

基于机会约束规划的无线 Mesh 网跨层优化算法^{*}

李可维¹, 柳 彬¹, 徐正喜¹, 徐争光²

(1. 武汉第二船舶设计研究所, 武汉 430064; 2. 华中科技大学 电子与信息工程系, 武汉 430074)

摘 要: 以无线 Mesh 网的联合拥塞控制与功率控制为优化目标, 针对网络中的不可控数据流与无线传播环境的时变随机性两类随机性因素, 结合随机网络效用最大化理论, 建立了无线 Mesh 网的跨层联合优化模型。将无线 Mesh 网络中的不可控数据流和时变无线传播的干扰建模为随机变量, 采用机会约束规划方法进行分析, 最后利用遗传算法求解该随机优化问题, 并进行了仿真验证。仿真结果反映了网络速率、节点发射功率与链路置信水平三者之间的定量制约关系。

关键词: 无线网状网; 拥塞控制; 随机优化; 多无线多信道; 跨层优化

中图分类号: TN915.02; TP301.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)06-2306-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.06.081

Cross-layer optimization algorithm for wireless Mesh networks based on chance constrained programming

LI Ke-wei¹, LIU Bin¹, XU Zheng-xi¹, XU Zheng-guang²

(1. Wuhan Second Ship Design & Research Institute, Wuhan 430064, China; 2. Dept. of Electronics & Information Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper proposed a stochastic model for joint optimal congestion control and power allocation in multi-radio multi-channel networks. It formulated the design problem as a network utility maximization subject to some constraints, which was a chance constrained programming. The model characterized the stochastic network flow and time-varying wireless environment in Mesh networks based on the stochastic network utility maximization. It used the genetic algorithm to solve the stochastic optimization problem. Simulations show that the results obtained by the chance constrained programming present the quantity relationship of network throughput, transmission power and link confidence level.

Key words: wireless Mesh network; congestion control; stochastic optimization; multi-radio multi-channel; cross-layer optimization

0 引言

近年来,无线 Mesh 网络以其组网方便、可扩展性好以及成本较低等优点受到了学术界的关注^[1]。由于频繁的信道冲突,传统利用单无线接口和单信道为所有的网络节点提供接入的 Mesh 组网方式很难获得更大的网络吞吐量。为了解决这一问题,一种方案就是采用支持多无线多信道技术的 Mesh 路由器实现大容量组网。当 Mesh 节点使用多个无线接口时,各无线接口可同时工作在多个信道上,使得该节点可无冲突地和多个邻居节点同时通信,从而大幅提高了网络吞吐率。现有无线 Mesh 网中广泛使用的 IEEE 802.11 系列标准均支持多个信道,为该技术发展提供了基础。

针对多无线多信道无线网络,众多研究者以优化网络性能为目的,采用网络效用最大化方法^[2,3]得到了一些具有重要理论意义的成果。文献[2,4]估计基于线性规划的多无线多信道网络容量的上界。文献[5]提出了一种联合信道分配、调度与路由的多无线多信道网络容量优化算法。文献[6]综合考

虑了网络的拥塞控制、链路调度与信道分配的联合跨层优化。文献[7]设计了联合拥塞控制与功率分配的多无线多信道 Mesh 网络分布式跨层优化算法。

上述各研究工作构建网络模型均为确定性的优化模型,优化变量与条件是确定性变量,对应的优化问题也是确定性的数学规划。而在现实中的无线 Mesh 网络中,还有一些随机因素,它们对网络性能有着不可忽视的影响,如无线传播环境的随机噪声、不可控的 UDP 数据流等。这些随机因素的存在造成了在许多情况下确定性跨层优化模型的失真。为了弥补这种不足,需要引入随机性方法描述非确定性因素。随机网络效用最大化正是随机优化理论与网络效用最大化方法结合的产物。基于这种随机网络优化的思想,文献[8]将信道随机离散化为不可压的有限状态马尔可夫链,分析了网络效用最大化分布式算法在该模型下的稳定性。文献[9]提出由于无线信道的天然损耗性,注入速率与网络效用应该考虑为有效速率与有效效用。

本文基于随机网络效用最大化^[10]方法,针对无线 Mesh 网中的不可控数据流与时变无线信道两个随机因素,将联合拥塞

收稿日期: 2011-09-09; 修回日期: 2011-10-19 基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(2010QN032)

作者简介: 李可维(1980-),男,湖北黄石人,工程师,博士,主要研究方向为通信与自动化(Slikewei@126.com); 柳彬(1982-),男,工程师,硕士,主要研究方向为电力电子; 徐正喜(1963-),男,研究员,博士,主要研究方向为电力系统; 徐争光(1981-),男,讲师,博士,主要研究方向为无线通信。

控制与功率控制的跨层优化问题建模为一个机会约束规划,引入随机变量与随机条件,利用遗传算法进行了求解与仿真验证。

1 网络模型与优化问题

1.1 问题背景

无线 Mesh 网处于时变的状态中,众多随机因素影响网络的性能。这其中比较重要的有以下两点:

1) 不可控流量

无线 Mesh 网络承载的业务流多种多样,而各类业务的网络流的特点不尽相同。一些需要长时间大流量可靠连接的 TCP 数据流具有较好的可控性,如文件传输等,它们可用拥塞控制机制主动调整网络注入速率。但在网络中还有一些不可控或者不需要控制的数据流,如基于 UDP 的多媒体数据流、应用层协议造成的突发性包到达过程以及某些存在时间很短的数据流(典型的有 Web mice 数据流^[11])等。这一类数据流不需要控制或者无法控制,它们的流量往往呈现出随机特性。

2) 时变无线传播环境

无线链路传输环境存在多径衰落与信道间互干扰,使得无线信道容量会随机变化。信道 l 的容量 c_l 如下所示:

$$c_l(p_l) = w \log(1 + \text{KSIR}_l(p)), \forall l \quad (1)$$

其中: p 是链路发射功率, w 为带宽。

链路 l 的信干比 γ_l 定义为

$$\gamma_l = \frac{p_l G_{ll}}{\sum_{k \neq l} p_k G_{lk} + \sigma_l} \quad (2)$$

其中: σ_l 为环境噪声功率。实际网络的环境噪声是随机变化的,但在确定性模型中,一般以随机变量 σ_l 的数学期望替代 σ_l ,而在本文随机模型中,环境噪声功率 σ_l 为随机变量本身。

在跨层优化中加入以上两个因素将更加真实地反映网络状态。第一个因素反映了网络中的不可控流量;第二个因素加入了环境噪声随机变量,更准确地描述了无线信道容量。它们将使得优化模型更加贴近实际网络。

1.2 网络模型

根据多无线多信道网络的特点,通信节点的各无线接口可使用不同的正交频分信道进行数据的发送或接收。不同节点的各无线接口若同时使用同一个正交信道会产生同频干扰,同一个节点的多个无线接口不能使用相同信道。设整个网络共有 M 个在使用的正交信道,各链路占用的信道已由某种信道分配算法所确定。

设源节点集合为 S ,目的节点集合为 D 。对于一个确定路由,设源节点为 s ,目的节点为 d 的数据流,用记号 (s, d) 来表示,设该数据流的速率为 $x_{s,d}$,同时设 $x_{\max}$ 与 $x_{\min}$ 分别为传输速率 $x_{s,d}$ 的上下限,于是有

$$x_{\min} \leq x_{s,d} \leq x_{\max} \quad (3)$$

以节点 s 为发送端的所有链路所构成的集合为 $O(s)$,所有经过链路 l 的数据流的集合记为 $R(l)$ 。源节点 s 与目的节点 d 之间的路由构成链路组成的集合,记为 $L(s, d)$ 。

对于链路所承载的所有数据流,其速率之和小于该链路的容量,但与确定性模型不同的是,该处考虑网络中的随机流量,即满足关系:

$$\sum_{(s,d) \in R(l)} x_{s,d} + \xi_l \leq C_l^{(k,u)} \quad \forall l \quad (4)$$

其中: $C_l^{(k,u)}$ 表示链路 l 的容量,发送端为无线接口 u 且使用无线信道 k ;随机变量 ξ_l 为链路 l 承载的随机流量。由于随机变量 ξ_l 的存在,式(4)没有明确的数学含义。为此,加入置信水平 α 得到

$$\Pr\left\{\sum_{(s,d) \in R(l)} x_{s,d} + \xi_l \leq C_l^{(k,u)}, \forall l\right\} \geq \alpha \quad (5)$$

该式含义就是网络中所有链路满足条件(4)的概率不小于置信水平 α ,即链路 l 拥塞的概率不大于 $1 - \alpha$ 。

可假设网络中各链路对应的随机变量是独立的,单独设置各链路的置信水平 α_l ,于是有

$$\Pr\left\{\sum_{(s,d) \in R(l)} x_{s,d} + \xi_l \leq C_l^{(k,u)}\right\} \geq \alpha_l \quad \forall l \quad (6)$$

从网络服务质量的角度来看,置信水平可作为一种网络 QoS 的度量指标,当 α_l 较大时,满足用户需求速率的概率越大,反之则越小。

若某条路由由 n 条链路组成,第 l 条链路的置信水平为 $\alpha^{(l)}$,于是整条路径的置信水平 α 可认为是

$$\alpha = \prod_{l=1}^n \alpha^{(l)} \quad (7)$$

反之,若需要路径的置信水平达到 α ,可将各链路置信水平设为 $(\alpha)^{\frac{1}{n}}$,或者根据需求和链路状况的不同设定各链路各自的置信水平。

假定带宽与调制方式确定,则链路容量是关于功率变量的函数,包括本链路发送端功率,以及对发送端产生干扰的其他链路的发射功率。引入功率向量 P_k 描述相互干扰的同频功率变量,它的分量为同使用正交信道 k 的链路的发射功率。无线信道建模采用受限干扰信道(interference-limited model)模型^[12]。若链路 l 使用无线信道 k ,设 σ_l 为链路 l 的噪声功率, G_{lj} 为链路 j 的发送端与链路 l 接收端之间的增益,于是链路 l 的信干比为

$$\gamma_l(P_k) = \frac{G_{ll} p_l}{\sigma_l + \sum_{j \neq l} G_{lj} p_j} \quad (8)$$

其中: p_l, p_j 均为 P_k 的分量,即同使用信道 k 。设 W_l 为链路 l 的带宽,则由香农公式可知链路 l 容量为

$$C_l(P_k) = W_l \log(1 + \gamma_l(P_k)) \quad (9)$$

设链路 l 的传输功率 p_l 上限为 $p_l^{\max}$,则对于每条链路有

$$p_l \leq p_l^{\max} \quad \forall l \quad (10)$$

这里与确定性问题不同的是, σ_l 是随机变量,而不再是一个确定的参量。

采用网络效用^[3,8-10]来衡量网络性能,设从源节点 s 到目的节点 d 的数据流的效用函数为 $U_{s,d}(x_{s,d})$,于是整个网络的效用为 $\sum_{s \in S} \sum_{d \in D} U_{s,d}(x_{s,d})$ 。网络的优化目标是使得整个网络的效用最大,即解决数学规划问题:

$$\begin{aligned} & \max_{\{x, p\}} \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} U_{s,d}(x_{s,d}) \\ \text{s. t. } & \Pr\left\{\sum_{(s,d) \in R(l)} x_{s,d} + \xi_l \leq C_l^{(k,u)}\right\} \geq \alpha_l \quad \forall l \\ & C_l^{(k,u)}(P_k) = W_l \log\left(1 + \frac{G_{ll} p_l}{\sigma_l + \sum_{j \neq l} G_{lj} p_j}\right) \\ & p_l \leq p_l^{\max} \\ & x_{\min} \leq x_{s,d} \leq x_{\max} \end{aligned} \quad (11)$$

该优化问题的优化变量为网络注入速率 $x_{s,d}$ 与链路发射功率 p_l ,问题解为最优注入速率与最优的链路发射功率。随机参量 ξ_l 表示随机数据流,它的概率分布函数可从网络业务的

历史数据拟合得到;环境噪声参量 σ_l 目前也已有多种技术可估计其分布函数。

2 优化问题分析

观察优化问题式(11)的结构可知,若置信水平 α_l 越小,可行解集就越大,那么速率 $x_{s,d}$ 也可能越大,但同时不满足限制条件的概率也越大,即服务越不可靠;反之,若置信水平 α_l 变大,可行解集就变小,那么 $x_{s,d}$ 也可能越小,但不满足限制条件的概率变小,即服务更可靠,同时速率改变也会影响到功率的变化。也就是说,网络注入速率、发射功率与链路置信水平三者之间存在着制约关系。

根据限制条件式(6)的结构,问题式(11)可以视为一个机会约束规划问题。机会约束规划由 Charnes 和 Cooper^[13] 提出,它主要针对约束条件中含有随机变量,并且允许一定程度上违反约束条件的随机规划问题。对于一个有随机参数 ξ 的数学优化模型:

$$\begin{aligned} & \max_x f(x, \xi) \\ \text{s. t. } & g_j(x, \xi) \leq 0, j=1, 2, \dots, p \end{aligned} \quad (12)$$

因为随机变量 ξ 的存在,使得最大化操作与约束条件的不等号没有明确的数学含义,于是可引入概率计算,从而得到对应的机会约束规划:

$$\begin{aligned} & \max_x f' \\ \text{s. t. } & Pr\{g_j(x, \xi) \leq 0, j=1, 2, \dots, p\} \geq \alpha \\ & Pr\{f(x, \xi) \geq f'\} \geq \beta \end{aligned} \quad (13)$$

其中: $Pr\{\cdot\}$ 表示概率, α 为置信水平。

一些特殊形式的机会约束规划可以通过合适的变形转换为确定性规划从而方便求解。但一般的机会约束规划问题难以转换,通常采用遗传算法等启发式算法来计算其最优值^[13]。问题式(11)形式较为复杂,在实际情况中随机变量 σ_l 的概率分布函数甚至可能没有合适的显式表达式,而仅以离散值的形式出现,所以宜采用遗传算法来求解。

3 仿真分析

仿真实验在有 9 个通信节点所构成的多信道 Hyacinth 网络^[14] 中进行,整个仿真区域设为 500 m × 1 000 m 的矩形。Hyacinth 网络是一个树型的结构,网关节点是生成树的根,各节点的上行链路网卡连接父节点,使用的信道由父节点指定;各子节点由多个下行链路网卡连接。生成树的构造算法类似于 IEEE 802.1D 的生成树算法。设实验网络共有 a、b、c、d 四条正交信道,网络拓扑与信道分配如图 1 所示。

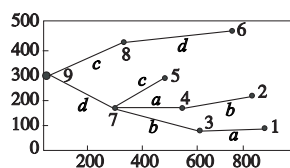


图1 仿真实验网络拓扑结构

节点 1~6 有一个或两个无线接口作为发送端,分别使用两条信道建立相应的输出链路。各无线接口最大功率设为 10 mW,各信道带宽 W 为 50 Mbps。各链路的噪声功率 σ_l 服从 $N(0.2, 0.25)$ 的正态分布,链路增益为 $G_{ij} = 1/d_{ij}^4$, d_{ij} 表示链路 j

发送端到链路 l 接收端间的距离。整个网络有四条可控数据流,如表 1 所示。网络效用函数为比例公平效用函数^[7] $U_{s,d}(x_{s,d}) = \log(x_{s,d})$ 。此外网络中还有三条随机数据流 ξ_l , 分别服从在区间 $[2, 4.6]$ 的均匀分布、参数为 0.5 的指数分布、 $N(2, 0.4)$ 的正态分布。各条链路的置信区间 α_l 分别设为 0.70, 0.80 与 0.98。

表 1 仿真数据流

数据编号	源节点	目的节点	路由
数据流 1	1	9	1-3-7-9
数据流 2	2	9	2-4-7-9
数据流 3	5	9	5-7-9
数据流 4	6	9	6-8-9
随机数据流 1	3	9	3-7-9
随机数据流 2	5	9	5-7-9
随机数据流 3	8	9	8-9

由上节的分析,采用标准的遗传算法求解问题。图 2 是当链路置信水平为 0.7 时采用遗传算法的迭代收敛过程。图中横轴表示迭代步,各点表示某迭代步所有染色体中的最佳适应度。从图 2 中可以看到,整个过程逐步收敛到最优值。随着迭代的进行,各染色体越来越接近最优解,适应度也越来越大。类似地,图 3、4 是各链路置信水平分别为 0.8 与 0.98 时遗传算法的迭代收敛过程。

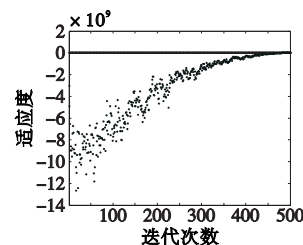


图2 链路置信水平为0.7的迭代收敛过程

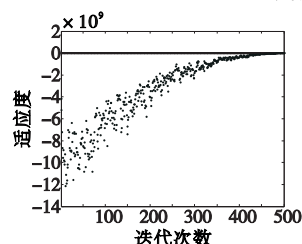


图3 链路置信水平为0.8的迭代收敛过程

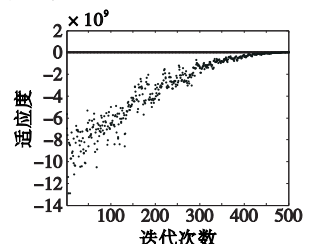


图4 链路置信水平为0.98的迭代收敛过程

设 x_1, x_2, x_3, x_4 分别为数据流 1、2、3、4 的注入速率, $p_5 \sim p_{12}$ 表示节点 5~12 的发射功率。三种情况下的最优解如表 2、3 所示。从结果可以看到,为了确保链路通信成功率,当置信水平增大时,也就是传输速率可靠性的要求提高时,数据流将会适当减小注入速率。较低的速率在随机因素的影响下,更有可能被链路所支持,即要达到较高的链路置信水平,网络注入速率应该更保守些,但与此同时网络吞吐量将会下降。当链路置信水平较低时,即可靠性要求降低时,数据流将会适当增大注入速率,使得网络吞吐量上升。一般当节点注入速率增大,相应路径上的节点均需要增大发送功率,但对邻居节点的干扰同时加大,又影响了其他节点的速率,本模型从网络整体最优出发,将会对各节点的发射功率进行相应调整以适应数据率的变化。

表 2 最优速率

链路置信水平	x_1/Kbps	x_2/Kbps	x_3/Kbps	x_4/Kbps
0.70	12.90	14.45	21.52	64.20
0.80	3.98	9.92	17.71	22.97
0.98	3.65	2.83	14.54	5.62

表 3 最优发射功率

链路置信水平	p_5/mW	p_6/mW	p_7/mW	p_8/mW	p_9/mW	p_{10}/mW	p_{11}/mW	p_{12}/mW
0.70	10.56	12.73	11.29	11.96	1.53	10.54	7.63	9.55
0.80	8.16	8.42	4.75	5.41	3.19	8.41	6.79	7.34
0.98	7.19	4.43	9.22	7.45	1.86	2.89	10.25	9.82

4 结束语

本文基于机会约束规划,结合网络效用最大化方法建立了无线 Mesh 网络的跨层优化模型。将无线 Mesh 网中的不可控数据流与时变无线传播环境两种随机因素建模为随机变量,提出了一种基于机会约束规划的联合拥塞控制与功率控制的优化模型,并利用遗传算法对其进行了仿真验证。本文提出的模型可以作为多信道无线 Mesh 网络设计与优化的参考模型,但由于是非分布式算法,更适合于小规模网络的应用,在以后的工作中将设计相应的分布式优化算法,使其能适合大规模无线 Mesh 网络的分布式需求。

参考文献:

[1] AKYLIDIZ I, WANG Xu-dong, WANG Wei-lin. Wireless Mesh networks; a survey [J]. Elsevier Journal on Computer Network, 2005,47(3):445-487.

[2] ALICHERRY M, BATHIA R, LI L. Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multi-radio wireless Mesh networks[C]//Proc of the 11th Annual International Conference on MobileCom. New York:ACM Press,2005:58-72.

[3] CHIANG M, LOW S H, CALDERBANK A R, *et al.* Layering as optimization decomposition: a mathematical theory of network architec-

tures[J]. Proceedings of the IEEE,2007,95(1):255-311.

[4] RASOOL S, LIN Xiao-ju. A distributed joint channel assignment, scheduling and routing algorithm for multi-channel Ad hoc wireless networks[C]//Proc of the 26th IEEE Conference on Computer Communications. [S. l.]:IEEE Press,2007:1118-1126.

[5] MERLIN S, VAIDYA N, ZORZI M. Resource allocation in multi-radio multi-channel multi-hop wireless networks[C]//Proc of the 27th IEEE INFOCOM Conference on Computer Communications. [S. l.]: IEEE Press,2008:610-618.

[6] LI Ke-wei, WANG Fu-rong, ZHANG Yang, *et al.* Distributed joint resource allocation in multi-radio multi-channel wireless Mesh networks[C]//Proc of the 28th IEEE Global Communications Conference. Piscataway:IEEE Press,2009:708-713.

[7] 李可维,涂来,王芙蓉,等. 联合速率控制与功率分配的多信道无线网络跨层优化[J]. 电子学报,2009,37(6):1203-1209.

[8] CHEN L, LOW S H, CHIANG M, *et al.* Joint optimal congestion control, routing, and scheduling in wireless Ad hoc networks[C]// Proc of IEEE Conference on Computer Communications. [S. l.]: IEEE Press,2006.

[9] GAO Qing-hai, ZHANG Jun-shan, HANLY S V. Cross-layer rate control in wireless networks with lossy links: leaky-pipe flow effective network utility maximization and hop-by-hop algorithms[J]. IEEE Trans on Wireless Communicationas, 2009,8(6):3068-3076.

[10] YI Y, CHIANG M. Stochastic network utility maximization[J]. European Trans on Telecommunications,2008,23(19):421-442.

[11] SHAKKOTTAI S, SRIKANT R. Mean FDE models for Internet congestion control under a many-flows regime[J]. IEEE Trans on Information Theory,2004,50(6):1050-1072.

[12] GOLDSMITH A. Wireless communications[M]. 北京:人民邮电出版社,2007.

[13] CHARNES A, COOPER W W. Chance-constrained programming [J]. Management Science,1959,6(1):73-79.

[14] RANIWALA A, CHIUH T. Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless Mesh network [C]//Proc of IEEE Conference on Computer Communications. [S. l.]:IEEE Press, 2008.