设在该网络中存在 3 个端到端的数据流,分别用  $s_1, s_2$  和  $s_3$  来表示,数据流  $s_1$  经过的链路为 1,2,3,4;数据流  $s_2$  经过的链路为 5,6,7,8;而数据流  $s_3$  经过的链路为 9,10,11,12.

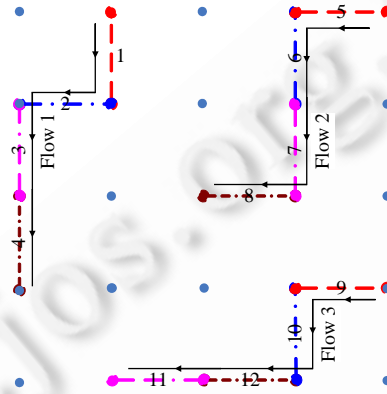


Fig.1 A simple network topology

图 1 简单网络拓扑

本文所仿真的 Ad Hoc 网络采用了 TDMA 机制进行链路调度.在 TDMA 链路调度中,将每个单位时间片划分成多个时隙,再将这些时隙按某种原则方式分配给各个链路.TDMA 的链路调度方式出现在许多关于 Ad Hoc 网络的研究文献中,如文献[23].在本仿真模型中,每一个时间片均匀划分成 4 个时隙.在第 1 个时隙,只有链路 1、链路 5、链路 9 激活;在第 2 个时隙,只有链路 2、链路 6、链路 10 激活;在第 3 个时隙,只有链路 3、链路 7、链路 11 激活;在第 4 个时隙,只有链路 4、链路 8、链路 12 激活.

#### 3.2 仿真结果及性能分析

本文主要通过 MATLAB 仿真平台来验证我们所提出的算法.首先,根据 MATLAB 中提供的优化工具箱用集中式求解最优化问题,得到全局最优解.然后,使用 MATLAB 根据本文所提出的分布式算法求解最优化问题,并与集中式所求得的全局最优解进行比较,从而对本文所提出的最优化算法的性能进行分析.

通过 MATLAB 提供的优化工具箱,用集中式算法求解最优化问题得到的全局最优解与本文提出的分布式算法求出的结果对比情况见表 1 和表 2.

**Table 1** Objective function difference and source rates difference between the results of centralized algorithm and distributed algorithm

表 1 集中式和分布式算法得出的源速率及目标函数结果对比

变量	集中式	分布式	相对误差(%)
$x_1$	3.439 2	3.439 419	0.006 368
$x_2$	2.576 6	2.576 644	0.001 698
$x_3$	2.948 8	2.948 914	0.003 874
目标函数	35.223 3	35.458 66	0.668 199

**Table 2** Power difference and SINR difference between the results of centralized algorithm and the distributed algorithm

表 2 集中式和分布式算法得出的功率及信噪比结果对比

链路编号	集中式		分布式		相对误差(%)	
	功率	信噪比	功率	信噪比	功率	信噪比
1	2.137 1	31.163 5	2.142 261	31.238 53	0.241 487	0.240 747
2	2.219 4	31.163 5	2.215 443	31.111 01	-0.178 29	-0.168 43
3	1	48.064	1	48.059 93	0	-0.008 48
4	2.564 1	31.163 5	2.564 062	31.162 04	-0.001 49	-0.004 69
5	1	31.714 8	1	31.663 11	0	-0.162 98
6	1	30.111 4	1	30.158 46	0	0.156 29
7	1	60.756 4	1	60.752 56	0	-0.006 31
8	1	13.152 8	1	13.152 58	0	-0.001 7
9	1	43.848 9	1	43.790 45	0	-0.133 31
10	1.446 4	19.083 3	1.445 371	19.076 85	-0.071 14	-0.033 79
11	1.064 6	19.083 3	1.064 72	19.086 41	0.011 237	0.016 318
12	1.255 7	19.083 3	1.255 76	19.084 29	0.004 764	0.005 197

通过对表 1 和表 2 显示的集中式算法与分布式算法结果的比较可以发现,本文提出的分布式算法所得出的结果与集中式所得出的结果之间的误差都很小.因此,可以得出一个结论:通过本文提出的分布式算法来求解 Ad Hoc 网络节能型效用最大化问题,可以得到全局最优解.

通过本文所提出的拥塞控制与功率控制分布式算法来求解 Ad Hoc 网络节能型效用最大化问题,在求解的过程中,源速率  $x$  和目标函数、链路功率  $P$ 、链路容量  $C$  以及链路的拥塞系数  $\lambda$  的变化曲线分别如图 2~图 5 所示.分布式算法中的所有变量均收敛,且其收敛值与全局最优解是一致的,这就验证了拥塞控制与功率控制的联合优化算法具有收敛性,并求出了最优化问题的解.

通过对图 2 和图 3 的变化曲线以及最优解取值的比较,当算法的迭代次数达到 400 次时,分布式算法得到的结果已经与全局最优解非常接近了.链路 4 的功率在所有链路的功率中是最大的,而且链路 4 的拥塞系数也是比较大的,因此我们可以得出一个结论:链路 4 是源速率的瓶颈.虽然链路 4 的功率并没有达到最大发射功率,增大链路 4 的功率就可以增大链路 4 的容量,但是由于 Ad Hoc 网络节能型效用最大化问题中存在成本函数  $V_i(P_i)$ ,增大链路功率所带来的网络效用的值比能量消耗成本的变化量  $\Delta V_i(P_i)$  要小,因此,系统选择保持链路 4 的功率不变.如果在传统的网络效用最大化问题中,为了不使自身链路成为传输速率的瓶颈,该链路会一直增大链路功率,至到达链路功率最大值.从而,本算法相对于传统的网络效用最大化问题,可以极大地降低节点的发送功率,降低节点能耗,从而达到节约能量的目的.

通过观察图 4 可以发现,链路的容量全部集中在 2 和 4 之间,没有出现特别大或特别小的链路容量值,这正是通过节点间的合作来完成的.由于存在最小信噪比限制  $\gamma_{i,\min}=13$ ,因此链路的容量也得到了限制,而源速率主要是由其传输路径中的容量瓶颈来决定的.由于能量消耗成本函数  $V_i(P_i)$  的存在,如果链路的容量并不是数据传输速率的瓶颈,那么增加链路功率不但不会增大网络效用,反而会减小 Ad Hoc 网络节能型效用最大化的目标函数.因此,当链路的容量不是数据传输速率的瓶颈时,链路会尽量减小自己的功率,直到成为数据传输速率的瓶颈或达到链路功率最小值.

另外,最小信噪比限制  $\gamma_{i,\min}$  限制了链路信噪比的最小值,其作用就是为了限制网络中最小的链路容量,进而限制了源速率的最小值.但是由于网络中各个节点的能量是有限的,而且同时激活的节点之间存在竞争,因此对于特定的网络,必然会存在一个最小信噪比限制的上限.例如在本仿真模型中, $\gamma_{i,\min}$  的上限为 18.37,当  $\gamma_{i,\min}$  取 19 或以上的值时,算法无法得到满足该条件的最优解.因此,要根据网络的性能及参数来选取适当的  $\gamma_{i,\min}$ .

观察图 5,每个源节点发送的数据所经过的链路中均存在一个链路拥有较大的拥塞系数,即  $x_1$  经过的链路 4 的拥塞系数  $\lambda_4$ ;  $x_2$  经过的链路 8 的拥塞系数  $\lambda_8$  以及  $x_3$  经过的链路 12 的拥塞系数  $\lambda_{12}$ .这是由于链路 4、链路 8、链路 12 分别是源速率  $x_1, x_2, x_3$  的容量瓶颈,从而具有较大的拥塞系数.在这种轻微拥塞的状态下,Ad Hoc 网络节能型效用最大化问题得到了全局最优解.

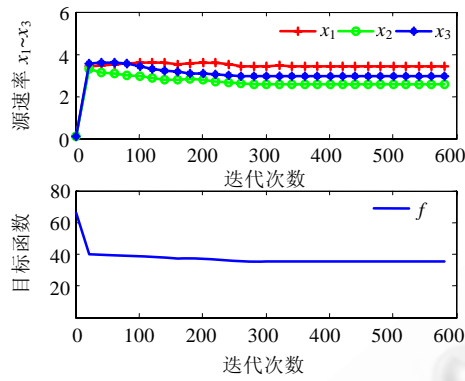


Fig.2 Trend of source rates  $x$  and objective function during execution of distributed algorithm

图 2 分布式算法执行过程中源速率  $x$  和目标函数的变化趋势

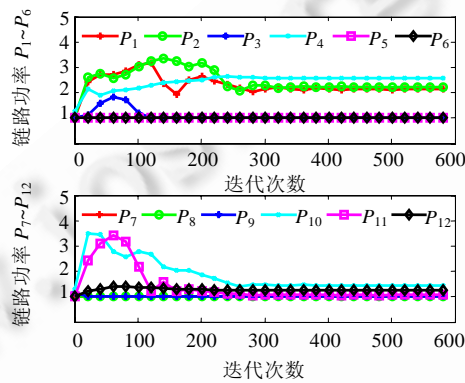


Fig.3 Trend of link powers  $P$  during execution of distributed algorithm

图 3 分布式算法执行过程中链路功率  $P$  的变化趋势

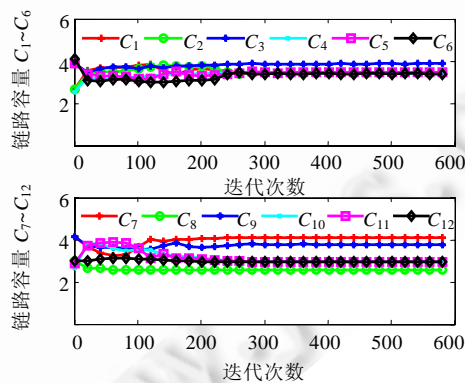


Fig.4 Trend of link capacities  $C$  during execution of distributed algorithm

图 4 分布式算法执行过程中链路容量  $C$  的变化

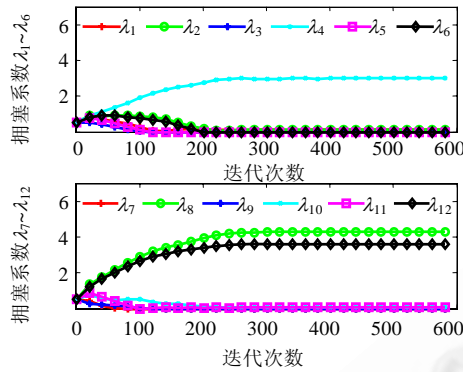


Fig.5 Trend of congestion  $\lambda$  during execution of distributed algorithm  
图 5 分布式算法执行过程中拥塞系数 $\lambda$ 的变化

3.3 能量消耗成本对网络性能的影响

本文提出的 Ad Hoc 网络节能型效用最大化问题是通过扩展传统的网络效用最大化问题而得到的,但是与传统网络效用最大化问题的不同在于,本系统引入了能量消耗成本  $V_i(P_i)$ ,从而达到了节约节点能量、延长网络寿命的目的.不同的能量消耗成本  $V_i(P_i)$ 所对应的全局最优解见表 3.当能量消耗成本函数取值为 0 时,这时得到的最优解与 Chiang 提出的 JOCP<sup>[3]</sup>的解是相同的,即传统网络效用最大化问题的最优解.随着能效消耗成本函数的不断增大,网络的吞吐量发生的变化非常小,但是节点的能量消耗却减少了约 75%.可见,Ad Hoc 网络节能型网络效用最大化问题与传统的网络效用最大化问题相比,可以有效地减少节点的能量消耗,从而延长网络寿命.

Table 3 Effect of energy consumption cost on network performance  
表 3 能量消耗成本对网络性能的影响

变量名称	惩罚系数					
	0 (JOCP <sup>[3]</sup> )	0.000 05	0.000 5	0.005	0.05	0.5
$x_1$	3.493 5	3.493 8	3.493 1	3.487 3	3.439 2	2.920 1
$x_2$	2.564 9	2.564 9	2.564 9	2.564 9	2.576 6	2.906 3
$x_3$	2.924 1	2.923 8	2.923 5	2.923 9	2.948 8	2.906 3
总速率	8.982 5	8.982 5	8.981 5	8.976 1	8.964 6	8.732 7
$P_1$	8.873	8.869 8	2.255 4	2.242 2	2.137 1	1.271 7
$P_2$	10.265 7	10.278 2	2.356 4	2.323 9	2.219 4	1.303 2
$P_3$	1.870 2	1.671	1	1	1	1
$P_4$	15	15	8.525 7	2.686 1	2.564 1	1.451 7
$P_5$	1.484 5	1.314 3	1	1	1	1
$P_6$	2.685 2	2.378 7	1	1	1	1
$P_7$	1.000 6	1	1	1	1	1
$P_8$	5.558 4	5.556 6	3.159 8	1	1	1
$P_9$	1.273 6	1.224 5	1	1	1	1
$P_{10}$	7.182 5	7.157 6	1.425 4	1.422 3	1.446 4	1.287
$P_{11}$	3.447 4	3.467 5	1.038	1.038 4	1.064 6	1.020 3
$P_{12}$	6.935 2	6.931 8	3.941 1	1.247 6	1.255 7	1
消耗总功率	65.576 3	64.85	27.701 8	16.960 5	16.687 3	13.333 9

与传统网络效用最大化问题相比,本算法的优势在于考虑了网络的能量消耗成本.以链路 4 为例,在不考虑能量成本时,为了不使链路 4 成为源速率的传输瓶颈,不断增大链路 4 的功率以增大其链路容量,同时也增大了对同时激活的其他链路(链路 8 和链路 12)的干扰,致使其链路 8 和链路 12 的容量减小.而为了保持链路 8 和链路 12 的链路容量也会增大其功率,反过来导致链路 4 的容量减小.如此循环,必然会导致某一链路的功率达到最大功率.当考虑网络的能量消耗成本(如系数为 0.05)时,就要综合考虑增大或减小链路 4 的功率所带来的网络效用与能量消耗成本的关系,从而不会盲目地增大链路 4 的功率.另外,如果与链路 4 同时激活的链路(链路 8 或链

路 12)的功率降低了,那么链路 4 受到的干扰也会降低.由于存在能量消耗成本,也会导致链路 4 的功率降低,反过来导致链路 8 和链路 12 的功率降低.如此循环,必然会导致某一链路的功率达到最小功率.

通过观察表 3 的数据可以发现,如果惩罚系数处于一个合理的范围内,随着惩罚系数的不断增大,源速率并不会太大的变化,但是各个链路的消耗功率均减小了.如果惩罚系数过小,就无法有效地节约能量,如  $V_i(P_i)=0.00005P_i$ ,这时,Ad Hoc 网络节能型效用最大化问题的最优解与原网络效用最大化问题的最优解基本上是相同的,这就无法达到节约能量的目的.但是,如果惩罚系数过大,如  $V_i(P_i)=0.5P_i$ ,就会导致增大链路功率所带来的网络效用小于能量消耗成本,使节点均以尽量小的能量消耗来发送数据,即链路功率均很小,从而导致所有源数据速率几乎是一致的,无法实现网络资源的合理化分配,达不到有效利用网络资源的目的.因此,在设计 Ad Hoc 网络节能型效用最大化问题时,要根据节点的能量消耗情况以及网络效用函数的定义来选择能量消耗惩罚函数  $V_i(P_i)$ .

#### 4 结 论

本文通过对传统的网络效用最大化函数进行扩展,提出了 Ad Hoc 网络节能型效用最大化问题,并推导出拥塞控制与功率控制的联合优化算法,使得网络中源节点和中继节点能够以分布式合作的方式,取得 Ad Hoc 网络节能型效用最大化问题的最优解,即使得网络效用最大化的同时能量消耗尽量少.本文还分析了算法的收敛性,通过 MATLAB 仿真平台验证了所提出的算法,并对算法的性能进行了分析,得出结论:本文提出的算法可以在减少节点能量消耗,延长网络寿命的同时,使网络吞吐量最大化.

由于无线 Ad Hoc 网络的特殊性,在对其进行跨层的功率控制与拥塞控制联合优化时面临巨大的挑战.本文的研究工作还不够完善,还有很多的相关问题值得进一步研究:

- (1) 设计自适应调整的步长,加快算法的收敛速度;
- (2) 针对动态拓扑设计跨层优化算法;
- (3) 根据实际可用的带宽来设计跨层优化算法;
- (4) 考虑延时和丢包的跨层优化设计.

#### References:

- [1] Chlamtac I, Conti M, Liu JJN. Mobile ad hoc networking: Imperatives and challenges. *Ad Hoc Networks*, 2003,1(1):13-64. [doi: 10.1016/S1570-8705(03)00013-1]
- [2] Theodore SR. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2nd ed., Bergen County: Prentice Hall PTR, 2002. 20-46.
- [3] Chiang M. Balancing transport and physical Layers in wireless multihop networks: Jointly optimal congestion control and power control. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005,23(1):104-116. [doi: 10.1109/JSAC.2004.837347]
- [4] Jang WL, Chiang M, Calderbank AR. Price-Based distributed algorithms for rate-reliability tradeoff in network utility maximization. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006,24(5):962-976. [doi: 10.1109/JSAC.2006.872877]
- [5] Li Y, Papachristodoulou A, Chiang M, Calderbank AR. Congestion control and its stability in network with delay sensitive traffic. *Computer Networks*, 2011,55(1):20-32. [doi: 10.1016/j.comnet.2010.07.001]
- [6] Qian LP, Zhang YJ, Chiang M. Globally optimal distributed power control for nonconcave utility maximization. In: *Proc. of the IEEE Global Communication Conf. (GLOBECOM 2010)*. Miami, 2010. 1-6. [doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5683657]
- [7] Lee JW, Mazumdar RR, Shroff NB. Joint opportunistic power scheduling and end-to-end rate control for wireless ad hoc networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2007,56(2):801-809. [doi: 10.1109/TVT.2006.889567]
- [8] Kulkarni GS, Raghunathan V, Srivastava MB. Joint end-to-end scheduling, power control and rate control in multi-hop wireless networks. In: *Proc. of the IEEE Global Communication Conf. (GLOBECOM 2004)*. 2004. 3357-3362. [doi: 10.1109/GLOCOM.2004.1378971]
- [9] Ghasemi A, Faez K. Jointly rate and power control in contention based MultiHop wireless networks. *Computer Communications*, 2007,30(9):2021-2031. [doi: 10.1016/j.comcom.2007.03.006]



- [10] Loretto S, Soldati P, Johansson M. Cross-Layer optimization of multi-hop radio networks with multi-user detectors. In: Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC 2005). 2005. 2201–2206. [doi: 10.1109/WCNC.2005.1424858]
- [11] Zheng M, Yu HB, Zheng JY, Liang W, Zeng P. Joint rate control and routing for energy-constrained wireless sensor networks. In: Proc. of the Joint 48th IEEE Conf. on Decision and Control and 28th Chinese Control Conf. (CDC/CCC 2009). Shanghai, 2009. 2004–2009. [doi: 10.1109/CDC.2009.5400058]
- [12] Papandriopoulos J, Dey S, Evans J. Optimal and distributed protocols for cross-layer design of physical and transport layers in MANETs. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2008,16(6):1392–1405. [doi: 10.1109/TNET.2008.918099]
- [13] Nguyen HT, Choong SH. Joint rate and power control in wireless network: A novel successive approximations method. IEEE Communications Letters, 2009,14(9):872–874. [doi: 10.1109/LCOMM.2010.080210.100759]
- [14] Weeraddana C, Codreanu M, Latva-Aho M. Cross-Layer resource allocation for wireless networks via signomial programming. In: Proc. of the IEEE Global Communication Conf. (GLOBECOM 2009). Honolulu, 2009. 1–6. [doi: 10.1109/GLOCOM.2009.5425355]
- [15] Xiong HZ, Li RG, Eryilmaz A, Ekici E. Delay-Aware cross-layer design for network utility maximization in multi-hop networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011,29(5):951–959. [doi: 10.1109/JSAC.2011.110505]
- [16] Pradeep CW, Marian C, Matti L, Anthony E. Resource allocation for cross-layer utility maximization in wireless networks. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2011,60(6):2790–2809. [doi: 10.1109/TVT.2011.2157544]
- [17] Long CN, Li B, Zhang Q, Zhao B, Yang B, Guan XP. The end-to-end rate control in multiple-hop wireless networks: Cross-Layer formulation and optimal allocation. IEEE Journal on Selected Areas in Communications (Special Issue on Communication and Control), 2008,26(4):719–731. [doi: 10.1109/JSAC.2008.080513]
- [18] Goldsmith A. Wireless Communications. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 35–36.
- [19] Mokhtar S, Bazaraa C, Shetty M. Nonlinear Programming: Theory and Algorithms. New York: Wiley, 1979.
- [20] Trichakis N, Zymnis A, Boyd S. Dynamic network utility maximization with delivery contracts. In: Proc. of the Int'l Federation of Automatic Control (IFAC 2008). Seoul, 2008. 2907–2912. <http://www.ifac-papersonline.net/Detailed/36212.html>
- [21] Bertsekas DP. Nonlinear Programming. 2nd ed., Belmont: Athena Scientific, 1999.
- [22] Bertsekas DP, Nedic E, Ozdaglar A. Convex Analysis and Optimization. Belmont: Athena Scientific, 2003.
- [23] Djukic P, Valaee S. Delay aware link scheduling for multi-hop TDMA wireless networks. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2009, 17(3):870–883. [doi: 10.1109/TNET.2008.2005219]



张永敏(1983—),男,河北内丘人,硕士,主要研究领域为 Ad Hoc 网络,无线传感器网络的跨层优化,分布式优化,资源的优化分配.

E-mail: nqzym@163.com



徐伟强(1975—),男,博士,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.

E-mail: wqxu@zstu.edu.cn



黄炯(1977—),男,讲师,主要研究领域为无线网络,网络协议,电子商务.

E-mail: hj\_edu03@126.com



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.

E-mail: ywang@zstu.edu.cn



舒挺(1979—),男,博士,副教授,主要研究领域为协议形式化测试,Ad Hoc 网络.

E-mail: shuting@zstu.edu.cn



刘良桂(1975—),男,博士,副教授,主要研究领域为无线网络,路由协议.

E-mail: liangguiliu@126.com