

不确定流量条件下多跳无线网络的信道分配与 链路调度研究

徐 晶¹, 刘 威¹, 程文青¹, 袁林峰²

(1 华中科技大学 电子与信息工程系, 湖北 武汉 430074;

2 中船重工集团公司第 722 研究所, 湖北 武汉 430079)

摘 要: 本文以网络吞吐量最大化为目标, 提出了传输流约束、信道资源约束以及干扰约束条件下的资源分配联合优化模型, 以及基于不确定流量条件下资源分配最优解的链路调度策略. 仿真实验结果证明: 本文提出的信道分配及链路调度方案能够更好地适应网络流量需求的变化.

关键词: 多信道; 信道分配; 链路调度; 优化

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)01-0052-05

Joint Channel Assignment and Link Scheduling under Uncertain Traffic in Multi-hop Wireless Networks

XU Jing¹, LIU Wei¹, CHENG Wen-qing¹, YUAN Lin-feng²

(1 Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2 No. 722 Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Wuhan 430079, China)

Abstract: In this paper, one joint optimization model for network throughput maximization is proposed under the constraints of transmission flows, channels and interferences. With the optimal solution with uncertain input traffic, one link schedule scheme is also proposed. Numeric simulation results show that, our solution has better performance for uncertain traffic demand.

Key words: multi-channel; channel assignment; link scheduling; optimization

1 引言

多信道多跳无线网络的系统资源包括频域范围内的信道资源、时域和空域范围的链路资源等. 该网络的资源分配涉及信道分配方案和链路调度策略两个层面, 网络需要通过合理的信道分配确定不同时隙中网络节点接口(和链路)与信道之间的对应关系, 并最终链路调度保证网络的正常运行. 因此, 以网络吞吐量最大化的多信道多跳无线网络的资源分配问题往往被转化为信道分配和链路调度联合优化问题^[1-4].

在传统模型中, 针对流量变化可以在每一个调

度周期内以实际的网络流量作为模型输入计算获得的最优解, 并依此进行信道分配和链路调度, 但该方案要求网络在每一个调度周期内随着流量需求的变化而完成整个方案的调整, 在实施应用方面缺乏可行性. 因此, 流量的不确定性, 要求资源分配的算法具备更加灵活的适应能力.

本文以多信道多跳无线网络为研究对象, 以最大化网络吞吐量为研究目标, 研究网络中信道分配和链路调度联合优化问题, 重点讨论了网络流量不确定的影响^[5-6]. 文献^[6-7]研究了多跳场景下的路由问题, 但是并未考虑信道分配与链路调度之间的联合优化. 本文在考虑实际网络通信中的干扰、接口

收稿日期: 2011-04-08; 修回日期: 2011-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(60772088)

信道资源限制、流约束以及公平性约束的基础上,假设网络流量随机,建立了信道分配与链路调度的机会约束的联合优化模型。

2 系统模型

2.1 基本模型

给定一个多信道多跳无线网络,用有向图 $G(V, E)$ 表示,其中 V 表示网络节点集合, E 表示每一对邻接节点之间的通信链路集合,链路具有方向性。网络可用信道集合为 C 。相邻节点之间存在链路则必须要求节点接口可以工作在相同的信道上。工作于相同信道的邻近链路会产生相互干扰,用 $IF(e)$ 表示所有可能会对链路 $e \in E$ 产生干扰的链路集合。此外,定义链路 e 的容量为 $c(e)$ 。随机选择网络中的若干个节点对作为数据流的源节点与目的节点,网络中的流量用网络节点 $u \in V$ 的聚合流量需求 $\phi(u)$ 表示。本文假定网络的流量具有一定随机性。节点 u 发送数据至节点 v 的实际速率即为节点对所在链路的实际流量,表示为 $f(e)$ 。节点之间的流量通过多径路由方式经由网络传输,多径路由可实现网络流量均衡,提高网络吞吐量。本文忽略多径传输所带来的额外协议开销。

本文假设网络节点静止或低速缓慢移动,网络拓扑相对固定。整个网络工作于时分复用模式,每一个时隙内节点按照标准的 802.11 标准进行竞争接入。网络中存在一个中央调度服务器进行链路调度,所有网络节点支持一个公共信道为控制信令的传输信道。在任意一个时隙中,中央调度器安排一组无干扰的链路处于激活状态,并为每一条链路分配工作信道。网络中所有节点接口支持动态信道切换,信道切换代价忽略不计。

2.2 变量定义

在具体的优化模型描述之前,本文首先给出一些定义。

(1) 链路信道活动状态。链路 e 在信道 k 上的活动状态 $X(e, k, t)$,表示在给定时间 t 内,链路 e 是否工作于信道 k 进行数据传输。 $X(e, k, t) = \{0, 1\}$ 。

(2) 链路信道利用率。链路 e 在信道 k 上的利用率 $\alpha(e, k)$,表示在一个链路调度周期 T 内,链路 e 在信道 k 上处于活动状态的时隙总数占整个链路调度周期的比例, $\alpha(e, k) = \sum_{1 \leq t \leq T} X(e, k, t) / T, \forall e, k$ 。

(3) 链路流量。链路 e 在信道 k 上的流量 $f(e, k)$,表示链路 e 在信道 k 上的有效带宽,因此 $f(e, k) = c(e) \times \alpha(e, k)$ 。链路 e 上的流量等于所有信道上

的流量之和,即 $f(e) = \sum_k f(e, k)$ 。

3 路由、信道分配及链路调度联合优化

3.1 研究目标

对于一个多信道多跳无线网络 $G(V, E)$,给定若干个数据流,为了获取最优的网络吞吐量,需要综合考虑节点接口的信道分配、数据传输的链路调度策略以及流量分布。需要满足的约束条件包括(1)同一时隙内的链路之间无相互干扰;(2)满足用户节点的流量公平性需求。本文将研究工作分解为两步,第一步提出信道分配及链路调度联合优化的混合整数规划模型,并对该模型进行简化;第二步,根据第一步获得的优化解,设计链路调度策略对其进行实现。

3.2 优化模型

对于给定的路由(以及对应的信道分配和链路调度策略),定义公平性系数 λ 为实际可达到的流量与流量需求之间的比值。本模型中采用最小公平性约束,网络中所有数据流实际可达到的流量与流量需求之间的比值必须大于等于公平性系数 λ 。综合上述约束条件,可以给出信道分配及链路调度联合优化的混合整数规划模型。本文以最大吞吐量目标为例说明,对于给定的 λ ,具体优化模型如下:

$$\begin{aligned} \text{MixedIP maxThroughput: } \max \sum_{u \in D} f(u) \\ \left\{ \begin{array}{ll} f(u) \geq \lambda \phi(u) & \forall u \quad ① \\ \sum_{e \in E^o(u)} f(e) - \sum_{e \in E^i(u)} f(e) = f(u) & \forall u \quad ② \\ \sum_k \alpha(e, k) c(e) = f(e) & \forall e \quad ③ \\ \alpha(e, k) \geq 0 & \forall e, k \quad ④ \\ \sum_{k, e, u \in e} \alpha(e, k) \leq 1 & \forall u \quad ⑤ \\ X(e, k, t) \in \{0, 1\} & \forall e, k, t \quad ⑥ \\ \sum_{1 \leq t \leq T} X(e, k, t) / T = \alpha(e, k) & \forall e, k \quad ⑦ \\ X(e, k, t) + X(e', k, t) \leq 1 & e' \in IF(e), \forall e, k \quad ⑧ \\ \sum_{e, u \in e} \sum_k X(e, k, t) \leq 1 & t \in [1, T], \forall u \quad ⑨ \end{array} \right. \end{aligned}$$

其中, $E^o(u)$ 和 $E^i(u)$ 分别表示从节点 u 输出的链路集合和输入 u 的链路集合, D 为网络数据流的目的节点集合。式①~③为流量公平性约束。在多跳网络中,节点通常依赖于邻节点作为中继转发数据。对于中间节点而言,所有流入流量等于流出流量。而源节点和目的节点的流入流量存在差值,该差值等于本节点的自身产生的流量负载大小,其中源节点流出

流量与流入流量的差值为正值,相反目的节点流出流量与流入流量的差值为负值.式⑥~⑨为链路调度可行性约束,在链路调度过程中要求同一时隙内处于活动状态的链路之间不存在干扰,且分配给同一节点信道数量不超过节点的接口数量.

值得注意的是,本文所提出的优化模型的目标函数不局限于此,该模型可以在约束条件不变的条件下扩展至其他任意目标函数,例如:最大公平性、网络拥塞度等.

在实际网络中用户流量需求往往存在一定的不确定性,因此,模型中的用户流量需求 $\phi(u)$ 为随机变量,从而导致目标函数最优值与约束保守度之间存在一定的权衡.如果必须满足所有可能的用户流量需求 $\phi(u)$,则必然计算获得较小的最优值;反之,为了获得更优的目标函数,无法满足用户流量需求最小公平性约束的可能性必然增加.为了获得一个尽可能满足所有可能的用户流量需求的最优解,需要对模型中的公平性约束条件进行松弛,在优化模型的求解过程中忽略部分用户流量需求,以保证优化模型的最优解能够更好的适应于变化的网络流量需求.松弛后的公平性约束条件用概率约束条件表示如下

$$\text{Prob}(f(u) \leq \lambda \phi(u)) \leq \epsilon_u, \forall u \in V \quad (1)$$

其中, ϵ_u 表示违背用户流量最小公平性约束的概率.

假设已知流量需求 $\phi(u)$ 的分布函数 $F(\phi(u)) \in \zeta_0, \zeta_0$ 表示参数概率测度空间,则上式等价于

$$\int_{\phi(u) \geq f(u)/\lambda} d(F(\phi(u))) \leq \epsilon_u, \forall u \in V \quad (2)$$

以正态分布为例,节点 u 的流量需求 $\phi(u)$ 满足 $[\mu_u, \sigma_u]$, μ_u 为均值, σ_u 为方差.式(2)可简化为:

$$f(u) \geq \lambda(Q^{-1}(\epsilon_u)\sigma_u + \mu_u), \forall u \in V \quad (3)$$

其中, $Q = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt$.

由于混合整数规划的计算复杂度较大,可以根据变量 $\alpha(e, k)$ 与变量 $X(e, k, t)$ 之间的关系(式 g),去除变量 $X(e, k, t)$,将上述模型转换为一个简单的线性规划问题.原模型中式⑤中隐含了约束条件⑨,可忽略.对于链路调度可行性约束(式⑥~⑧),可参考文献[3]替换为多项式时间链路调度策略存在的松弛充要条件.

$$\alpha(e, k) + \sum_{e' \in IF(e)} \alpha(e', k) \leq C_M, \forall e, k, e' \quad (4)$$

其中,参数 C_M 与具体的干扰模型有关,当 $C_M=1$ 时必然具有可行解.等价的最大公平性线性规划模型如下所示.

$$\begin{aligned} \max \text{ThroughputLP: } & \max \sum_{u \in D} f(u) \\ \left\{ \begin{array}{ll} f(u) & \geq \lambda(Q^{-1}(\epsilon_u)\sigma_u^2 + \mu_u) \quad \forall u \\ \sum_{e \in E^0(u)} f(e) - \sum_{e \in E^1(u)} f(e) & = f(u) \quad \forall u \\ \sum_k \alpha(e, k) c(e) & = f(e) \quad \forall e \\ \alpha(e, k) & \geq 0 \quad \forall e, k \\ \sum_{k, e, u \in e} \alpha(e, k) & \leq 1 \quad \forall u \\ \alpha(e, k) + \sum_{e' \in IF(e)} \alpha(e', k) & \leq C_M \quad \forall e, k, e' \end{array} \right. \end{aligned}$$

4 链路调度算法

获得基于上述优化模型的最优解后,网络中央调度服务器就可以通过公共信道进行链路调度.文献[7]提出了单信道无线网络链路调度策略,本文将该调度策略扩展,使之支持多信道.假设 T 是每一个调度周期的时隙总数,则需要为每一个 $\bar{\alpha}(e, k)$ 分配个时隙 $T \cdot \bar{\alpha}(e, k)$.从可实现性考虑,选择一个合适(足够大)的 T 使每一个 $T \cdot \bar{\alpha}(e, k)$ 成为整数.具体链路调度策略构建算法如算法 1 所示.在实现链路调度过程中,每一个节点内部将维护一张表 $L(t)$,记录每一时刻的链路信道分配方案.例如:如果 $L(t)$ 中存储了条目 (e, k) ,则表示在时刻 t 上,链路 e 工作于信道 k 上.每个节点可以根据该信道分配表切换接口信道,该信道分配表的信息根据中央服务器通知的信息定期更新.

算法 1

链路调度策略构建算法

算法 1	链路调度策略构建算法
1	根据干扰模型计算每一条链路的干扰权值和
2	根据干扰权值和将链路从小到大依次排序
3	for 每一条链路 $\hat{e}$
4	for 该链路的每一个可能的信道 $\{k \delta(\hat{e}, k) = 1\}$
5	计算 $T \cdot \bar{\alpha}(\hat{e}, k)$
6	AllocationCount=0;
7	for 每一个时隙 $(t \in T)$
8	if 当前时隙不存在 $(\hat{e}', k) \in IF(\hat{e}, k)$
9	分配当前时隙给 $(\hat{e}, k)$
10	AllocationCount=AllocationCount+1
11	if AllocationCount= $T \cdot \bar{\alpha}(\hat{e}, k)$
12	break
13	end if
14	end if
15	end for
16	end for
17	end for

5 性能评估

本文在 matlab 中对信道分配及链路调度联合优化模型及其调度策略进行仿真评估,分析比较在网络用户流量需求不确定性条件下,各种不同信道分配以及链路调度方案的网络性能,具体包括:①最短路由+802.11MAC(记为“AOMDV+802.11”),按照 AOMDV 计算出已知网络拓扑结构中所有数据流的最短路径,网络中无链路调度机制,链路之间按照 802.11 标准的 MAC 协议进行竞争;②定值优化模型的最优解(记为“certain-model”):按照固定流量优化模型计算的最优解进行信道分配和链路调度,所有调度周期内网络行为保持一致;③机会约束优化模型的最优解(记为“CCP-model”):按照机会约束优化模型计算的最优解进行信道分配和链路调度,所有调度周期内网络行为保持一致. certain-model 和 CCP-model 中均在流量约束条件下选择最短路由. 对于网络实际性能的评价采用网络拥塞度为评价指标. 网络拥塞度为网络中所有链路的拥塞度的最大值,即 $Con = \max\{\phi(e)/f(e)\}$,其中 $\phi(e)$ 为链路 e 的流量需求, $f(e)$ 为考虑干扰情况下链路 e 的有效带宽(即链路调度周期内链路实际可以获得带宽).

(1) 流量分布方差 σ 变化时不同优化模型的最优解

设置网络节点可用信道数量为 2. 随机生成网络拓扑,并选择 10 个节点生成不同的数据流,其中 9 个数据流的流量需求均为确定值(设置为 6 Mbps),另一个数据流 f_0 的流量需求满足正态分布(均值 $\mu=6$). 分别设置 f_0 的 σ 为 1,2,3,4,5,对于每一个 σ 随机生成 1000 个 f_0 的流量需求样本,与其他流量组成 1000 个样本集,对比分析用户流量需求不确定性的离散程度 σ 对不同模型计算获得的最优解实际性能的影响. 由于网络拓扑的随机性,所有的仿真均重复 10 次,并取均值进行分析. 仿真结果如图 1 所示, AOMDV+802.11、certain-model 以及 CCP-model 模型的网络拥塞度均大于 1. 说明在流量需求变化情况下,各方案会发生不同程度的拥塞. 但从各方案的网络拥塞度增幅来看,CCP-model 的增幅明显小于 AOMDV+802.11 和 certain-model,表明 CCP-model 对流量需求变化的适应度强于 AOMDV+802.11 和 certain-model. 此外,随着流量需求方差 σ 的增加,网络流量的波动性变大, AOMDV+802.11 和 certain-model 的网络拥塞度

进一步提升. 因此,CCP-model 采用概率成立的约束条件提高了其对应方案的鲁棒性. 下面仅对 CCP-model 进行仿真,考察其对流量参数 ϵ_u 变化的敏感程度.

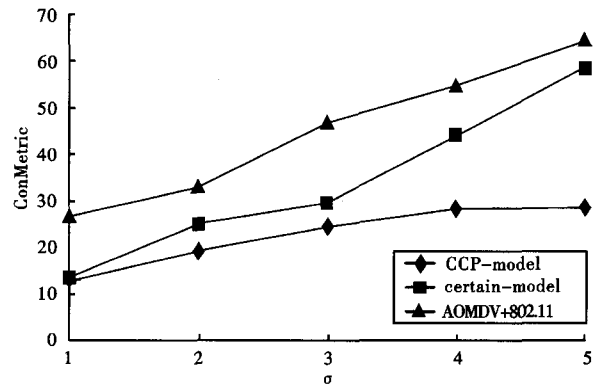


图1 参数 σ 对不同优化模型最优解的影响

(2) 参数 ϵ_u 变化时 CCP-model 优化模型的最优解

方法同上,设置 f_0 的 σ 为 3,4,5,对于每一个 σ 随机生成 1000 个 f_0 的流量需求样本,与其他流量组成 1000 个样本集. 分别设定 ϵ_u 为 0.2,0.15,0.1,0.05,0.02,0,观察概率系数 ϵ_u 对 CCP-model 对应方案的网络性能影响. 本文采用 $\sigma=4$ 时的仿真结果进行说明,在 σ 的其他取值条件下网络性能随参数 ϵ_u 的变化趋势基本一致. 如图 2 所示,从整体趋势来看, ϵ_u 的取值存在拐点,当小于 0.11 时,网络拥塞度增幅明显变大. 当 ϵ_u 接近 0 时,CCP-model 模型等同于 certain-model 模型,因此同样易受到用户流量需求扰动的影响,在实际网络运行中易产生拥塞而导致网络性能下降.

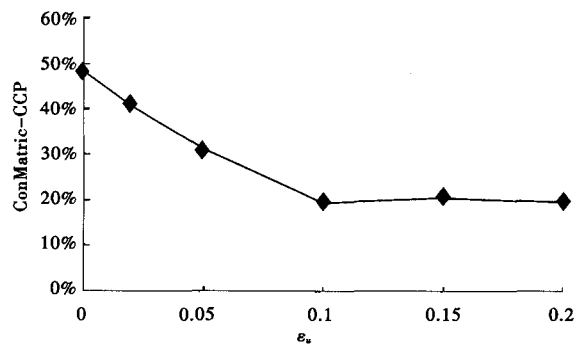


图2 参数 ϵ_u 对不同优化模型最优解的影响

6 结束语

文中研究了多信道多跳无线网络中信道分配和链路调度联合优化问题^[8],重点讨论了网络流量不确定的影响. 考虑到实际网络中流量不确定性的特

征,本文提出了数据流公平性约束、信道资源约束以及干扰约束条件下的资源分配联合优化模型,以及基于不确定流量条件下的资源分配最优解的链路调度策略。仿真实验结果,证明了本文所提出的信道分配及链路调度方案能够更好适应网络流量需求的变化。本文所提出的优化模型的流量需求分布(参数)可以采用流量评估模型来刻画。不过现有流量评估模型需要较高计算复杂度来获取准确的流量信息,其结果本身也存在一定的不确定性,因此需要采用更加合适的数学工具进行描述。未来的工作将进一步研究流量需求分布参数不准确条件下的优化模型及其网络性能。

参考文献:

- [1] Alicherry R B M, Li L. Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multi-radio wireless mesh networks [C]//Proc. of ACM MobiCom. Germany, 2005:58-72.
- [2] Rad A H M, Wong V W S. Joint channel allocation, interface assignment and MAC design for multi-channel wireless mesh networks [C]//Proc. of IEEE Infocom. DSA; Alaska, 2007:1469-1477.
- [3] Li X Y, Nusairat A, Wu Y, et al. Joint throughput Optimization for wireless mesh networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 7(8): 895-908.
- [4] 马莉,朱光喜,殷伯云. 无线网状网射频频链路的信道分配算法 [J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(9): 109-113.
- [5] Meng X, Wong S H Y, Yuan Y, et al. Characterizing flows in large wireless data networks [C]//Proc. of ACM MobiCom. USA; Philadelphia, 2004:174-186.
- [6] Dai L, Xue Y, Chang B, et al. Integrating traffic estimation and routing optimization for multiradio multi-channel wireless mesh networks [C]//Proc. of IEEE Infocom. Finland; Helsinki University of Technology, 2008:71-75.
- [7] Song Y, Zhang C, Fang Y. Harnessing traffic uncertainties in wireless mesh networks-a stochastic optimization approach [J]. Mobile Network, 2009(14):124-133.
- [8] Wang W, Wang Y, Li X Y, et al. Efficient interference aware TDMA link scheduling for static wireless networks [C]//Proc. of ACM MobiCom. USA; Los Angeles, 2006:262-273.

作者简介:

徐 晶 男,(1979—),博士.研究方向为无线网络通信技术。
刘 威 男,(1977—),博士,副教授.研究方向为认知网络、无线自组网、智能电网。
程文青 男,(1964—),博士,教授.研究方向为无线传感器网络通信技术、网络教育技术。
袁林峰 男,(1975—),博士,高工.研究方向为无线自组网通信。

(上接第 51 页)

TC²CLA 模块结构参数约束公式和优化分析表给 TC²CLA 及优化序列、无等待时间序列的优化设计及操作位的扩展奠定了基础。

参考文献:

- [1] Huang Yen-Mou, Kuo James B. A high-speed conditional carry select(CCS) adder circuit with a Successively incremented carry number block(SICNB) structure for low-voltage VLSI implementation [J]. IEEE Transactions on Circuits and systems, 2000, 47(10): 1074-1079.
- [2] Knowles S. A family of adders[C]//Proc. 14th IEEE Symp. On Computer Arithmetic. Adelaide, Australia, 1999:277-284.
- [3] Wang C. A 1.25GHz 32bit tree-structured carry lookahead adder[C]//IEEE Intl. Synop. On Circuits and Systems. Sydney, Australia, 2001(4): 80-83.
- [4] Wang Yuke, Pai C, Song Xiaoyu. The design of hybrid carry-lookahead/carry-select adders [J]. IEEE Transactions on Circuits and systems, 2002, 49(1): 16-24.
- [5] 王礼平,王观凤. 顶层进位级联 CLA 的算法与设计规则[J]. 华中科技大学学报, 2004, 32(7): 88-91.
- [6] 王元媛,王礼平. TC²CLA 的混合模块延迟时间公式及优化序列[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(11): 64-67.
- [7] 王礼平,王观凤. 超前进位加法器的延迟时间公式与优化设计[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 28(4): 585-588.
- [8] Wakerly J F. 数字设计原理与实践[M]. 3 版. 林生,金就林,译. 北京:机械工业出版社, 2003:64-127.

作者简介:

王元媛 女,(1982—),博士,讲师.研究方向为计算数学、计算技术及应用。
王礼平 男,(1945—),教授.研究方向为电路与系统设计、电子设计自动化