

多速率认知网络中协作资源共享机制研究

张琰, 盛敏, 李建东, 韩维佳, 马骁

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室 信息科学研究所, 陕西 西安 710071)

摘要: 针对多速率认知网络分析了不同体制网络间相互协作的动机及策略。基于排队论模型, 提出了不同协作策略的时延分析模型, 得到了不同类型用户的业务到达率、分组长度、信道传输速率与业务平均服务时间之间的解析关系, 进而揭示了不同协作资源共享机制的时延性能以及适用的场景。数值仿真验证了分析模型的准确性和有效性, 同时证明: 通过合理利用用户间的协作, 不仅可以更好地保障主用户业务的 QoS 性能, 还可以有效提升次级用户的接入机会和 QoS 保障能力。

关键词: 认知网络; 多速率; 协作策略; 服务质量; 时延分析

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2011)11-0035-09

Cooperative resource sharing for multi rate cognitive networks

ZHANG Yan, SHENG Min, LI Jian-dong, HAN Wei-jia, MA Xiao

(The State Key Lab of ISN & Information Science Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The motivations and strategies of cooperation between heterogeneous networks were discussed for multi rate cognitive networks. Based on queuing theory, the delay analytical models for different cooperative strategies were proposed and the closed form analysis, which exactly shows the relationship among different users' traffic arrival rate, packet length, transmission rate and service delay, was obtained to reveal the delay performance and appropriate application scenarios of different cooperative strategies. The simulation results confirm that the proposed analytical model is correct and effective. In addition, it shows that not only the QoS of primary user is better guaranteed, but also the access opportunity and QoS of secondary user are improved by cooperation dramatically.

Key words: cognitive networks; multi rate; cooperative strategy; quality of service; delay analysis

1 引言

随着无线通信技术的飞速发展, 新一代无线网络正逐渐向着多元化、异构化、智能化方向发展,

因此多种无线通信网络的高效互联互通也就成为了目前业界关注的焦点。然而, 面对如此复杂的异构网络, 传统蜂窝网络中的 IMS (IP multimedia subsystem) 技术已经很难驾驭。2005 年美国弗吉尼

收稿日期: 2011-07-31; 修回日期: 2011-11-08

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (2010ZX03005-002, 2010ZX03003-001, 2011ZX03005-005); 国家杰出青年科学基金资助项目(60725105); 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 基金资助项目 (2009CB320404); 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目 (IRT0852); 国家自然科学基金资助项目 (60972048, 60972047); 国家重点实验室专项基金资助项目 (ISN01080301); 高等学校学科创新引智计划基金资助项目 (B08038); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目 (K50511010011)

Foundation Items: The National Science and Technology Major Project of China (2010ZX03005-002, 2010ZX03003-001, 2011ZX03005-005); The National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (60725105); The National Basic Research Program of China (973 Program)(2009CB320404); Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT0852); The National Natural Science Foundation of China (60972048, 60972047); Special Fund of State Key Laboratory (ISN01080301); The 111 Project (B08038); The Fundamental Research Funds for the Central Universities(K50511010011)

亚工学院的 W.Thomas 等人提出了一个全新的概念——认知网络^[1]，给人们指明了管理复杂网络的新方向，并以优化网络端到端效能为目标，通过透彻地认知网络中的资源使用状态，以自组织的方式实现网络资源的管理和控制。另一方面，Laneman 等早在 2003 年就给出了节点间相互协作的方法和理论增益，这也为提高网络的传输质量和资源利用效率提供了新的途径^[2]。不难发现：认知和协作这 2 项新兴技术有着天然的互补特性，通过认知技术可以寻找、挖掘到网络中闲置的可用资源，而通过节点乃至网络间的协作则可以最大化资源的利用效率，从而释放出更多的可用资源，两者相辅相成^[3,4]。因此，在文献[5]中 O.Simeone 首次提出次级用户可以通过中继主用户的数据来提高主用户的传输性能，同时自身也获得更多的信道使用机会，进而达到“双赢”的局面。这一核心思想为协作认知技术的研究奠定了基础。其后，Goldsmith 等从信息论的角度进一步证明了次级用户和主用户间协作能够带来的系统容量增益^[6]，从而给出了该领域研究的理论支撑。文献[7]中，Zhang Qian 从博弈论的角度进一步讨论了次级用户和主用户间的协作关系，并引入主用户频谱定价机制，使主用户获得额外的收益。文献[8]中，I. Krikidis 给出了次级用户与主用户协作时网络的稳定吞吐量分析。文献[9]研究了协作引入后对各类用户能耗的影响。

在上述的研究中，作者大都主要关注协作认知技术对整个网络的容量提升，而对主用户和次级用户业务的 QoS 尤其是时延性能并没有进行充分阐述。但是在这个快节奏、数字化、多媒体的时代，人们对时延的要求越来越苛刻，那么主用户和次级用户间协作对其各自时延性能的影响，以及不同协作方式的性能评估自然而然成为了要解决的重点问题。近来，文献[10,11]分析了在不引入协作技术时认知网络中主次用户的时延性能。文献[12]通过引入次级用户的协作分集增益，在假定次级用户尽力协作的条件下，分析了协作分集增益对主、次用户时延和吞吐量性能的影响，然而其并没有考虑无线节点的多速率传输特点以及次级用户更具主动性的协作策略。

本文中，充分利用无线节点间的多速率传输特性，以协作传输来压缩主用户的信道占用时间，并结合更为理性的“一报还一报”协作策略，使次级用户利用更为主动的协作资源共享方式来提升自

身业务的服务质量。在此基础上，利用排队论模型对各种资源策略进行建模，从理论上获得了准确的解析分析，揭示了不同类型用户的业务到达率、分组长度、信道传输速率与业务平均服务时间之间的内在关系，为不同的场景下协作资源共享机制的选择提供了理论基础。数值仿真验证了分析模型的有效性和正确性，也证明了合理的利用用户间的协作，可以在有效保障主用户业务 QoS 性能的条件下，使次级用户更为主动地提升自身的接入机会和 QoS 保障能力。

2 多速率认知网络协作的动机及策略

人们“井喷式”增长的通信需求和稀缺的无线频谱资源之间的矛盾是无线通信领域所面临的根本问题。而高昂的频谱使用费用，使各大运营商非常头痛，但与此同时，美国 FCC (federal communications commission) 的报告则显示：大量已划分的频谱资源被闲置，且各个网络的频谱使用情况随时间的变化而呈现严重的“潮汐”现象。那么，多种网络间资源的相互认知、相互协作也就成为解决这一“供需”矛盾的唯一法宝。通过资源的认知不仅可以发掘网络中散落的闲置资源，还可以将资源聚合，从而发挥意想不到的作用。另外，在无线网络中随着节点的位置分布和周围环境的变化，其相互间的信道条件也大不相同，从而具有了多速率传输的天然属性，这在最早的无线局域网标准中就已经得到了体现，如 IEEE 802.11b，它支持 1, 2, 5.5 和 11Mbit/s 的 4 种传输速率。那么当源节点和目的节点信道条件较差时，通过中间节点协作转发来完成高速率传输，从而压缩低速率信息对宝贵无线资源的占用量。因此，认知和协作 2 项新技术的强强联合，已经成为了无线资源管理领域的研究热点，而不同的结合方式，也会形成不同的性能差异和适用场景。

图 1 给出了主用户和次级用户资源共享方法和协作策略的基本模式：图 1(a)为最原始的“专网专用”资源使用方式，网络间不存在资源共享，该网络的用户独享网络资源，因此业务量较轻时也就必然出现资源的闲置；图 1(b)为传统的认知方式，次级用户通过感知该网络资源的使用情况，在不干扰该网络中主用户对资源使用的前提下，以机会式使用该网络的闲置资源。不难发现：对于次级用户来说，这是一种被动式、无保障的资源共享模式，因此所能承载的业务类型也大大受到限制，而这种状

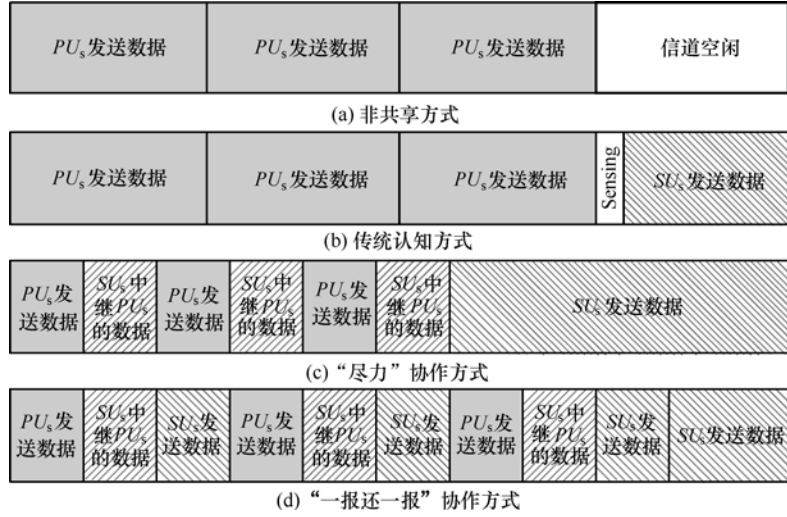


图 1 认知网络资源共享方式

况可以在协作式的资源共享方式中得到改善;图 1(c)给出了一种“尽力”(BE, best effort)协作模式,此时只要主用户有数据,次级用户就尽力为其协作。次级用户也通过高速转发主用户的数据,压缩了主用户的传输时间,换来了自身业务对资源的使用权。可以看出,在该模式下次级用户已经呈现出了主动式的资源共享态势。图 1(d)描述的是一种“一报还一报”(TFT, tit for tat)的协作模式,在该模式下,次级用户已经不满足于一味对主用户进行协作而只有在资源闲置时才能使用的状态,它期望得到立竿见影的协作效果,即在帮主用户传输完一个数据分组后,立刻传输一个自己的分组。当然这也要在不破坏主用户服务质量的前提下。TFT 模式使次级用户变得更加主动,甚至可能具有一定的 QoS 保障能力,其能够承载的业务类型也将有所扩展。接下来将从理论上分析各种协作资源共享方式的性能。

3 不同协作策略下的时延性能分析

3.1 网络模型及相关定义

考虑网络中存在一对主用户和一对次级用户,如图 2 所示,主用户和次级用户的业务到达分别服从参数为 λ_p 和 λ_s 的泊松分布,相应的分组长度为 L_p 和 L_s 。主用户发送节点 PU_S 到主用户接收节点 PU_D 以及次级用户发送节点 SU_S 的信道速率分别为 R_p 和 R_{PS} ,次级用户发送节点 SU_S 到主用户接收节点 PU_D 以及次级用户接收节点 SU_D 的信道速率为 R_{SP} 和 R_s 。如果次级用户参与到对主用户的协作中,主用户的分组经次级用户中转后到达目的节点,那么协作后主用户的等效分组传输速率 R_{CP} 为

$$\frac{L_p}{R_{CP}} = \frac{L_p}{R_{PS}} + \frac{L_p}{R_{SP}} \Rightarrow R_{CP} = \frac{R_{PS}R_{SP}}{R_{PS} + R_{SP}} \quad (1)$$

该模型也可以平稳地扩展到多对主用户和多对次级用户的场景,在该场景下可将主次用户相应的业务流看作合成的泊松流来处理。下面采用均值分析的思想对各种模式下的用户时延展开讨论。

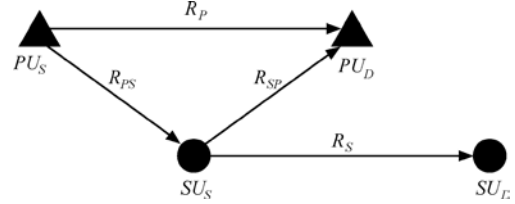


图 2 网络模型

3.2 非协作模式下用户的时延分析

在该模式下,主用户拥有信道有限使用权,仅当主用户不再使用信道时次级用户才可以接入信道,并且当有主用户到达时,次级用户应立即退避,将信道使用权交回主用户。该模式可以建模为强差优先级排队模型^[13],那么主用户的平均时延为

$$E[T_{NC-P}] = E[X_{NC-P}] + \frac{\lambda_p E[X_{NC-P}^2]}{2(1 - \rho_{NC-P})} \quad (2)$$

其中, $E[X_{NC-P}]$ 为非协作模式下主用户的平均服务时间, ρ_{NC-P} 为主用户的到达率 λ_p 与非协作模式下主用户的离去率 $\mu_{NC-P} (\mu_{NC-P} = 1/E[X_{NC-P}])$ 之比。由于主用户的分组长度为 L_p ,且传输速率为 R_p ,那么式(2)中:

$$E[X_{NC-P}] = \frac{L_p}{R_p} \quad E[X_{NC-S}^2] = \frac{L_p^2}{R_p^2} \quad (3)$$

在非协作模式下,次级用户的平均时延为

$$E[T_{NC-S}] = \frac{E[X_{NC-S}]}{(1-\rho_{NC-P})} + \frac{\lambda_P E[X_{NC-P}^2] + \lambda_S E[X_{NC-S}^2]}{2(1-\rho_{NC-P})(1-\rho_{NC-P} - \rho_{NC-S})} \quad (4)$$

其中, $E[X_{NC-S}]$ 为次级用户的平均服务时间, ρ_{NC-S} 为次级用户的到达率 λ_S 与非协作模式次级用户的离去率 μ_{NC-S} ($\mu_{NC-S}=1/E[X_{NC-S}]$)之比, 由于次级用户的分组长度为 L_S , 且传输速率为 R_S , 那么式(4)中:

$$E[X_{NC-S}] = \frac{L_S}{R_S} \quad E[X_{NC-S}^2] = \frac{L_S^2}{R_S^2} \quad (5)$$

3.3 “尽力”协作模式下用户的时延分析

在该模式下, 次级用户帮助主用户传输数据, 直至主用户队列为空时才传输自己的数据。由于主次用户间存在协作, 主用户不再强行中断次级用户正在传输的分组, 因此该模式可以建模为非强差优先级排队模型^[13], 那么主用户的平均时延为

$$E[T_{BE-P}] = E[X_{BE-P}] + E[W_{BE-P}] \quad (6)$$

其中, $E[X_{BE-P}]$ 为主用户的平均服务时间, $E[W_{BE-P}]$ 为主用户的平均等待时间, 它由2部分构成:

$$E[W_{BE-P}] = E[W_{BE-P}^{(1)}] + E[W_{BE-P}^{(2)}] \quad (7)$$

其一为主用户分组到达时的平均剩余服务时间:

$$E[W_{BE-P}^{(1)}] = \rho_{BE-P} \frac{E[X_{BE-P}^2]}{2E[X_{BE-P}]} + \rho_{BE-S} \frac{E[X_{BE-S}^2]}{2E[X_{BE-S}]} \quad (8)$$

其二为主用户队列的排队时延:

$$E[W_{BE-P}^{(2)}] = E[X_{BE-P}]N_{BE-Qp} = E[X_{BE-P}]\lambda_P E[W_{BE-P}] \quad (9)$$

式(8)中 ρ_{BE-P} 为主用户的到达率 λ_P 与非协作模式主用户的离去率 μ_{BE-P} ($\mu_{BE-P}=1/E[X_{BE-P}]$)之比; ρ_{BE-S} 为主用户的到达率 λ_S 与非协作模式主用户的离去率 μ_{BE-S} ($\mu_{BE-S}=1/E[X_{BE-S}]$)之比; 式(9)中 N_{BE-Qp} 为主用户队列中排队等待的分组个数; 将式(8)、式(9)代入式(7)可得:

$$E[W_{BE-P}] = \frac{\lambda_P E[X_{BE-P}^2] + \lambda_S E[X_{BE-S}^2]}{2(1-\rho_{BE-P})} \quad (10)$$

那么再将式(10)代入式(6)得:

$$E[T_{BE-P}] = E[X_{BE-P}] + \frac{\lambda_P E[X_{BE-P}^2] + \lambda_S E[X_{BE-S}^2]}{2(1-\rho_{BE-P})} \quad (11)$$

由于主用户的分组长度为 L_P , 且协作后的分组传输速率为 R_{CP} ; 另外, 次级用户的分组长度为 L_S , 传输速率为 R_S , 那么式(11)中:

$$E[X_{BE-P}] = \frac{L_P}{R_{CP}} \quad E[X_{BE-P}^2] = \frac{L_P^2}{R_{CP}^2} \quad E[X_{BE-S}^2] = \frac{L_S^2}{R_S^2} \quad (12)$$

BE模式下的次级用户的平均时延为

$$E[T_{BE-S}] = E[X_{BE-S}] + E[W_{BE-S}] \quad (13)$$

其中, $E[X_{BE-S}] = L_S/R_S$ 为次级用户的平均服务时间, $E[W_{BE-S}]$ 为次级用户的平均等待时间, 它由3部分构成:

$$E[W_{BE-S}] = E[W_{BE-S}^{(1)}] + E[W_{BE-S}^{(2)}] + E[W_{BE-S}^{(3)}] \quad (14)$$

其一为次级用户分组到达时的平均剩余服务时间:

$$E[W_{BE-S}^{(1)}] = \rho_{BE-P} \frac{E[X_{BE-P}^2]}{2E[X_{BE-P}]} + \rho_{BE-S} \frac{E[X_{BE-S}^2]}{2E[X_{BE-S}]} \quad (15)$$

其二为次级用户分组到达时, 已经在排队的主用户分组和次级用户分组服务所需要的时间:

$$\begin{aligned} E[W_{BE-S}^{(2)}] &= E[X_{BE-P}]N_{BE-Qp} + E[X_{BE-S}]N_{BE-Qs} \\ &= E[X_{BE-P}]\lambda_P E[W_{BE-P}] + E[X_{BE-S}]\lambda_S E[W_{BE-S}] \end{aligned} \quad (16)$$

其三为次级用户到达后, 新到达的主用户分组服务所消耗的时间:

$$E[W_{BE-S}^{(3)}] = E[X_{BE-P}]\lambda_P E[W_{BE-S}] \quad (17)$$

联立式(10)、式(14)~式(17)可得:

$$E[W_{BE-S}] = \frac{\lambda_P E[X_{BE-P}^2] + \lambda_S E[X_{BE-S}^2]}{2(1-\rho_{BE-P})(1-\rho_{BE-P} - \rho_{BE-S})} \quad (18)$$

那么再将式(18)代入式(13)得

$$E[T_{BE-S}] = E[X_{BE-S}] + \frac{\lambda_P E[X_{BE-P}^2] + \lambda_S E[X_{BE-S}^2]}{2(1-\rho_{BE-P})(1-\rho_{BE-P} - \rho_{BE-S})} \quad (19)$$

3.4 “一报还一报”协作模式下用户的时延分析

在此模式下, 次级用户每帮主用户协作传输一个数据分组, 则可以获得一次传输自己数据分组的机会。那么该协作模式对于某一指定用户可以建模为有休假的 M/G/1 模型, 例如, 当对主用户服务时可以看作是次级用户的休假, 可以通过计算主次用户的平均等效服务时间, 进而推得主次用户的平均时延。

对于主用户来说，其服务时间可以分为 2 种情况：当次级用户队列有数据时，服务一个主用户分组之后就要立即服务一个次级用户分组，则此时主用户的等效服务时间为 $E[X_{TFT-P}] + E[X_{TFT-S}]$ ，其中， $E[X_{TFT-P}] = L_P/R_{CP}$ 为以协作方式单独服务一个主用户分组所消耗的时间， $E[X_{TFT-S}] = L_S/R_S$ 为单独服务一个次级用户分组所消耗的时间；当次级用户队列没有数据时，主用户则可以得到连续服务，此时主用户的等效服务时间为 $E[X_{TFT-P}]$ ，如图 3 所示。那么主用户的平均等效服务时间可以表示为

$$E[X_{Equ-P}] = P\{N_{TFT-Q_s} \neq 0\}(E[X_{TFT-P}] + E[X_{TFT-S}]) + P\{N_{TFT-Q_s} = 0\}(E[X_{TFT-P}]) = 1/\mu_{Equ-P} \quad (20)$$

式(20)中， μ_{Equ-P} 为主用户的等效离去率。由 Little 定理可以推得，次级用户队列不为空的概率为 λ_S/μ_{Equ-S} ；相应的，次级用户队列为空的概率就为 $1-\lambda_S/\mu_{Equ-S}$ ，其中， μ_{Equ-S} 为次级用户的等效离去率。那么式(20)就可重新表示为

$$E[X_{Equ-P}] = (\lambda_S / \mu_{Equ-S}) \left(\frac{L_P}{R_{CP}} + \frac{L_S}{R_S} \right) + (1 - \lambda_S / \mu_{Equ-S}) \frac{L_P}{R_{CP}} = 1 / \mu_{Equ-P} \quad (21)$$

同样的，对于次级用户来说，当主用户队列有数据时，服务一个主用户数据后次级用户就可以得到一次服务；而当主用户队列没有数据时，次级用户则可以得到连续服务。那么次级用户的平均等效服务时间则可以表示为

$$E[X_{Equ-S}] = P\{N_{TFT-Q_p} \neq 0\}(E[X_{TFT-P}] + E[X_{TFT-S}]) + P\{N_{TFT-Q_p} = 0\}(E[X_{TFT-S}]) = (\lambda_P / \mu_{Equ-P}) \left(\frac{L_P}{R_{CP}} + \frac{L_S}{R_S} \right) + (1 - \lambda_P / \mu_{Equ-P}) \frac{L_S}{R_S} = 1 / \mu_{Equ-S} \quad (22)$$

联立式(21)和式(22)就可以求得：

$$E[X_{Equ-P}] = \frac{\lambda_S L_S^2 R_{CP} + L_P R_S^2}{R_S (R_S R_{CP} - \lambda_P \lambda_S L_S L_P)} \quad (23)$$

$$E[X_{Equ-S}] = \frac{\lambda_P L_P^2 R_S + L_S R_{CP}^2}{R_{CP} (R_S R_{CP} - \lambda_P \lambda_S L_S L_P)} \quad (24)$$

那么主用户的平均时延为

$$E[T_{TFT-P}] = E[X_{TFT-P}] + E[W_{TFT-P}] \quad (25)$$

值得注意的是，这里在计算用户平均时延时，第一部分仍然使用分组的平均服务时间 $E[X_{TFT-P}]$ ，而不是分组的等效平均服务时间 $E[X_{Equ-P}]$ ，这是因为分组一旦得到服务其消耗的时间就是原始的平均服务时间。另外， $E[W_{TFT-P}]$ 为主用户的平均等待时间，而它又由 2 部分构成：

$$E[W_{TFT-P}] = E[W_{TFT-P}^{(1)}] + E[W_{TFT-P}^{(2)}] \quad (26)$$

其一为主用户分组到达时的平均剩余服务时间。根据主用户分组到达时次级用户队列的状态不同，可以分为如图 4 所示的 4 种情况，其中 P_P 和 P_S 分别表示主、次用户到达的分组，那么：

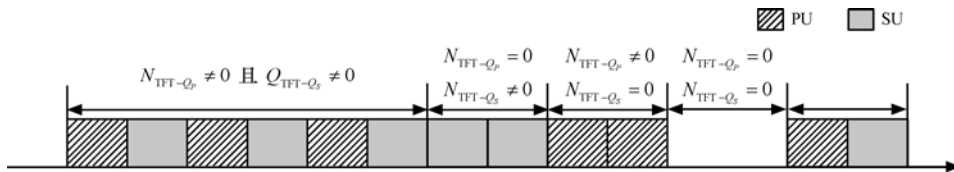


图 3 等效服务时间

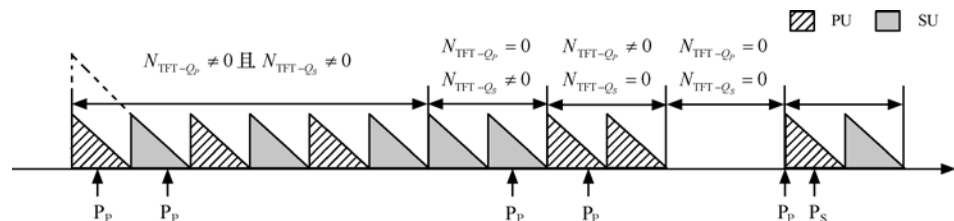


图 4 TFT 模式下主用户的剩余服务时间

$$E[W_{TFT-P}^{(1)}] = P\{N_{TFT-Q_p} \neq 0\}P\{N_{TFT-Q_s} \neq 0\}W_{TFT-P,1}^{(1)} + P\{N_{TFT-Q_p} = 0\}P\{N_{TFT-Q_s} \neq 0\}W_{TFT-P,2}^{(1)} + P\{N_{TFT-Q_p} \neq 0\}P\{N_{TFT-Q_s} = 0\}W_{TFT-P,3}^{(1)} \quad (27)$$

其中,

$$W_{TFT-P,1}^{(1)} = \frac{1}{2} \frac{E[(X_{TFT-P} + X_{TFT-S})^2]}{E[X_{TFT-P} + X_{TFT-S}]} \quad (28)$$

$$W_{TFT-P,2}^{(1)} = \frac{1}{2} \frac{E[X_{TFT-S}^2]}{E[X_{TFT-S}]} \quad W_{TFT-P,3}^{(1)} = \frac{1}{2} \frac{E[X_{TFT-P}^2]}{E[X_{TFT-P}]} \quad (29)$$

整理可得:

$$E[W_{TFT-P}^{(1)}] = \frac{1}{2} \left(\lambda_p E[X_{Equ-P}] \frac{L_p}{R_{CP}} + \lambda_s E[X_{Equ-S}] \frac{L_s}{R_s} \right) \quad (30)$$

其二为主用户队列的排队时延:

$$E[W_{TFT-P}^{(2)}] = E[X_{Equ-P}] N_{TFT-Q_p} = E[X_{Equ-P}] \lambda_p E[W_{TFT-P}] \quad (31)$$

由式(30)、式(31)和式(26)可得:

$$E[W_{TFT-P}] = \frac{E[W_{TFT-P}^{(1)}]}{(1 - \lambda_p E[X_{Equ-P}])} \quad (32)$$

那么再将式(32)代入式(25)得:

$$E[T_{TFT-P}] = E[X_{TFT-P}] + \frac{E[W_{TFT-P}^{(1)}]}{(1 - \lambda_p E[X_{Equ-P}])} \quad (33)$$

TFT 模式下的次级用户的平均时延为

$$E[T_{TFT-S}] = E[X_{TFT-S}] + E[W_{TFT-S}] \quad (34)$$

其中, $E[X_{NC-S}] = L_s/R_s$ 为次级用户的平均服务时间, $E[W_{NC-S}]$ 为次级用户的平均等待时间, 它由 2 部分构成:

$$E[W_{TFT-S}] = E[W_{TFT-S}^{(1)}] + E[W_{TFT-S}^{(2)}] \quad (35)$$

其一为次级用户分组到达时的平均剩余服务时间。同样, 根据次级用户分组到达时主用户队列的状态不同, 可以分为如图 5 所示的 4 种情况, 其中, P_p 和 P_s 分别表示主、次用户到达的分组, 那么:

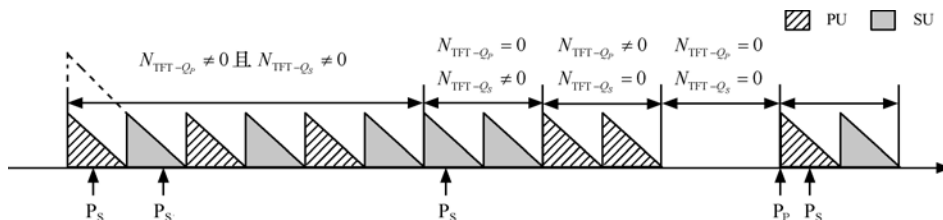


图 5 TFT 模式下次级用户的剩余服务时间

$$E[W_{TFT-S}^{(1)}] = P\{N_{TFT-Q_p} \neq 0\}P\{N_{TFT-Q_s} \neq 0\}W_{TFT-S,1}^{(1)} + P\{N_{TFT-Q_p} = 0\}P\{N_{TFT-Q_s} \neq 0\}W_{TFT-S,2}^{(1)} + P\{N_{TFT-Q_p} \neq 0\}P\{N_{TFT-Q_s} = 0\}W_{TFT-S,3}^{(1)} \quad (36)$$

其中,

$$W_{TFT-S,1}^{(1)} = \frac{1}{2} \frac{E[(X_{TFT-P} + X_{TFT-S})^2]}{E[X_{TFT-P} + X_{TFT-S}]} \quad (37)$$

$$W_{TFT-S,2}^{(1)} = \frac{1}{2} \frac{E[X_{TFT-S}^2]}{E[X_{TFT-S}]} \quad W_{TFT-S,3}^{(1)} = \frac{1}{2} \frac{E[X_{TFT-P}^2]}{E[X_{TFT-P}]} \quad (38)$$

整理可得:

$$E[W_{TFT-S}^{(1)}] = \frac{1}{2} \left(\lambda_p E[X_{Equ-P}] \frac{L_p}{R_{CP}} + \lambda_s E[X_{Equ-S}] \frac{L_s}{R_s} \right) \quad (39)$$

其二为主用户队列的排队时延:

$$E[W_{TFT-S}^{(2)}] = E[X_{Equ-S}] N_{TFT-Q_s} = E[X_{Equ-S}] \lambda_s E[W_{TFT-S}] \quad (40)$$

由式(39)、式(40)和式(35)可得:

$$E[W_{TFT-S}] = \frac{E[W_{TFT-S}^{(1)}]}{(1 - \lambda_s E[X_{Equ-S}])} \quad (41)$$

那么再将式(41)代入式(34)得:

$$E[T_{TFT-S}] = E[X_{TFT-S}] + \frac{E[W_{TFT-S}^{(1)}]}{(1 - \lambda_s E[X_{Equ-S}])} \quad (42)$$

4 性能仿真

本节对各种资源共享策略的性能进行了仿真, 并和理论分析结果进行了比对, 从而验证了理论分析模型的准确性和有效性; 然后基于该结果探讨了次级用户传输策略的设计建议。

4.1 仿真设置

这里依然以 IEEE 802.11b 协议为背景, 那么节点可以支持 1Mbit/s、2Mbit/s、5.5Mbit/s、11Mbit/s 4 种传输速率。不失一般性, 假定主用户发送节点到主用户接收节点的传输速率为 $R_p = 2\text{Mbit/s}$; 次级用

户发送节点到次级用户接收节点的传输速率为 $R_S=5.5\text{Mbit/s}$ ；主用户发送节点到次级用户发送节点的传输速率 $R_{PS}=11\text{Mbit/s}$ ，而次级用户发送节点到主用户接收节点的传输速率 $R_{SP}=11\text{Mbit/s}$ ，那么协作传输速率 $R_{CP}=5.5\text{Mbit/s}$ 。

4.2 仿真分析

首先仿真了主次用户业务到达率的变化对使用不同资源共享模式下主次用户时延的影响，此时主次用户的分组长度默认设置为 2 048byte。

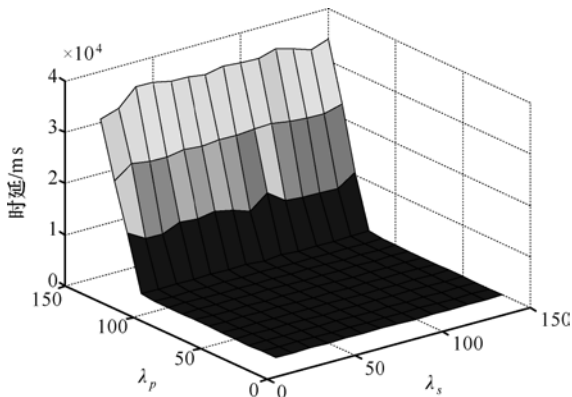


图 6 非协作模式下主用户的时延

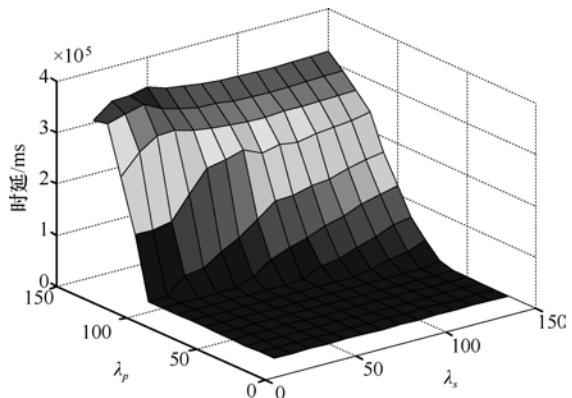


图 7 非协作模式下次级用户的时延

图 6 给出了在非协作模式下，随着主次用户到达率的变化主用户的时延性能，可以看出：该模式下主用户对信道的优先使用权，所以其时延性能不会受到次级用户的影响。另外，由于此时主用户间的信道传输速率较低，当主用户到达率增大到每秒 120 个分组时，系统就趋近于饱和状态，这也导致主用户业务的时延陡增。

图 7 给出了在非协作模式下，随着主次用户到达率的变化次级用户的时延性能。可以明显看出：次级用户的时延依然是由主用户的到达率所决定的，这也正说明了次级用户对信道使用的无

保障性，完全取决于当前主用户的业务状况。另外，由于网络总容量一定，当次级用户的到达率增大时，即使当前主用户的到达率较低，但为了保证主用户的服务，次级用户的性能也就成为牺牲品。

图 8 同时给出了 2 种不同协作模式下主用户时延随主次用户到达率变化的情况。首先可以看出，随着协作机制的引入，提高了分组的传输速率，继而增大了整个网络的容量，因此 2 种协作模式下主用户的时延性能都要远远优于非协作模式。此外，由于 BE 模式下次级用户无条件为主用户提供协作，因此大大提升了主用户的时延性能；而在 TFT 模式下，次级用户有条件协作的态度，使得主用户的时延性能要略逊于 BE 模式，但相对与非协作模式其性能增益仍是可观的，且时延大小的也仍然处于业务可接受的范围之内。

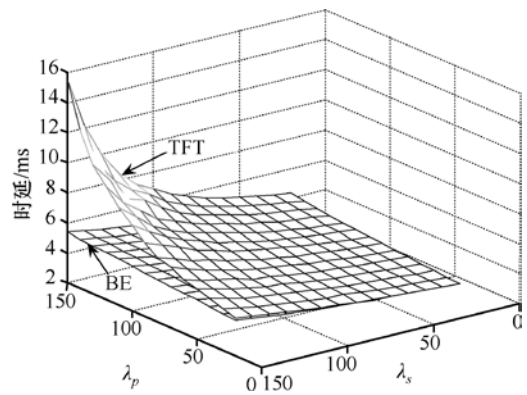


图 8 “BE”和“TFT”主用户时延对比

相应的，图 9 中则给出了 2 种协作模式下次级用户的时延性能。此时，TFT 模式的特点就得到了展现。随着主次用户到达率的提升，BE 模式为了满足主用户的需求而越来越不能保证次级用户的

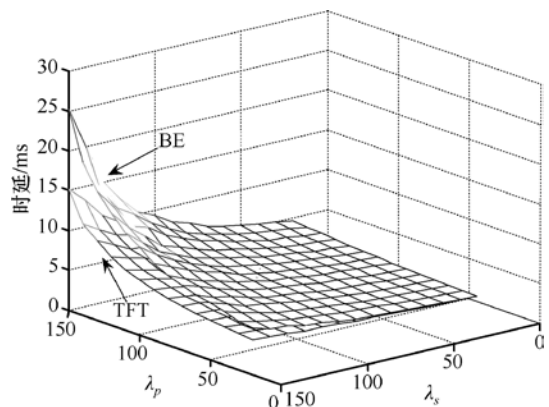


图 9 “BE”和“TFT”次级用户时延对比

服务质量, 反观 TFT 模式, 其次级用户的时延水平一直和主用户保持相当, 由此可以看出在 TFT 模式中, 次级用户利用积极的资源共享策略, 提高了主用户业务的 QoS, 同时也为提升了自身业务的传输机会和质量。

已经从宏观上获得了各个模式的性能和特点。接下来, 进一步验证所提理论分析模型的准确性和有效性, 并考量各种模式的时延抖动特性以及次级用户分组长度的变化对各种模式性能的影响。

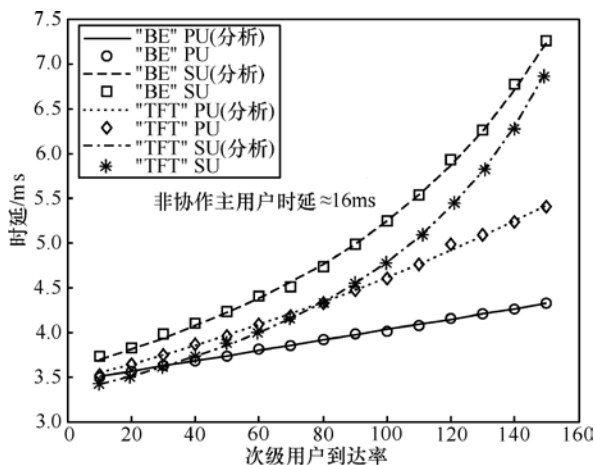


图 10 随次级用户到达率变化时, 各协作模式的时延性能

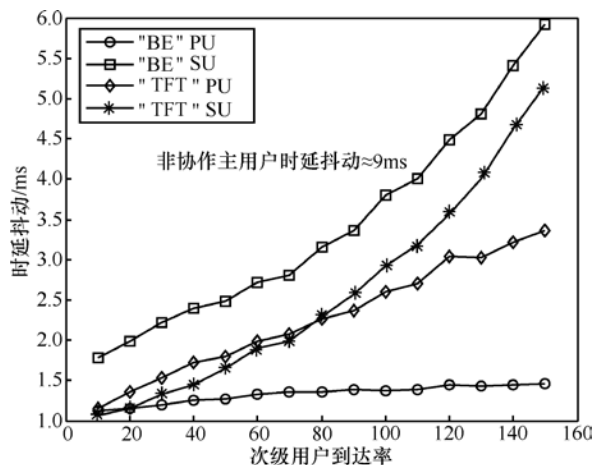


图 11 随次级用户到达率变化时, 各协作模式的时延抖动性能

图 10 给出了主用户到达率为 80packet/s、主用户分组长度为 2 048byte 时, 次级用户到达率变化对 2 种协作模式下各类用户时延的影响。首先欣喜地发现: 由上节提出的理论分析模型得到结果和仿真结果能够很好地匹配, 充分证明了分析模型的正确性和有效性。此外在该场景下, 非协作模式的主用户的时延约为 16ms, 2 种协作模式都给主用户带来增益, 而 TFT 模式下次级用

户获得了更多收益, 也为其承载高质量要求的业务提供了可能。图 11 又从时延抖动的角度进一步比较了 2 种协作模式的性能, 可以得到类似于图 10 的结论, 即 TFT 模式在改善主用户性能的同时, 寻求了主次用户性能的合理折中, 改善了次级用户的 QoS 保障能力。

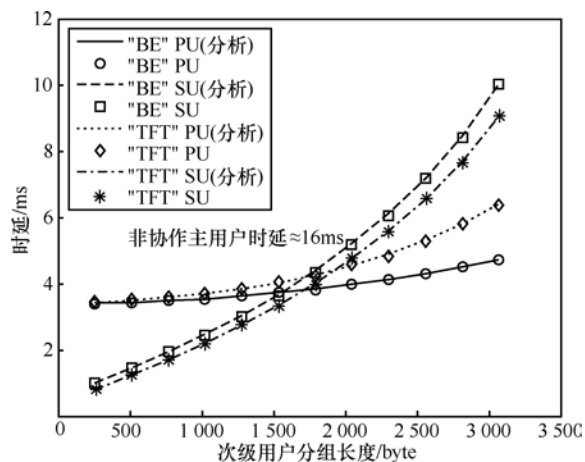


图 12 随次级用户分组长度变化时, 各协作模式的时延性能

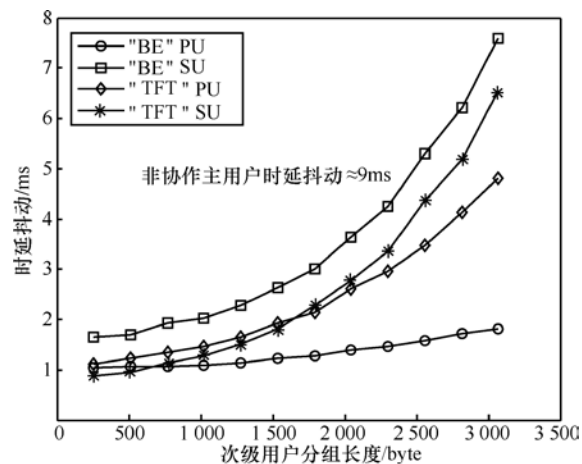


图 13 随次级用户分组长度变化时, 各协作模式的时延抖动性能

当主、次用户分组到达率为 80packet/s 和 100packet/s, 主用户分组长度为 2 048byte 时, 图 12 验证了所提分析模型对分组长度变化的适应性和有效性。随着次级用户分组长度的增加, 2 种协作模式下各类用户的时延均有所增加, 但相对于主用户, 次级用户的增幅要更大。然而, 即使这样也还是低于非协作模式下主用户的时延。相应的时延抖动性能如图 13 所示。至此, 可以获得这样的启示: 在保证甚至提高主用户 QoS 的前提下, 次级用户可以通过调整分组长度从而在保证自身业务时延的条件下进一步提高其吞吐量性能。

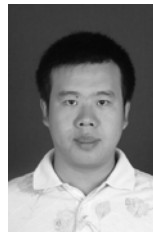
5 结束语

面对纷繁交错的异构接入网络环境, 网络间资源的相互认知、相互协作已经成为未来网络发展的必然趋势。本文首先分析了异构网络协作的动机, 讨论了多种不同的协作模式, 并从理论上给出了各种模式的性能分析, 揭示了其各自具有的本质特点。通过仿真充分验证了所提理论分析模型的准确性, 也进一步说明了各种资源共享模式的优劣, 并在此基础上提出了次级用户传输的优化设计建议。在后续的研究中, 将进一步分析各类用户的时延分布并设计实际可操作的协作认知协议。

参考文献:

- [1] THOMAS R W. Cognitive networks: adaptation and learning to achieve end-to-end performance objectives[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2006, 44(12): 51-57.
- [2] LANEMAN J N, WORNELL G W. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(10): 2415 - 2425.
- [3] LETAIEF K B, ZHANG W. Cooperative communications for cognitive radio networks[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(5): 878-893.
- [4] ZHANG Q, JIA J, ZHANG J. Cooperative relay to improve diversity in cognitive radio networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(2):111-117.
- [5] SIMEONE O, STANOJEV I, SAVAZZI S, *et al.* Spectrum leasing to cooperating secondary ad hoc networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(1):203-213.
- [6] GOLDSMITH A, JAFARY S A, MARIC I. Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: an information theoretic perspective[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(5):894-914.
- [7] ZHANG J, ZHANG Q. Stackelberg game for utility-based cooperative cognitive radio networks[A]. *The Tenth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (ACM MobiHoc)*[C]. New Orleans, Louisiana, USA, 2009. 23-31.
- [8] KRIKIDIS I, LANEMAN J N, THOMPSON J S, *et al.* Protocol design and throughput analysis for multi-user cognitive cooperative systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2009, 8(9): 4740-4751.
- [9] NARAYANAN S, PANWAR S S. To forward or not to forward: that is the question[J]. *Wireless Personal Communication*, 2007, 43(1): 65-87.
- [10] MOHAMMAD M R, HOSSAIN M J, EKRAM H. Opportunistic spectrum scheduling for multiuser cognitive radio: a queueing analysis[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2009, 8(10): 5259-5268.
- [11] ISAMELDIN S, JANNE L. Queueing analysis of opportunistic access in cognitive radios[A]. *IEEE the Second International Workshop on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management (IEEE CogART)*[C]. Aalborg, Denmark, 2009. 153-157.
- [12] ZHANG C X, WANG X B, LI J. Cooperative cognitive radio with priority queueing analysis[A]. *IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC)*[C]. Dresden, Germany, 2009. 1-5.
- [13] BERTSEKAS D, GALLAGER R. *Data Networks*[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1987.

作者简介:



张琰 (1983-), 男, 河南开封人, 博士, 西安电子科技大学讲师, 主要研究方向为无线分布式网络、协作通信和认知网络。



盛敏 (1975-), 女, 湖南长沙人, 博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为移动 ad hoc 网络、QoS 保障技术、认知网络等。



李建东 (1962-), 男, 江苏阜宁人, 博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带无线 IP 技术、移动通信、认知无线网络、ad hoc 网络等。



韩维佳 (1980-), 男, 陕西西安人, 博士, 西安电子科技大学讲师, 主要研究方向为认知无线电技术。



马晓 (1984-), 男, 陕西咸阳人, 西安电子科技大学博士生, 主要研究方向为无线通信、异构网络融合等。