

针对不确定流量的多收发机无线网络资源优化研究

徐 晶¹ 刘 威¹ 杨宗凯²

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)¹ (华中师范大学 武汉 430079)²

摘 要 多收发机无线网络具有多接口多信道多跳的特点,是今后无线网络发展的趋势。该网络中信道与链路的资源分配,涉及路由、信道分配以及链路调度的联合优化。在以往的研究中通常对网络流量模型进行简化,假设其是确定且相对稳定的。考虑到实际网络中流量不确定性的特征,以网络吞吐量最大化为目标,提出传输流约束、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。仿真实验结果证明所提出的路由、信道分配及链路调度方案能够更好地适应变化的网络流量需求。

关键词 多接口多信道,路由,信道分配,链路调度,优化

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Resource Optimization for Uncertain Traffic in Multi-radio Wireless Networks

XU Jing¹ LIU Wei¹ YANG Zong-kai²

(Dept. of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)¹

(Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China)²

Abstract Multi-radio wireless network is one of the trends for future wireless network, which has the characteristics of multiple interfaces, multiple channels and multiple hop. The channels and links resource optimization in such network is a joint optimization problem of routing, channel allocation and link scheduling. In the existed related approaches, the network traffic is simply assumed to be deterministic and stable. However, it is known that there is always some uncertainty in real network traffic. In this paper, one joint optimization model for network throughput maximization was proposed under the constraints of transmission flows, channels and interferences. With the optimal solution with uncertain input traffic, one link schedule scheme was also proposed. Numeric simulation results show that our solution has better performance for uncertain traffic demand.

Keywords Multi-radio multi-channel, Routing, Channel assignment, Link scheduling, Optimization

1 引言

随着无线通信技术在小型化、低能耗、低成本等方面的发展,在同一个无线节点上集成多个无线收发机(Multiple Radio)已经成为未来无线通信的重要发展趋势。多收发机网络也称为多接口(Multiple Interface)网络,通常每个无线接口可以工作在多个信道(Multiple Channel)之上,网络间的各节点之间为无线多跳(Multiple Hop)连接,例如,集成了多个不同的 802.11 接口的无线网状网络。传统单信道多跳无线网络中的并发传输之间大都存在相互干扰,单条路径的有效带宽往往随着跳数的增加而减少,从而导致整个网络的吞吐量急剧下降^[1]。而多收发机网络中,每一个节点配置多个通信接口,提高了网络频谱空间的复用程度;整个网络覆盖多个不交叠的通信信道,提高了网络通信的空间复用度。因此,多收发机网络可以减少链路之间的干扰,实现信道资源利用率的最大化,提高网络的吞吐量^[2,3]。

多收发机无线网络的系统资源包括频域范围内的接口与

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路由协议和信道分配策略,其中,路由协议寻求源节点与目的节点之间的有效路由,信道分配策略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。信道分配策略与路由协议之间相互影响:一方面,信道分配的结果决定整个网络的拓扑结构以及链路之间的潜在干扰关系,直接影响路由选择的结果;另一方面,网络流量的分布决定了各条链路上的实际流量,成为信道分配的依据。因此,以网络吞吐量最大化的多收发机无线网络的资源分配问题往往被转化为信道分配和路由的联合优化问题^[4-6]。在文献中,联合优化问题被描述为一个经典的线性规划模型,模型的最优解即信道分配策略和对应的路由方案,对于模型的最优解可通过基于时分复用的链路调度实现。

在上述现有工作中,为研究简化起见,对研究模型进行了一系列的假设:(1)首先,在流量模型方面,往往假设源节点和目的节点对之间的流量是确定的和稳定的。考虑到实际网络中节点的移动性和用户行为的随机性,网络中节点的瞬时流

到稿日期:2011-04-11 返修日期:2011-07-05 本文受国家自然科学基金项目(60772088)资助。

徐 晶(1979-),男,博士,主要研究方向为无线网络通信技术,E-mail:xujing@mail.hust.edu.cn;刘 威(1977-),男,博士,副教授,主要研究方向为自组织网络、认知无线网络;杨宗凯(1963-),男,博士,教授,主要研究方向为网络应用技术。

量存在随机波动的特征。有关网络测量的研究表明,即使以汇聚流量为主的无线接入点也表现出一定的不确定性^[7]。

(2)其次,在节点模型方面,往往假设网络节点是同构的,即所有节点的多接口特性相同。随着各种无线通信标准的应用,多接口多信道网络普遍存在异构性,每个节点可能拥有的接口不同,各接口的信道数量、通信带宽等特性也会不同。这些因素应该在优化模型中体现。(3)在通信模型方面,往往采用简化的协议干扰模型,即通过节点之间的位置和距离计算链路之间的干扰关系。而实际通信收发机是基于信噪比相对值来评价信道质量的,基于信噪比门限的物理干扰模型更为准确。并且有研究表明,在非 CSMA 竞争协议的无线网络中采用物理干扰模型可以获得更准确的网络吞吐量结果^[8]。

本文以无线多收发机网络为研究对象,以最大化网络吞吐量为研究目标,研究多接口多信道多跳的无线网络中路由、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,并且改进了现有研究中对节点接口、通信干扰方面的假设过于简化的问题。在现有的研究工作中,与本文类似的选题是 Dai 等^[9]和 Song 等^[10]的研究,他们对网络流量不确定性问题予以了关注,研究了该条件下的路由优化问题,但是并未考虑最优路由的链路调度可行性问题,因此无法给出对应的信道分配方案和链路调度策略。与现有工作相比,本文的研究贡献在于:

(1)在考虑实际网络通信中的干扰、接口信道资源限制、流约束以及公平性约束的基础上,假设网络流量随机,建立了路由、信道分配和链路调度的机会约束的联合优化模型;

(2)在优化建模中考虑了节点接口异构性、通信物理干扰等实际因素,采用虚拟等效图的方法描述异构网络节点,采用物理干扰模型刻画链路之间的干扰关系。

本文第 2 节描述系统模型以及相关假设;第 3 节对路由、信道分配和链路联合优化模型的细节进行了讨论;第 4 节基于模型计算获得的最优解提出一个链路调度机制;第 5 节通过仿真实验对本文提出的模型与算法进行性能评估;最后对全文进行总结。

2 系统模型

2.1 基本模型

给定一个多跳无线网络,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。对于集合中的链路 $e = (u, v), \forall u, v \in V$ 代表在不考虑外部干扰的情况下,节点 u 可发送数据至节点 v 。用 $E(u)$ 表示所有发生在节点上的链路集合,则 $E(u) = \{e | e = (u, v) \text{ or } (v, u), \forall u, v \in V\}$, 而 $E^o(u)$ 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。网络中的每一个节点均配置多个无线网络接口。节点 u 的接口数量表示为 $I(u)$, 其中第 i 个接口为 u_i 。网络采用多信道技术,可用信道集合为 C 。本文给出了一个更为实用的普遍场景,即网络中节点的接口可能表现出一定的异构性,假设网络中存在多种不同的接口标准,所有的接口通信标准均采用多信道技术,其中通信标准 s 的可用信道数量为 κ_s , 其可用信道集合 $C_s = \{c_1, c_2, \dots, c_{\kappa_s}\}$, 采用通信标准 s 的接口可在集合 C_s 中任意切换信道,信道切换代价忽略不计。整个网络的可用信道集合为 $C = \cup C_s$ 。记节点接口 u_i 采用的通信标准为 $S(u_i)$ 。为了避

免干扰,同一节点的每一个接口必须工作于不同的信道上,若相邻节点之间存在链路,则必须要求节点配有采用相同通信标准的接口。

用 $d(u, v)$ 表示节点 u 和节点 v 之间的欧几里得距离,假设每一个节点的传输距离为 $Rt(u)$, 则节点 v 能够正确接收来自节点 u 的必要条件为 $d(u, v) \leq Rt(u)$, 而链路 (u, v) 的一次成功的传输取决于接收节点 v 的信噪比大小。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 $c(e)$ 。值得注意的是,链路的容量 $c(e)$ 和干扰集合 $IF(e)$ 与节点对应接口所采用的通信标准有关。

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,其中所有的源节点和目的节点定义为集合 S 和 D 。网络中的流量用网络节点 $u \in V$ 的聚合流量需求 $\varphi(u)$ 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,所有网络节点均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。

2.2 虚拟节点

为了简化模型的计算过程,本文引入了虚拟节点的概念来刻画多接口网络的节点模型。本文引入了虚拟节点的概念。网络中的每一个多接口的节点,可以视为多个虚拟节点通过全联通方式连接,每一个虚拟节点对应于节点的一个接口。例如:配有 $I(u)$ 接口的节点 u 等效于一组完全连接的虚拟节点 $u_i, i \in [1, I(u)]$ 。因此,给定的 $G(V, E)$ 可通过虚拟节点的概念转换为虚拟节点等效连接图 $G(\hat{V}, \hat{E})$, 其中 \hat{V} 表示 V 中节点的网络接口 $\hat{V} = \{u_i | u \in V, i \in [1, I(u)]\}$, \hat{E} 表示节点接口之间的连接关系。虚拟节点的引入将多接口问题转化为等效的多节点单接口问题,既简化了后续研究工作,又刻画了网络接口异构性的影响。本文后续章节的讨论均基于虚拟节点的概念。

2.3 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)链路信道映射关系。由于网络接口异构性,从整个网络的可用信道集合 C 来看,不同节点接口可使用的信道集合不同,因此链路信道之间存在映射关系,用 $\delta(e, k)$ 表示。

$$\delta(e, k) = \begin{cases} 0, & k \notin C_s \\ 1, & k \in C_s \end{cases}$$

式中, C_s 是 e 对应节点接口的可用信道集合。值得注意的是, $\delta(e, k)$ 描述了链路 e 是否具备在信道 k 上工作的能力,与对应节点接口的通信标准有关,而与时间无关。

(2)链路信道活动状态。链路 e 在信道 k 上的活动状态

$X(\hat{e}, k, t)$, 表示在给定时隙 t 内, 链路 \hat{e} 是否工作于信道 k 进行数据传输。 $X(\hat{e}, k, t) = \{0, 1\}$ 。

(3) 链路信道利用率。链路 \hat{e} 在信道 k 上的利用率 $\alpha(\hat{e}, k)$, 表示在一个链路调度周期 T 内, 链路 \hat{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, $\alpha(\hat{e}, k) = \sum_{1 \leq t \leq T} X(\hat{e}, k, t) / T, \forall \hat{e}, k$ 。 $\alpha(\hat{e}, k)$ 是所有经过该链路的数据流的累加。

(4) 链路流量。链路 \hat{e} 在信道 k 上的流量 $f(\hat{e}, k)$, 表示链路 \hat{e} 在信道 k 上的有效带宽, 因此 $f(\hat{e}, k) = c(\hat{e}) \times \alpha(\hat{e}, k)$ 。链路 \hat{e} 上的流量等于所有信道上的流量之和, 即 $f(\hat{e}) = \sum_k f(\hat{e}, k)$ 。分别用 $f_m(\hat{e})$ 和 $f_m(\hat{e}, k)$ 表示链路上具体某一数据流 m 的吞吐量及其在信道 k 上的吞吐量, 则 $f(\hat{e}, k) = \sum_m f_m(\hat{e}, k), f(\hat{e}) = \sum_m f_m(\hat{e})$ 。

3 路由、信道分配及链路调度联合优化

3.1 研究目标

对于一个多接口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, 我们需要综合考虑路由、节点接口的信道分配、数据传输的链路调度策略。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) 分配给同一节点的信道数量不超过节点的接口数量; 3) 满足用户节点的流量公平性需求。本文将研究工作分为两步, 第一步提出路由、信道分配及链路调度联合优化的混合整数规划模型; 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 干扰模型

本文采用物理干扰模型刻画链路之间的干扰。在物理干扰模型中, 假设接收节点 \hat{v} 收到来自发送节点 \hat{u} 的能量大小为 $P_v^{\hat{u}}(\hat{u})$, 则链路 (\hat{u}, \hat{v}) 上的数据包能被节点准确接收的充要条件为

$$\frac{P_v^{\hat{u}}(\hat{u})}{N + \sum_{m \in \hat{V}^T} P_v^{\hat{m}}(\hat{m})} \geq \beta \quad (1)$$

式中, N 表示背景噪声, \hat{V}^T 表示所有同时并行发送数据的节点集合, β 表示信噪比常量。

为了简化模型计算, 对上述约束条件进行松弛。本文引入权值 w , 两条不同链路 (\hat{u}, \hat{v}) 和 (\hat{m}, \hat{n}) 的权值表示如下: $w_{(\hat{u}, \hat{v})}^{\hat{m}, \hat{n}} = \beta \times P_v^{\hat{m}}(\hat{m}) / P_v^{\hat{u}}(\hat{u})$ 。根据式(1), 链路 $\hat{e} = (\hat{u}, \hat{v})$ 上数据包成功传输的条件可以表示权值不等式 $\sum_{\hat{e}' \in \hat{E}'} w_{\hat{e}}^{\hat{e}'} \leq 1 - N \times \beta / P_v^{\hat{u}}(\hat{u})$, 其中 \hat{E}' 为集合 \hat{E} 中去除 \hat{e} 的所有其他链路的集合 $\hat{E}' \subseteq \hat{E} \setminus \{\hat{e}\}$ 。令 ξ 为 $\sum_{\hat{e}' \in \hat{E}'} w_{\hat{e}}^{\hat{e}'}$ 的上界值(该参数值与网络节点密度相关), 则干扰约束条件为

$$X(\hat{e}, k, t) + \frac{1}{\xi} \sum_{\hat{e}' \in \hat{E}'} X(\hat{e}', k, t) \leq 1 + (1 - N \times \beta / P_v^{\hat{u}}(\hat{u})) / \xi, \forall \hat{e}, k, t \quad (2)$$

3.3 优化模型

本节将先给出固定流量需求条件下的最大网络吞吐量模型, 下一节讨论不确定流量的情况。

3.3.1 固定流量优化模型

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, 对于给定的 λ_0 , 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_0 。假设网络用户流量需求 $\varphi(u)$ 确定已知, 优化目标是最大化网络吞吐量。综合上述约束条件, 我们可以给出路由、信道分配及链路调度联合优化的混合整数规划模型。最大吞吐量(Max Throughput)联合优化模型如下所示。

$$\begin{aligned} \text{MixedIP MaxThroughput: } \max \sum_{u \in D} f(u) & \\ \left\{ \begin{array}{l} f(u) \geq \lambda_0 \varphi(u) \quad \forall u & (a) \\ \sum_{e \in E^O(u)} f(e) - \sum_{e \in E^I(u)} f(e) = f(u) \quad \forall u & (b) \\ \sum_{\hat{e} \in e} f(\hat{e}) = f(e) \quad \forall e & (c) \\ \sum_k \alpha(\hat{e}, k) c(\hat{e}) = f(\hat{e}) \quad \forall \hat{e} & (d) \\ \alpha(\hat{e}, k) \geq 0 \quad \forall \hat{e}, k & (e) \\ \sum_{\hat{e} \in e} \alpha(\hat{e}, k) \leq 1 \quad \forall e & (f) \\ \sum_{k, \hat{e}, u_i \in \hat{e}} \alpha(\hat{e}, k) \leq 1 \quad \forall u_i & (g) \\ X(\hat{e}, k, t) \in \{0, 1\} \quad \forall \hat{e}, k, t & (h) \\ \sum_{1 \leq t \leq T} X(\hat{e}, k, t) T = \alpha(\hat{e}, k) \quad \forall \hat{e}, k & (i) \\ X(\hat{e}, k, t) + X(\hat{e}', k, t) \leq 1 \quad \hat{e}' \in IF(\hat{e}), \forall \hat{e}, k & (j) \\ \sum_{\hat{e}, u \in \hat{e}} \sum_k X(\hat{e}, k, t) \leq I(u) \quad t \in [1, T], \forall u & (k) \\ X(\hat{e}, k, t) \leq \delta(\hat{e}, k) \quad \forall \hat{e}, k & (l) \end{array} \right. & (3) \end{aligned}$$

式(a)–(d)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(h)和(j)为链路调度无干扰约束, 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。式(k)–(l)为资源约束, 由于网络接口资源的限制, 节点接口资源数量一般小于可用信道数量, 为了保证链路调度的切实可行, 要求在链路调度过程中分配给同一节点的信道数量不超过节点的接口数量。

网络吞吐量为所有目的节点接收到的数据流量大小。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吞吐量, 该模型可以在约束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。

3.3.2 不确定的流量需求优化模型

上一小节中给出了已知用户流量需求与最小公平性系数条件下的最大网络吞吐量模型, 其中模型中隐含假设用户流

量需求 $\varphi(u)$ 为固定值。然而,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 $\varphi(u)$ 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 $\varphi(u)$,则必然计算获得较小的最优值;反之,要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会增加。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地适应于变化的网络流量需求。本节讨论不确定流量需求的影响,将最大吞吐量优化问题相应变为一个机会约束规划问题。

$$\text{Prob}(f(u) \leq \lambda_0 \varphi(u)) \leq \epsilon_u, \forall u \in V \quad (4)$$

式中, 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 $\varphi(u)$ 的分布函数 $F(\varphi(u)) \in \zeta$, ζ 表示参数概率测度空间,则上式等价于

$$\int_{\varphi(u) \geq f(u)/\lambda_0} d(F(\varphi(u))) \leq \epsilon_u, \forall u \in V \quad (5)$$

以正态分布为例,节点 u 的流量需求 $\varphi(u)$ 满足 $[\mu_u, \sigma_u]$, μ_u 为均值, σ_u 为方差。式(5)可简化为

$$f(u) \geq \lambda_0 (Q^{-1}(\epsilon_u) \sigma_u + \mu_u), \forall u \in V \quad (6)$$

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

3.3.3 优化模型变换

因为链路调度已被证实为 NP-hard^[11],所以路由、信道分配以及链路调度的联合优化也将是一个 NP-hard 问题。为便于模型(3)最优解的求解,可以根据变量 $\alpha(\hat{e}, k)$ 与变量 $X(\hat{e}, k, t)$ 之间的等价关系对模型进行一定的转换,该整数规划问题可以等价于线性规划问题。

$$\text{Max Throughput LP: } \max \sum_{u \in D} f(u)$$

$$\begin{cases} f(u) \geq \lambda_0 (Q^{-1}(\epsilon_u) \sigma_u + \mu_u) \quad \forall u & \text{(a)} \\ \sum_{e \in E^o(u)} f(e) - \sum_{e \in E^i(u)} f(e) = f(u) \quad \forall u & \text{(b)} \\ \sum_{\hat{e} \in \hat{E}} f(\hat{e}) = f(e) \quad \forall e & \text{(c)} \\ \sum_k \alpha(\hat{e}, k) c(\hat{e}) = f(\hat{e}) \quad \forall \hat{e} & \text{(d)} \\ \sum_{\hat{e} \in \hat{E}} \alpha(\hat{e}, k) \leq 1 \quad \forall e & \text{(e)} \\ \alpha(\hat{e}, k) \geq 0 \quad \forall \hat{e}, k & \text{(f)} \\ \sum_{k, \hat{e}, \hat{e}' \in \hat{E}} \alpha(\hat{e}, k) \leq 1 \quad \forall u_i & \text{(g)} \\ \alpha(\hat{e}, k) \leq \delta(\hat{e}, k) \quad \forall \hat{e}, k & \text{(h)} \\ \alpha(\hat{e}, k) + \frac{1}{\xi} \sum_{\hat{e}' \in \hat{E}} w_{\hat{e}}^{\hat{e}'} \alpha(\hat{e}', k) \leq 1 + (1 - N \times \beta / P_{\hat{e}}^{\hat{e}}) / \xi \quad \forall \hat{e}, k, \hat{e}' & \text{(i)} \end{cases} \quad (7)$$

式中,分别用式(a)和(i)替换了模型(3)中的式(a)和(j),式(g)隐含了模型(3)中的式(1)。

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。本节提出适用于多接口多信道无线网络环境的多项式时间链路调度策略。

对于变换优化模型计算获得的最优解 $\{\alpha(\hat{e}, k)\}$,需要寻找对应的链路调度策略 $\{X(\hat{e}, k, t)\}$ 。调度策略的实现难点在于干扰约束的刻画。如前文所述,链路调度策略要求同一时隙内激活的链路之间无干扰。除了式(2)中描述的物理干扰模型之外,由于无线网络节点接口的通信能力限制(单接口仅支持半双工通信模式),我们认为共用节点的链路之间也存在等效干扰。因此,满足上述两种情况的链路不能同时处于激活状态。记满足上述两种情况的链路信道对集合为 $IF(\hat{e}, k)$,则链路调度策略要求:

$$X(\hat{e}, k, t) + X(\hat{e}', k, t) \leq 1, \forall (\hat{e}', k) \in IF(\hat{e}, k), \forall \hat{e}, k, t \quad (8)$$

用模型最优解 $\alpha(\hat{e}, k)$ 除以 $(\xi+3)$ 得到 $\bar{\alpha}(\hat{e}, k)$,则 $\bar{\alpha}(\hat{e}, k)$ 必然满足无干扰约束条件:

$$\bar{\alpha}(\hat{e}, k) + \sum_{\hat{e}' \in \hat{E}} w_{\hat{e}}^{\hat{e}'} \bar{\alpha}(\hat{e}', k) + \frac{1}{I(u)} \sum_{\hat{e}'' \cap \hat{e} = u} \bar{\alpha}(\hat{e}'') + \frac{1}{I(v)} \sum_{\hat{e}'' \cap \hat{e} = v} \bar{\alpha}(\hat{e}'') \leq 1$$

文献[11]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,使之包括对虚拟链路和多信道的支持,以保证统一集合内的等效链路之间无干扰。具体链路调度策略构建算法如算法1所示。假设 T 是每一个调度周期的时隙总数,则需要为每一个 $\bar{\alpha}(\hat{e}, k)$ 分配一个时隙 $T \cdot \bar{\alpha}(\hat{e}, k)$ 。从可实现性考虑,选择一个合适(足够大)的 T 使每一个 $T \cdot \bar{\alpha}(\hat{e}, k)$ 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 $L(t)$,用以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

1. 根据物理干扰模型计算每一条虚拟链路的干扰权值和
2. 根据干扰权值和将虚拟链路从大到小依次排序(首选权值和最小的虚拟链路进行分配)
3. for 每一条虚拟链路 \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

本节将从两个方面对路由、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。首先,评价优化模型中网络节点接口数量、可用信道数量对整个网络吞吐量的影响。其次,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。

5.1 接口数量与信道数量的影响

本仿真主要分析节点接口数量、网络可用信道数量对优化模型计算获得的网络最大吞吐量的影响。随机生成 30 个节点的网络拓扑,网络覆盖范围 200 米 * 200 米。假设网络中节点采用 IEEE 802.11a 等网络接口,其传输半径为 90 米。仿真中所有数据流的流量需求均为确定值,随机选择 20 个节点生成不同的数据流,其大小从 4Mbps~12Mbps 中随机选择。在仿真中分别设置每个节点的接口数量为 2,3,4,5,6,7 进行仿真,在每一次仿真中变化信道可用数量,变化范围为 [2,8]。由于网络拓扑随机性,所有的仿真均重复 10 次,并取均值进行分析。获得的仿真实验结果如图 1 所示。

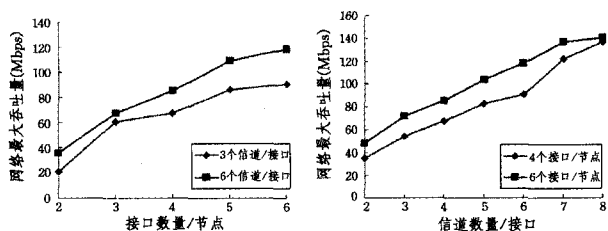


图 1 网络最大吞吐量随接口数及可用信道数的变化趋势

由于篇幅的原因,本文仅对部分仿真结果进行了展示。在其他接口数量以及可用信道数量参数条件下,网络最大吞吐量的变化趋势与图 2 中的结果趋势相似。图 1(a)为接口可用信道数量分别为 3 和 6 时,网络最大吞吐量随节点接口数量变化的情况。由图可以看出,节点接口数量的增加可以提高网络最大吞吐量,但是当节点接口数量增大到一定的值后,整个网络的最大吞吐量增幅趋于平缓,其主要原因在于网络可用信道数量限制了节点接口数量增加所带来的优势。图 1(b)为接口数量分别为 4 和 6 时,网络最大吞吐量随信道数量变化的情况。上述结果表明,多接口多信道的引入可以提高整个网络的性能。

5.2 不确定流量下各优化模型的性能

本仿真主要评价用户流量需求不确定条件下,前文提到的各种不同路由、信道分配以及链路调度方案的网络性能,具体包括:

- 最短路由 + 802.11MAC (记为“SP + 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;

- 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路由、信道分配和链路调度,所有调度周期内网络行为保持一致;

- 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路由、信道分配和链路调度,所有调度周期内网络行为保持一致;

- 实际流量优化模型的最优解 (记为“ideal-model”):在每一个调度周期内以实际的网络流量为模型输入计算获得的

最优解进行路由、信道分配和链路调度,不同调度周期的网络行为随着实际网络流量的变化而变化。从理论上来说,实际流量优化模型的最优解与实际吻合,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,本文采用其结果作为比较基准,对其他模型计算结果进行性能评价。

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 $Con = \max\{\varphi(e)/f(e)\}$,其中 $\varphi(e)$ 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)。很明显, $Con_{ideal} = 1$ 。所有方案的网络拥塞度以实际流量优化模型为基准,比较分析各方案网络拥塞度较实际流量优化模型网络拥塞度的增幅。

5.2.1 流量参数 σ 变化时不同优化模型的最优解

设置网络节点接口数量为 3,接口可用信道数量为 6。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 8Mbps),另一个数据流 f_0 的流量需求满足正态分布 (均值 $\mu=8$)。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 2 所示。SP + 802.11、certain-model 以及 CCP-model 模型的最优解的网络拥塞度都比 ideal-model (值恒为 1) 大。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 SP + 802.11 和 certain-model,表明 CCP-model 对流量需求变化的适应度强于 SP + 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,SP + 802.11 和 certain-model 的网络拥塞度增幅进一步提升。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,其性能对流量需求方差 σ 的变化并不敏感。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。

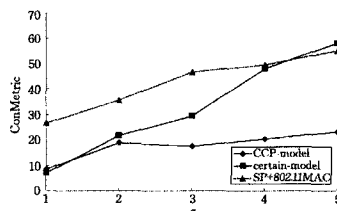


图 2 参数 σ 对不同优化模型最优解的影响

5.2.2 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 0.2,0.15,0.1,0.08,0.05,0.02,0,观察概率系数 ϵ_u 对 CCP-model 对应方案的网络性能影响。由于篇幅限制,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 3 所示,从整体趋势来看, ϵ_u 的取值存在拐点,当小于 0.08 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。

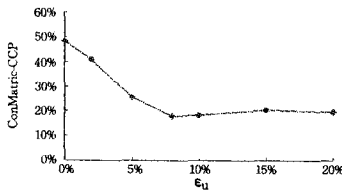


图3 参数 ϵ_u 对不同优化模型最优解的影响

结束语 本文以无线多收发机网络为对象,研究多接口多信道多跳的无线网络中路由、信道分配和链路调度联合优化问题,重点讨论网络流量不确定的影响,并且改进了现有研究中对节点接口、通信干扰方面的假设过于简化的问题。考虑到实际网络中流量不确定性的特征,本文以网络吞吐量最大化为目标,提出传输流约束、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的资源分配最优解的链路调度策略。仿真实验结果证明,本文所提出的路由、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。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的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。本文将在未来的工作中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] Gupta P, Kumar P R. The capacity of wireless networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(2): 388-404

[2] 李礼,张春元. 多接口多信道无线网状网中流量感知的信道带宽调制算法[J]. 电子学报, 2010, 38(4): 875-881

[3] Kodialam M, Nandagopal T. Characterizing the capacity region in multi-radio multi-channel wireless mesh networks[C]// ACM MobiCom. 2005; 73-87

[4] Alicherry R B M, Li L. Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multi-radio wireless mesh networks [C]// ACM MobiCom. 2005; 58-72

[5] Rad A H M, Wong V W S. Joint channel allocation, interface assignment and MAC design for multi-channel wireless mesh networks[C]// IEEE Infocom. 2007; 1469-1480

[6] 陈勋,张朝阳,罗海燕. 无线 Mesh 网络中功率控制、信道分配和调度的联合优化[J]. 浙江大学学报, 2009, 43(8): 1406-1411

[7] Meng X, Wong S H Y, Yuan Y, et al. Characterizing flows in large wireless data networks[C]// ACM MobiCom. 2004; 174-186

[8] Brar G, Blough P M, Santi P. Computationally efficient scheduling with the physical interference model for throughput improvement in wireless mesh networks[C]// ACM MobiCom. 2006; 2-13

[9] Dai L, Xue Y, Chang B, et al. Integrating traffic estimation and routing optimization for multiradio multi-channel wireless mesh networks[C]// IEEE Infocom. 2008; 71-83

[10] Song Yang, Zhang Chi, Fang Yu-guang. Harnessing Traffic Uncertainties in Wireless Mesh Networks-A Stochastic Optimization Approach[J]. Mobile Network, 2009, 14: 124-133

[11] Wang W, Wang Y, Li X-Y, et al. Efficient Interference Aware TDMA Link Scheduling for Static Wireless Mesh Networks[C]// ACM MobiCom. 2006; 262-273

(上接第 32 页)

[4] Kranenburg R V. The Internet of Things; A critique of ambient technology and the all-seeing network of RFID[R]. Network Notebooks 02. Amsterdam; Institute of Network Cultures Press, 2007; 10-28

[5] Want R. Enabling Ubiquitous Sensing with RFID[J]. Computer, 2004, 37(4): 84-86

[6] IBM. 智慧地球赢在中国[EB/OL]. http://www.ibm.com/smarterplanet/global/files/cn_zh_cn_overview_decadeofsmart_wininchina.pdf, 2009

[7] Hubaux J, Capkun S, Luo J. Security aspects of inter-vehicle communications[J]. IEEE Security & Privacy Magazine, 2005, 2; 49-55

[8] Chen T M, Jean-Macq R. Worm epidemics in high-speed networks[J]. IEEE Computer, 2004; 48-53

[9] Rhodes C J, Nekovee M. The opportunistic transmission of wireless worms between mobile devices[Z]. ArXiv: 0802. 2685v1, Feb. 2008

[10] Treiber M, Hennecke A, Helbing D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations[J]. Phys. Rev. E, 2000, 62; 1805-1813

[11] Helbing D. Traffic and related self-driven many-particle systems [J]. Rev. Mod. Phys, 2001, 73; 1067-1141

[12] Rhodes D C J, Anderson R M. Contact rate calculation for a basic epidemic model[J]. Mathematical Biosciences, 2007

[13] Ott J, Kutscher D. Drive-Thru Internet; IEEE 802. 11b for "Automobile" Users[C]// Proceedings of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'04). Vol 1, Piscataway, NJ, USA; IEEE, Mar.

2004; 362-373

[14] Bychkovsky V, Hull B, Miu A K, et al. A Measurement Study of Vehicular Internet Access Using in Situ Wi-Fi Networks[C]// Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Communications (MOBICOM'06). Los Alamitos, CA, USA, New York, NY, USA; ACM, Sep. 2006; 50-61

[15] Hadaller D, Keshav S, Brecht T, et al. Vehicular Opportunistic Communication Under the Microscope[C]// Proceeding of the 5th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys'07). San Juan, Puerto Rico, USA. New York, NY, USA; ACM, June 2007; 206-219

[16] Armstrong L. Dedicated Short Range Communications Project [EB/OL] <http://www.learmstrong.com/DSRC/DSRCHome-set.htm>

[17] IEEE 802. 11p. WAVE—Wireless access for the vehicular environment[S]. 2008

[18] Bettstetter C, Hartmann C. Connectivity of wireless multihop networks in a shadow fading environment[C]// Proc. MSWIM'03. San Diego, USA, 2003

[19] Singh J P, Bambos N, Srinivassan B, et al. Wireless LAN performance under varied stress conditions in vehicular traffic scenarios[C]// Proceedings of IEEE VTC'2002. Vancouver, Canada, 2002

[20] Sim M L, Nekovee M, Ko Y F. Throughput analysis of WiFi based broadband access for mobile users on highways[C]// Proceedings of IEEE MICC/ICON'2005. Kuala Lumpur, 2005

[21] Beretta E, Takeuchi Y. Convergence results in SIR epidemic models with varying population sizes[J]. Nonlinear Analysis, 1997, 28; 1909-1921