

动态频谱接入无线传输性能分析*

毛建兵, 毛玉明, 冷 鹏, 白 翔

(电子科技大学 通信抗干扰技术国家级重点实验室, 成都 610054)

摘要: 动态频谱接入技术允许非授权用户利用已授权分配频谱信道的空闲空隙完成数据传输,但是要求不能对授权用户的信道传输造成严重影响。在两种不同的频谱信道共享策略下,利用排队分析模型,对采用动态频谱接入技术的非授权用户的链路传输性能以及对授权用户的传输影响进行了分析,并讨论了非授权用户性能的优化。尽管增加可利用的授权频谱信道的数量可以改善非授权用户的传输性能,但是其传输吞吐量的增加只能趋近于一个上界值。

关键词: 动态频谱接入; 频谱空隙; 排队系统模型; 多信道

中图分类号: TN92; TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2010)02-0618-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.02.060

Performance analysis of dynamic spectrum access wireless transmission

MAO Jian-bing, MAO Yu-ming, LENG Su-peng, BAI Xiang

(National Key Lab of Communication, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Dynamic spectrum access technology aims at improving spectrum utilization by allowing so-called secondary users to transmit in already assigned primary users' bands, provided that no significant amount of interference was generated. Dynamic spectrum access radio devices looked for temporarily unoccupied frequency bands and attempted to communicate in them. This paper proposed two spectrum sharing schemes for dynamic spectrum access system, and both the impact on the primary user's link performance and the transmission performance that could be acquired by the secondary user under the two spectrum sharing schemes were investigated using queueing system models. By optimizing the message length transmitted by the secondary user, it could improve the secondary user's goodput and enhance the channel utilization. However, the throughput achieved by the secondary user can only approximate to an upper bound even though multiple channels are available for the secondary user to use.

Key words: dynamic spectrum access(DSA); spectrum holes; queueing system model; multiple channels

0 引言

传统的频谱分配使用方式将某一个频段的频谱固定地授权分配给某一系统的用户使用,系统用户对所授权的频谱有绝对的独占占用权,其他系统的用户无法再利用该频谱。这种静态的频谱分配利用方式有效地保护了授权用户的通信免受其他用户的干扰。但是,随着无线通信在各个领域应用的飞速发展,更多的无线通信系统对频谱分配的需求越来越多,导致目前可被分配的频谱资源越来越少。有限的可用频谱资源成为了无线通信技术发展和应用的制约因素。

尽管可分配的频谱越来越少,但是现有已分配的频谱资源却多数没有得到充分利用,即使是在无线通信较为活跃的地区,2.4 GHz 以下频谱的利用率也不足 35%^[1]。文献[2]的研究表明,WLAN 网络中,一个 FTP 连接的传输过程中,有 75% 的信道时间空隙没有被利用;而一个 VoIP 会话过程中,则有高达 90% 的信道时间空隙。为了改善频谱资源缺乏的现状,提高可利用频谱资源的利用效率,提出了动态频谱接入(DSA)的

频谱利用技术^[2]。

动态频谱接入技术通过向非授权用户(以下称之为次用户)开放已授权的频谱,允许次用户利用授权用户(以下称之为主用户)信道的空闲空隙进行数据传输。在限制对主用户干扰程度的约束条件下,次用户检测主用户信道上的空闲空隙,并利用这些空隙完成自己的业务数据传输。与传统的无线传输方式不同,次用户的业务传输呈现出一些新的特点:

a) 没有持续可利用的固定无线信道。信道的可利用时间受主用户的影响,次用户只有在主用户信道空闲时才能利用信道进行传输。

b) 次用户的业务传输受主用户的干预。主用户对信道有绝对的占用权,次用户的传输受到对主用户干扰程度的约束限制,次用户不得肆意占用主用户的信道而长时间不释放,影响主用户的传输。

已有一些文献对可用频谱信道的检测与接入策略进行了研究,并在此基础上提出了一些 MAC 机制^[2~6],但都没有对链路传输性能进行分析。文献[7]利用等效带宽近似分析了次

收稿日期: 2009-05-22; **修回日期:** 2009-06-28 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60802024); 国家“863”计划资助项目(2005AA121122, 2005AA123820)

作者简介: 毛建兵(1981-),男,四川乐山人,博士研究生,主要研究方向为无线自组织网络、无线传感器网络(maojbing@gmail.com); 毛玉明(1956-),男,四川德阳人,教授,博导,主要研究方向为网络体系结构与协议、宽带通信网、无线通信网; 冷 鹏(1973-),男,四川攀枝花人,副教授,博士,主要研究方向为下一代无线网络、无线自组织网; 白翔(1977-),男,四川眉山人,工程师,博士,主要研究方向为无线自组织网络。

用户的传输性能,但其分析没有考虑次用户传输过程被中断以及其对主用户性能的影响。本文利用排队分析模型,针对两种不同的频谱信道共享策略,对次用户给主用户传输带来的影响以及次用户的链路传输性能进行了分析。

1 系统模型

考虑一个主用户信道,主用户的业务到达满足参数为 λ_p 的泊松过程,每个业务占用信道的传输时间 G 服从一般分布,其分布函数和概率密度函数分别以 $G(t)$ 和 $g(t)$ 表示,均值为 $1/\mu_p$,并令 $\rho_p = \lambda_p/\mu_p$ 。次用户实时检测主用户信道的占用情况,一旦主用户信道空闲,则立即占用信道传输队列中的业务。次用户的业务到达满足参数为 λ_s 的泊松过程,每个业务需要的信道传输时间 H 服从概率密度函数为 $h(t)$ 的一般分布,其分布函数以 $H(t)$ 表示,均值为 $1/\mu_s$,令 $\rho_s = \lambda_s/\mu_s$ 。考虑如下两种信道共享策略:

a) 主用户完全享有信道的占用权,次用户对其信道的“借用”应该在不影响其业务传输性能的前提下进行。因此,当次用户利用主用户信道执行业务传输期间,如果主用户有业务到达需要进行传输,主用户将武断地执行传输动作而不考虑其拥有的信道是否正在为次用户所占用,次用户检测到主用户的传输后立即中断自己的业务传输以避免干扰主用户。被中断传输的业务需要在将来主用户信道空闲之后再次进行传输。本文称这种策略为强拆占用策略。

b) 策略 a) 情况下,主用户的业务到达使得次用户的传输被迫中断,此时次用户的当前业务已部分完成了传输。被中断的业务需要将来再次重新进行传输,已经占用了信道时间的传输成为无效信道利用。为此,考虑在次用户占用信道传输期间,主用户不对次用户进行强拆占用,而是礼貌地等待当前正在进行的业务传输完成之后,再抢占信道进行传输。次用户也因此而放弃继续传输下一个业务,直到信道再次空闲。本文称这种策略为非强拆占用策略。

2 次用户对主用户传输的影响

采用策略 a), 由于一旦主用户有业务需要发送,他可以立即中断可能正在占用信道的次用户传输。因此,这种情况下次用户的信道占用不会影响主用户的传输性能,主用户的业务传输过程可模型化为一个 $M/G/1$ 排队系统。根据 $M/G/1$ 排队系统的分析^[8], 主用户业务的平均排队等待时间 $E[W_p]$ 和平均传输延迟时间 $E[T_p]$ 分别有

$$E[W_p] = \lambda_p E[G^2] / [2(1 - \rho_p)] \quad (1)$$

$$E[T_p] = 1/\mu_p + E[W_p] = 1/\mu_p + \lambda_p E[G^2] / [2(1 - \rho_p)] \quad (2)$$

采用策略 b), 当主用户有业务需要发送时,主用户可能需要等待次用户完成当前正在进行的业务传输之后才能执行传输。因此,次用户的信道占用将会影响主用户的传输性能。下面在策略 b) 下,分两种情况考察次用户信道占用对主用户传输的影响。

2.1 次用户业务到达为泊松过程

主用户和次用户共享信道进行业务传输,两者到达的业务

可以视做在一个公共队列中排队等待获得信道的传输服务,并且主用户业务较次用户业务能够优先获得服务。因此,主用户和次用户的业务传输过程可模型化为一个有优先权的非抢占 $M/G/1$ 排队系统^[9]。

根据文献[9]对有优先权的非抢占 $M/G/1$ 排队系统的分析,在信道利用率 $\eta = \rho_p + \rho_s < 1$ 时,主用户业务的平均排队等待时间 $E[W_p]$ 和平均传输延迟时间 $E[T_p]$ 分别有

$$E[W_p] = (\lambda_p E[G^2] + \lambda_s E[H^2]) / [2(1 - \rho_p)] \quad (3)$$

$$E[T_p] = 1/\mu_p + E[W_p] =$$

$$1/\mu_p + (\lambda_p E[G^2] + \lambda_s E[H^2]) / [2(1 - \rho_p)] \quad (4)$$

相对于策略 a) 情况下, $E[W_p]$ 和 $E[T_p]$ 的增加量 Δ 为

$$\Delta = \lambda_s E[H^2] / [2(1 - \rho_p)] \quad (5)$$

2.2 次用户总是有业务等待传输

假设次用户总是有业务需要进行传输,考察最坏情况下次用户的信道占用给主用户业务传输带来的影响。根据主用户业务传输的特性,可以将其模型化为一个空竭服务多重体假的 $M/G/1$ 排队系统^[10], 记为 $M/G/1(E, MV)$ 。 $M/G/1(E, MV)$ 排队系统是这样的一种排队系统: 系统中顾客(业务)的到达为参数 λ_p 的泊松过程,每个顾客的服务(传输)时间独立同分布,其概率密度函数为 $g(t)$ 。一旦系统中没有顾客,服务员(信道)立刻开始一次随机时间长度为 H 的休假。一次休假结束,系统中如果仍无顾客,就再次进行一次休假,直到某一次休假结束时,系统中有顾客在等待服务,这时服务员立即开始为这些顾客服务。本文将主用户信道被次用户业务传输占用的过程视为休假过程,一次休假等同于次用户利用主用户的信道空闲进行一个业务的传输。

主用户新到达业务的传输需要等待次用户当前传输的业务完成传输之后才能开始。以 R_s 表示次用户当前业务传输的剩余信道占用时间,其分布函数有

$$R_s(t) = P(R_s \leq t) = \int_0^t (1 - H(x)) dx / E[H] \quad (6)$$

根据 $M/G/1(E, MV)$ 排队系统稳态排队等待时间 W_p 的随机分解特性^[10], W_p 可以分解为两个独立随机变量之和: $W_p = W_o + W_d$ 。其中: W_o 是没有次用户占用信道时的主用户业务排队等待时间, W_d 是因次用户占用信道而引入的附加延迟。 W_o 和 W_d 的平均值为

$$E[W_o] = \lambda_p E[G^2] / [2(1 - \rho_p)] \quad (7)$$

$$E[W_d] = E[R_s] = E[H^2] / (2E[H]) \quad (8)$$

于是,主用户业务的平均排队等待时间 $E[W_p]$ 和平均传输延迟时间 $E[T_p]$ 分别有

$$E[W_p] = E[W_o] + E[W_d] = \frac{\lambda_p E[G^2]}{2(1 - \rho_p)} + \frac{E[H^2]}{2E[H]} \quad (9)$$

$$E[T_p] = \frac{1}{\mu_p} + E[W_p] = \frac{1}{\mu_p} + \frac{\lambda_p E[G^2]}{2(1 - \rho_p)} + \frac{E[H^2]}{2E[H]} \quad (10)$$

因此,最坏情况下,次用户信道占用给主用户业务传输带来的 $E[W_p]$ 和 $E[T_p]$ 增加量为

$$\Delta_{\max} = E[H^2] / (2E[H]) \quad (11)$$

3 次用户传输性能分析

本章首先将对策略 a) 和 b) 两种信道共享策略下次用户

的传输性能进行分析和比较,然后将分析扩展到多信道情况下,考察信道数量对次用户传输性能的影响。

3.1 策略 a) 下次用户传输性能分析

采用策略 a),主用户和次用户占用信道完成各自业务传输的过程可以模型化为一个有两类优先级顾客的强拆型 $M/G/1$ 排队系统^[11]。区别于 2.1 节所采用的有优先权的 $M/G/1$ 排队系统,这里允许到达的高优先级的主用户业务中断正在占用信道的次用户业务传输,并且,被中断的业务在信道再次空闲时不能从中断点继续进行传输,而需要重新开始传输。

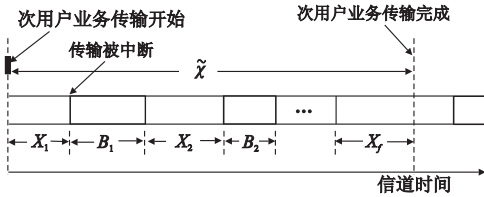


图1 策略a)下次用户的业务传输过程

如图1所示,定义次用户一个业务的广义传输时间 $\tilde{\chi}$ 为从该业务首次在信道上进行传输的时间开始直到成功完成传输的结束时间为止的时间,其中包括了在传输过程中被中断的无效传输时间 $X_i (i=1,2,\dots)$ 和主用户占用信道的时间 $B_i (i=1,2,\dots)$,以及最终成功完成业务传输占用的信道时间 X_f 。因此,业务传输被中断 n 次的情况下, $\tilde{\chi} = \sum_{i=1}^n (X_i + B_i) + X_f, n \geq 1$ 。由于主用户业务的到达为泊松过程,各次被中断的无效传输时间 X_i 独立同分布。主用户的信道占用时间 B_i 对应 $M/G/1$ 排队的忙期时间,因此也独立同分布。以 B 和 $B(t)$ 分别表示 $M/G/1$ 排队的忙期时间及其分布函数, $B(t)$ 的拉普拉斯—斯蒂尔切斯变换(Laplace-Stieltjes transform, LST)有^[8]

$$B^*(s) = \sum_{j=1}^{\infty} \int_0^{\infty} e^{-(s+\lambda_p)t} (\lambda_p t)^{j-1} / j! dG^{(j)}(t) \quad (12)$$

平均忙期时间长度为

$$E[B] = 1/(\mu_p - \lambda_p) \quad (13)$$

根据文献[11]对强拆型 $M/G/1$ 排队系统的分析,平均广义传输时间为

$$E[\tilde{\chi}] = (1/\lambda_p + E[B])(E[e^{\lambda_p B}] - 1) \quad (14)$$

次用户业务的平均排队等待时间 $E[W_s]$ 为

$$E[W_s] = \frac{\lambda_s E[\tilde{\chi}^2]}{2(1-\lambda_s E[\tilde{\chi}])} + \frac{\lambda_p E[B^2]}{2(1+\lambda_p E[B])} \quad (15)$$

于是,次用户业务的平均传输延迟时间 $E[T_s]$ 为

$$E[T_s] = E[W_s] + E[\tilde{\chi}] = \frac{\lambda_s E[\tilde{\chi}^2]}{2(1-\lambda_s E[\tilde{\chi}])} + \frac{\lambda_p E[B^2]}{2(1+\lambda_p E[B])} + \left(\frac{1}{\lambda_p} + E[B]\right)(E[e^{\lambda_p B}] - 1) \quad (16)$$

式(15)和(16)中, $E[B^2]$ 可通过式(12)计算获得,而 $E[\tilde{\chi}^2]$ 由下式给出

$$E[\tilde{\chi}^2] = 2(E[B] + 1/\lambda_p)^2 E[(e^{\lambda_p B} - 1)^2] + (E[B^2] + 2E[B]/\lambda_p + 2/\lambda_p^2)(E[e^{\lambda_p B}] - 1) - 2(E[B] + 1/\lambda_p)E[He^{\lambda_p B}] \quad (17)$$

需要指出的是,只有当 $E[W_s] < \infty$ 时,才能保证次用户传输系统稳定。因此,需要使得系统满足 $E[B^2] < \infty$ 和 $E[\tilde{\chi}^2] < \infty$ 。假设次用户队列中始终有业务等待传输,次用户的最大归

一化(以信道速率为基准,下同)传输吞吐量为

$$S_{\max} = E[H]/E[\tilde{\chi}] = \lambda_p E[H]/[(1 + \lambda_p E[B])(E[e^{\lambda_p B}] - 1)] \quad (18)$$

3.2 策略 a) 下次用户传输优化

策略 a) 条件下,次用户完成一个业务传输占用信道的的时间越长,被主用户中断的概率则越大;而减小次用户业务传输的信道占用时间,则同样多的数据需要被分成更多的业务数据块进行传输,传输的协议开销增大使得信道的有效利用率大大降低。为此,需要合理设置次用户每个业务传输的信道占用时间。

假设次用户始终有业务需要传输,以 T_x 表示次用户一个业务传输过程中占用的主用户空闲信道时间的总和。与广义传输时间 $\tilde{\chi}$ 相比, T_x 不包括业务传输过程被中断后直到信道再次空闲的等待时间 B_i 。定义次用户传输对可用空闲信道的利用率为 $\eta_s = E[H]/E[T_x]$ 。次用户的传输被中断后造成无效的信道占用,平均的无效时间为 $E[T_x] - E[H]$ 。因此,频谱信道被主用户和次用户利用的最大效率为

$$\eta = [E[\tilde{\chi}] - (E[T_x] - E[H])]/E[\tilde{\chi}] \quad (19)$$

假设次用户业务在无中断情况下所需的传输时间为 t ,则在广义传输时间 $\tilde{\chi}$ 内,传输被中断 K 次的概率为

$$P(K = n | t) = (1 - e^{-\lambda_p t})^n e^{-\lambda_p t}; n = 0, 1, 2, \dots \quad (20)$$

于是业务成功完成传输之前,平均的中断次数为

$$E[K] = \int_0^{\infty} (e^{\lambda_p t} - 1) h(t) dt \quad (21)$$

次用户传输一个业务所消耗的平均空闲信道时间为

$$E[T_x] = E[\tilde{\chi}] - E[K] \times E[B] = \int_0^{\infty} (e^{\lambda_p t} - 1) h(t) / \lambda_p dt \quad (22)$$

为了方便讨论,假设次用户的业务数据长度为固定长度,次用户一个业务需要的信道传输时间为 t_0 ,因此次用户业务传输时间的分布函数为

$$H(t) = P(H \leq t) = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ 1 & t \geq t_0 \end{cases} \quad (23)$$

其概率密度函数为 $h(t) = \delta(t - t_0)$ 。于是有

$$E[T_x] = \int_0^{\infty} (e^{\lambda_p t} - 1) \delta(t - t_0) / \lambda_p dt = (e^{\lambda_p t_0} - 1) / \lambda_p \quad (24)$$

$$\eta_s = E[H]/E[T_x] = \lambda_p t_0 / (e^{\lambda_p t_0} - 1) \quad (25)$$

可以看出,次用户每个业务传输占用信道的的时间 t_0 越长,则平均消耗的空闲信道时间 $E[T_x]$ 也越多,并且呈指数关系增长,空闲信道的利用率 η_s 也因此而降低。为了提高利用率 η_s ,需要减小 t_0 ,但是业务数据的传输往往会引入一定时间长度的协议信道占用开销,减小 t_0 使得有效载荷数据的传输减少。例如,IEEE 802.11 DCF 采用 RTS/CTS 传输模式时,每次数据传输都会因为 RTS/CTS 的握手交互机制而引入一定时间长度的信道占用开销。假设每次业务传输的信道时间占用开销为一定值 m_0 ,则次用户业务传输中有效载荷的归一化吞吐量为

$$\Psi(t_0, m_0) = (t_0 - m_0) / E[\tilde{\chi}] = k(t_0 - m_0) / (e^{\lambda_p t_0} - 1), t_0 > m_0 \quad (26)$$

其中, $k = \lambda_p (\mu_p - \lambda_p) / \mu_p$ 。以 t_0^{opt} 表示 $\Psi(t_0, m_0)$ 取得最大值时的最优 t_0 值,式(26)对 t_0 求导并令其等于 0 得

$$\Psi'(t_0, m_0) = k((m_0 \lambda_p - \lambda_p t_0 + 1) e^{\lambda_p t_0} - 1) (e^{\lambda_p t_0} - 1)^{-2} = 0, t_0 > m_0 \quad (27)$$

于是, t_0^{opt} 为如下方程的解

$$(m_0 \lambda_p - t_0 \lambda_p + 1) e^{\lambda_p t_0} - 1 = 0, t_0 > m_0 \quad (28)$$

解方程得

$$t_0^{opt} = [\text{Lambert-W}(-e^{-(m_0 \lambda_p + 1)}) + m_0 \lambda_p + 1] / \lambda_p \quad (29)$$

其中: Lambert-W(z) 表示超越方程 $W \cdot \exp(W) = z$ 的解。图 2 给出了 $\lambda_p = 0.1, \mu_p = 0.3, m_0 = 0.1$ 情况下,有效载荷的归一化吞吐量 $\Psi(t_0, m_0)$ 随时间 t_0 的变化曲线。

当次用户业务传输时间 H 为其他分布时,同样可以采用上述方法类似地进行分析与优化。

3.3 策略 b) 下次用户传输性能分析

采用策略 b),由 2.1 节的分析可知,主用户和次用户的业务传输过程可以用一个有优先权的非抢占 $M/G/1$ 排队系统模型进行分析,次用户的业务获得信道传输服务的优先级低于主用户的业务。因此,次用户业务的平均排队等待时间 $E[W_s]$ 和平均传输延迟时间 $E[T_s]$ 分别为

$$E[W_s] = (\lambda_p E[G^2] + \lambda_s E[H^2]) / [2(1 - \rho_p)(1 - \rho_p - \rho_s)] \quad (30)$$

$$E[T_s] = \frac{1}{\mu_s} + E[W_s] = \frac{1}{\mu_s} + \frac{\lambda_p E[G^2] + \lambda_s E[H^2]}{2(1 - \rho_p)(1 - \rho_p - \rho_s)} \quad (31)$$

假设次用户的队列中始终有业务等待传输,考察次用户传输在饱和情况下的特性。如图 3 所示,以 Z 表示次用户传输下一个业务之前主用户对信道的占用时间, T_n 表示次用户传输第 n 个业务占用的信道时间, Y 表示次用户相继完成传输的两个业务之间的时间间隔。 Z 也称之为主用户的忙期时间,其时间长度与 T_{n-1} 时间内主用户到达的业务数 J 有关,即

$$Z = \begin{cases} 0 & J = 0 \\ B_j & J = j; j = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (32)$$

其中: B_j 表示主用户开始进行业务传输时已经有 j 个业务等待在队列中情况下的忙期时间。当 $j = 1$ 时, B_j 的分布函数 $B_j(t)$ 同标准 $M/G/1$ 排队系统的忙期分布函数 $B(t)$, 因此有

$$E[B_1] = E[B] = 1 / (\mu_p - \lambda_p) \quad (33)$$

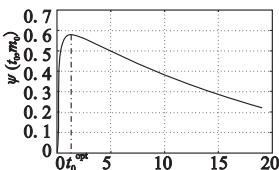


图2 $\Psi(t_0, m_0)$ 随 t_0 的变化曲线

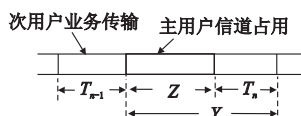


图3 策略b)下次用户的业务传输过程

以 j 个业务开始的主用户忙期时间 B_j 可以视为 j 个随机变量 B_1 相加,即 $B_j = j \times B_1$ 。于是

$$E[B_j] = j \times E[B] = j / (\mu_p - \lambda_p) \quad (34)$$

T_{n-1} 时间内主用户到达的业务数 J 的概率分布服从泊松分布,当 $T_{n-1} = t$ 时其表示如下:

$$P(J = j | T_{n-1} = t) = (\lambda_p t)^j e^{-\lambda_p t} / j!; j = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (35)$$

于是主用户的忙期时间平均值为

$$\begin{aligned} E[Z] &= \int_0^\infty E[Z | T_{n-1} = t] h(t) dt = \\ &= \int_0^\infty (\sum_{j=1}^\infty E[B_j] P(J = j | T_{n-1} = t)) h(t) dt = \\ &= \int_0^\infty \lambda_p t (\mu_p - \lambda_p)^{-1} h(t) dt = \lambda_p E[H] (\mu_p - \lambda_p)^{-1} \end{aligned} \quad (36)$$

于是,业务传输完成的平均时间间隔为

$$E[Y] = E[Z] + E[T_n] = \mu_p (\mu_p - \lambda_p)^{-1} E[H] \quad (37)$$

次用户的最大归一化传输吞吐量为

$$S_{max} = E[T_n] / (E[Z] + E[T_n]) = (\mu_p - \lambda_p) / \mu_p \quad (38)$$

3.4 策略 a) 和 b) 下传输性能比较

本节将两种策略下主用户和次用户的传输性能进行对比,包括次用户的业务传输时间为定长分布和负指数分布两种情况。分析采用的参数取值如下: $\lambda_p = 0.1, \mu_p = 0.3, G$ 取负指数分布; $\mu_s = 0.6, H$ 分别取定长分布 H_1 和负指数分布 H_2 。

主用户业务的平均传输延迟时间 $E[T_p]$ 随次用户业务到达速率 λ_s 的变化如图 4 所示。采用策略 b) 时,在 λ_s 相等的情况下,定长业务的传输给主用户传输带来的影响要小于负指数分布的情况。图 5 给出了次用户业务的平均传输延迟时间 $E[T_s]$ 随 λ_s 的变化曲线;图 6 给出了次用户的最大归一化传输吞吐量 S_{max} 随 μ_s 的变化曲线。可以看出,满足平均传输延迟时间一定的约束条件下,采用定长分布时次用户可以完成更快到达速率的业务传输。并且,在策略 a) 下,次用户采用定长分布的业务可以获得更好的传输吞吐量性能,且其业务传输时间越长,则被主用户中断的概率越大,因此,选择较大的 μ_s 可以使得次用户的 S_{max} 更大,但是策略 b) 下 S_{max} 却不受 μ_s 影响。

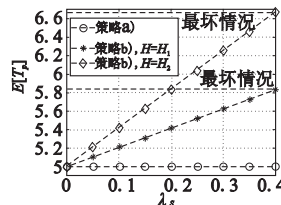


图4 主用户平均传输延迟时间

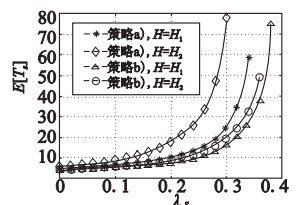


图5 次用户平均传输延迟时间

3.5 多信道下次用户传输性能分析

由于单信道情况下次用户的业务传输遇到主用户占用信道时需要等待直到信道空闲后才又能开始传输。因此,为了改善次用户的业务传输性能,次用户常常维护多个主用户信道供自己业务传输使用。当次用户正在“借用”的某个信道受主用户的影响而业务传输不能再继续时,次用户将立即切换到另一个空闲信道上,继续传输队列中等待传输的业务。本节将采用服务台可修的排队模型,对多信道情况下的次用户传输性能进行分析。

由于多服务台 $M/G/c$ 排队模型的分析目前仍比较困难^[12],这里作如下假设以简化分析的复杂度:设次用户维护着 N 个主用户信道,各个信道上主用户的忙期和空闲期满足独立同分布的 ON/OFF 随机过程,并且忙期时间和空闲期时间分别满足参数为 μ_p 和 λ_p 的负指数分布;当主用户要求占用信道进行传输时,次用户需要立即停止在该信道上的传输以避免干扰主用户,并且未完成传输的业务需要在寻找到空闲信道后重新进行传输;次用户的业务到达和业务传输时间特性同第 1 章所述;任一时刻次用户只能在一个信道上进行业务传输,不能同时占用多个信道进行传输。

根据以上假设,将主用户对信道的占用抽象为服务台发生故障。这样,次用户的业务传输过程可以模型化为一个特殊的服务台可修的 $M/G/1$ 排队系统。如图 7 所示, $\bar{\chi}$ 表示次用户业务从开始传输到成功完成的广义传输时间, $X_i (i = 1, 2, 3, \dots)$ 表示传输被中断的无效传输时间, X_f 表示最终成功完成传输的时间。当传输被中断后,次用户立即切换到另一个空闲信道上重新进行传输。如果其余的 $N - 1$ 个信道均被主用户占

用,则次用户等待直到其中一个信道空闲后再进行传输。以 $B_i (i = 1, 2, 3, \dots)$ 表示传输中断后再次开始传输之前的等待时间, B_i 为独立同分布的随机变量, 将其统一记为 B_x , 它的概率分布可以表达为

$$B_x = \begin{cases} 0 & 1 - p_0 \\ Q & p_0 \end{cases} \quad (39)$$

其中: $p_0 = \lambda_p^{N-1} (\lambda_p + \mu_p)^{-(N-1)}$, 表示其余 $N-1$ 个信道均被主用户占用的概率; Q 为一随机变量, 表示 N 个信道均被主用户占用时的等待时间。设 N 个信道均被主用户占用时的剩余忙期时间分别为 Z_1, Z_2, \dots, Z_N , 由于负指数分布的无记忆性质, Z_1, Z_2, \dots, Z_N 均服从参数为 μ_p 的负指数分布。次用户需要等待最先结束忙期的信道空闲后才能继续进行传输, 因此次用户的等待时间 $Q = \min(Z_1, Z_2, \dots, Z_N)$ 。 Q 的分布满足参数为 $N\mu_p$ 的负指数分布, 于是有 B_x 的均值和二阶矩分别为

$$E[B_x] = p_0 / (N\mu_p) \quad (40)$$

$$E[B_x^2] = 2p_0 / (N\mu_p)^2 \quad (41)$$

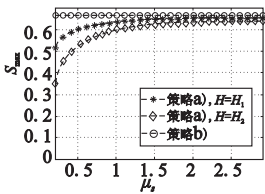


图6 次用户最大归一化传输吞吐量

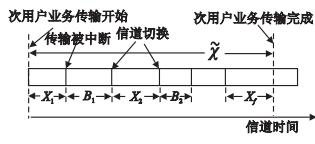


图7 多信道下次用户的业务传输过程

根据文献[13]对服务台可修的 $M/G/1$ 排队系统的分析, $\tilde{\chi}$ 的均值和二阶矩分别有

$$E[\tilde{\chi}] = (1/\lambda_p + E[B_x]) (E[e^{\lambda_p \tilde{\chi}}] - 1) \quad (42)$$

$$E[\tilde{\chi}^2] = 2(E[B_x] + 1/\lambda_p)^2 E[(e^{\lambda_p \tilde{\chi}} - 1)^2] + (E[B_x^2] + 2E[B_x]/\lambda_p + 2/\lambda_p^2) (E[e^{\lambda_p \tilde{\chi}}] - 1) - 2(E[B_x] + 1/\lambda_p) E[H e^{\lambda_p \tilde{\chi}}] \quad (43)$$

并且,次用户业务的平均传输延迟时间为

$$E[T_s] = E[\tilde{\chi}] + \frac{\lambda_s E[\tilde{\chi}^2]}{2(1 - \lambda_s E[\tilde{\chi}])} + \frac{\lambda_p E[B_x^2]}{2(1 + \lambda_p E[B_x])} \quad (44)$$

次用户业务的平均排队等待时间为

$$E[W_s] = \frac{\lambda_s E[\tilde{\chi}^2]}{2(1 - \lambda_s E[\tilde{\chi}])} + \frac{\lambda_p E[B_x^2]}{2(1 + \lambda_p E[B_x])} \quad (45)$$

于是,次用户的最大归一化传输吞吐量为

$$S_{\max} = 1 / (\mu_s E[\tilde{\chi}]) \quad (46)$$

图8和9是在 $\lambda_p = 0.3, \mu_p = 0.1, \mu_s = 0.7, H$ 分别取定长分布 H_1 和负指数分布 H_2 参数设置下获得的。可以看出,信道数量的增加使得次用户的平均传输延迟时间 $E[T_s]$ 减小,最大归一化传输吞吐量 S_{\max} 提高。尽管如此, S_{\max} 只能趋近于一个远小于1的上限值。也就是说,即使信道数量再多,次用户也无法获得更高的吞吐量。实际上,当 N 较大时,式(46)有

$$S_{\max} = (\mu_s E[\tilde{\chi}])^{-1} \approx \begin{cases} \lambda_p / [\mu_s (e^{\lambda_p / \mu_s} - 1)] & H = H_1 \\ (\mu_s - \lambda_p) / \mu_s & H = H_2 \end{cases} \quad (47)$$

4 结束语

动态频谱接入技术被认为是一种可以解决目前无线通信

中频谱资源紧张问题的新技术。本文利用排队系统模型,分析了次用户在两种频谱信道共享策略下的业务传输性能,以及其对主用户传输的影响。通过优化次用户业务数据传输的信道占用时间长度,可以提高次用户传输中有效载荷数据的吞吐量。多信道情况下,信道数量的增加可以改善次用户的传输性能,但是其最大归一化传输吞吐量的增加只能趋近于一个小于1的上限值。本文只研究了次用户的链路传输性能,今后将对次用户的网络性能作进一步的研究。

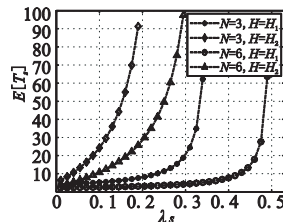


图8 多信道下次用户平均传输延迟时间

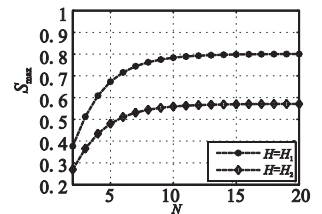


图9 多信道下次用户最大归一化传输吞吐量

参考文献:

- [1] FCC. Facilitating opportunities for flexible, efficient, and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies [R]. [S. l.]: ET Docket, 2003.
- [2] ZHAO Q, SWAMI A. A decision-theoretic framework for opportunistic spectrum access [J]. IEEE Wireless Communications, 2007, 14(4): 14-20.
- [3] ZHAO Q, TONG L, SWAMI A. Decentralized cognitive MAC for dynamic spectrum access [C] // Proc of the IEEE DySPAN 2005. New York: IEEE, 2005: 224-232.
- [4] SU H, ZHANG X. Opportunistic MAC protocols for cognitive radio based wireless networks [C] // Proc of the 41st Annual Conference on Information Sciences and Systems. Piscataway: IEEE, 2007: 363-368.
- [5] HUNG S, CHENG Y, WU E H, et al. An opportunistic cognitive MAC protocol for coexistence with WLAN [C] // Proc of the IEEE ICC 2008. Piscataway: IEEE, 2008: 4059-4063.
- [6] GEIRHOFER S, TONG L, SADLER B M. Dynamic spectrum access in the time domain: modeling and exploiting white space [J]. IEEE Communications Magazine, 2007, 45(5): 66-72.
- [7] ZHONG F. Performance analysis of dynamic spectrum access networks [C] // Proc of the IEEE PerCom 2008. Piscataway: IEEE, 2008: 336-341.
- [8] 唐应辉, 唐小我. 排队论 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 73-95.
- [9] BERTSEKAS D, GALLAGER R. Data networks [M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1987: 159-163.
- [10] 田乃硕. 休假随机服务系统 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2001: 56-62.
- [11] JAISWAL N K. Priority queues [M]. New York: Academic Press, 1966: 102-120.
- [12] SMITH J M. M/G/c/K blocking probability models and system performance [J]. Performance Evaluation, 2003, 52(4): 237-267.
- [13] GAVER D P. A waiting line with interrupted service, including priorities [J]. Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological), 1962, 24(1): 73-90.