

机会频谱接入系统中基于次用户容量分析的检测参数设计

孙 君* 朱洪波

(南京邮电大学通信与信息工程学院江苏省无线重点实验室 南京 210003)

摘 要: 该文对认知网络中基于机会频谱接入(OSA)技术的认知用户的信道容量表达式及其检测参数进行了研究。首先讨论了次用户信号干扰噪声比(SINR)的特性,得到存在干扰和不存在干扰两种状况下的 SINR 的均值表达式,探讨 SINR 对次用户信道容量的影响,以及次用户的信道容量在 OSA 方式下的变化。并在此基础上,结合信道统计特性,运用跨层设计思想,设计次用户的发送数据帧长和检测频率。从分析结果可以看出,主用户对授权信道的占用模型影响次用户的 SINR,进而影响到次用户检测频率和传输帧长的设计,结果表明从次用户物理层特性和主用户业务特性结合角度设计次用户检测参数的方案,在保证次用户吞吐量要求的同时,降低了主次用户之间的干扰,同时提高了系统对频谱的利用率。

关键词: 无线通信; 数据帧长; 检测频率; 信道噪声干扰比; 信道容量; 机会频谱接入

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)01-0205-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00170

Detection-parameters Design Based on Capacity Analysis of Secondary Users in OSA Systems

Sun Jun Zhu Hong-bo

(Wireless Key Laboratory of Jiangsu Province, Institute of Communication Technologies,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Channel capacities and sensing parameters for Secondary Users (SUs) based on Opportunistic Spectrum Access (OSA) technique are studied in this paper. First, characteristics of the Signal-to-Interference-and-Noise Ratio (SINR) of SUs are discussed, from which the expressions about the average SINR are derived under interference and non-interference cases. Then, the influences of SINR on the channel capacity under OSA mode are discussed. After that, the data frame length and the detection frequency are designed from the cross layer design and stochastic characteristics of fading channels points of view. It can be seen from the analysis that the channel occupancy mode of the Primary Users (PUs) has influence on the SINR of SUs. It also has been proved that the scheme which joins the characteristics on the physical layer with occupancy mode of PUs, can reduce the collision probability between SUs and PUs. Meanwhile, it can improve the frequency efficiency of the system on the condition of meeting the required throughput of SUs.

Key words: Wireless communication; Data frame length; Detection frequency; Signal-to-Interference-and-Noise Ratio (SINR); Channel capacity; Opportunistic Spectrum Access (OSA)

1 引言

认知网络的目标之一是实现最高效频谱利用率并确保用户服务质量。因此对于点对点通信而言,无论是资源的共享策略^[1,2],还是资源的竞争策

略^[3,4],次用户的吞吐量或者信道容量往往被选为系统的效用函数,并作为频谱、时隙等参数优化和调度的依据。如此看来,次用户的容量计算在认知网络中就显得尤为重要。

无线通信技术发展至今,通信信道和通信环境已经远远超出香农时代的想象。现在的认知网络和认知通信使得通信信道更加复杂多变。这种变化,使得香农容量中的信号与信道加性高斯白噪声的平均功率,即信噪比 SNR,也更加复杂多变。人们发现研究信道干扰噪声比 SINR 比单独的 SNR 更有实际价值,因此,进一步分析共享或者共存通信情况下的 SINR 特性,进而分析 SINR 特性下的信道容

2010-03-01 收到, 2010-06-14 改回

第 44 批博士后科学基金(20080441067), 江苏省博士后科研资助(0802017B), 第 2 批博士后特别资助基金(200902528), 国家 973 计划项目(2007CB310600), 国家 863 计划重点项目(2009AA011300), 国家科技重大专项基金(2009ZX03003-002, 2009ZX03007-004)和国家青年基金(61001080)资助课题

*通信作者: 孙君 sunjun@njupt.edu.cn

量,是分析和改进认知网络技术和性能的理论基础和依据。

在 OSA 系统中,对认知用户(次用户)而言,其传输帧长和对主用户的检测频率是影响次用户性能的主要参数。如果检测时间长、频率高,次用户对主用户的检测概率高,这固然能够更好地保护主用户,但是,也会给次用户带来传输中断频率增加、时延增加、甚至数据业务传输的吞吐量减少等负面影响。因此,对次用户而言,希望有一个合理的传输帧长和检测频率,能有尽可能多的连续传输数据的机会,以便传输更多的有用数据,并且这种性能的改善需要以尽量减少与主用户的碰撞为前提。帧长和检测频率的研究在文献[5-7]中有所涉及。文献[5]从最大化次用户吞吐量角度,在次用户与主用户的碰撞概率不大于某一门限约束条件下,得到次用户的传输帧长。其吞吐量采用归一化吞吐量,没有考虑到主用户在次用户传输过程中突然占用信道时对次用户吞吐量的影响。文献[6]从检测概率和虚警概率角度优化次用户的传输帧长,虽然考虑到了主用户对信道的占用特性,但也是从次用户对主用户的影响考虑,没有考虑次用户容量受到主用户的影响。文献[7]从跨层的角度设计次用户帧长和检测时间,同样也只是采用了次用户的归一化容量。以上成果单一从帧长角度进行设计,并没有同时将帧长和检测频率分开来考虑。

鉴于此,本文将首先探讨在 OSA 方式下次用户 SINR 的特性,进而探讨在 SINR 特性下,次用户信道容量的变化。其次在得到的 SINR 和容量结果上设计次用户的帧长和检测频率。

2 系统模型

图 1 是 OSA 系统中主次用户的系统模型。对于主用户而言,其发送端周围存在一个由其最大可允许的干扰功率决定的以主用户发送端为圆心以 d_p 为半径的保护区域。对于次用户而言,其发送端同样存在一个由其最大可允许的干扰功率决定的以次用户发送端为圆心以 d_s 为半径的保护区域。主用户发送端到次用户发送端的距离为 D 。

若 $D < d_p + d_s$,即次用户发送端进入主用户的保护区域则对主用户发送端产生干扰,另一方面,如果主用户在次用户接收端的功率大于次用户可容忍的范围,次用户的传输质量也会下降。 r_{pp} 为主用户发送端到主用户接收端的距离; h_{pp} 为主用户发送端到主用户接收端的无线传输信道衰落因子; r_{ps} 为主用户发送端到次用户接收端的距离; h_{ps} 为主用户发送端到次用户接收端的无线传输信道衰落因子;

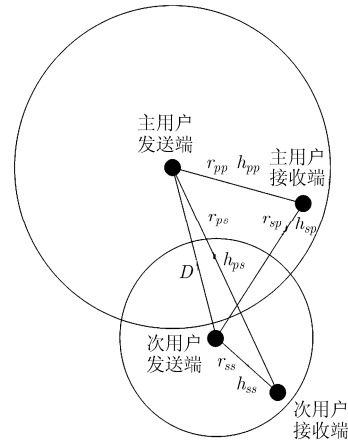


图 1 OSA 系统模型

r_{ss} 为次用户发送端到次用户接收端的距离; h_{ss} 为次用户发送端到次用户接收端的无线传输信道衰落因子; r_{sp} 为次用户发送端到主用户接收端的距离; h_{sp} 为次用户发送端到主用户接收端的无线传输信道衰落因子。

图 2 示出了单个主用户使用授权信道和单个次用户检测授权信道并在授权信道上传输数据的帧结构框图。这里假设主用户对授权信道的占用符合指数开-关流量模型。该模型中主用户占用信道,即开的平均持续时间为 β_0 。主用户不占用信道,即关的平均持续时间为 β_1 。主用户由占用信道到释放信道所用的时间为 t ,由释放信道到使用信道所用的时间为 tt ,二者均服从指数分布。假设次用户帧长为 T ,传输数据之前 τ ms 时间用于对主用户信道的检测。当检测到主用户不存在时,在 $T - \tau$ 时间内传输次用户数据,在数据传输过程中,主用户会随时出现,此时主用户数据包会发生碰撞,严重情况会使次用户的数据包丢失。同样,在下一个帧的开始 τ 时间内仍然是检测时间,因此,帧长 T 既决定了次用户数据传输帧长(相应参数为次用户吞吐量)又决定了次用户对主用户检测的频率(相应参数为碰撞概率)。

3 次用户 SINR 分析

如图 2 所示,在 T 时间内,如果次用户在 τ 时间内的检测结果是没主用户在使用授权信道,那

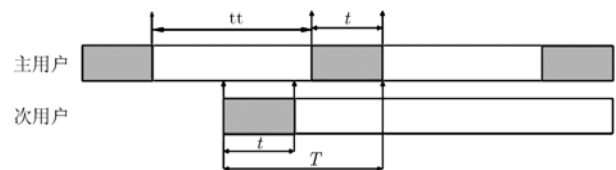


图 2 用户使用授权信道帧结构框图

么次用户决定在 $T - \tau$ 时间内开始传输数据。在传输过程中, 一旦主用户出现, 而次用户又没有及时让出信道, 主次用户间会发生碰撞, 二者性能都会受到影响。因此, 次用户帧长的设计必须将对主用户出现的预测考虑在内, 这体现在次用户对主用户的检测频率的设计上。为此, 本文从次用户 SINR 的变化特性入手进行分析。

当主用户在次用户传输过程中出现, 而次用户无法检测到时, 次用户的 SINR 关于随机变量 t 的表达式为

$$\gamma_c(\cdot) = \frac{h_{ss}^2 P_s \frac{t}{T - \tau}}{h_{ps}^2 P_0 \frac{t}{T - \tau} + N_0 B} = \frac{h_{ss}^2 P_s t}{h_{ps}^2 P_0 t + N_0 B(T - \tau)} \quad (1)$$

其中 P_0 为主用户在次用户接收端的接收功率; P_s 为次用户在次用户接收端的接收功率, N_0 为白高斯噪声功率, B 为信道传输带宽。该公式说明的是主用户和次用户发生碰撞时, 主用户的出现对次用户 SINR 的影响。 $t/(T - \tau)$ 是主用户在次用户传输过程中再次占用信道的概率, 即主次用户在次用户传输过程中发生碰撞的概率。 $h_{ss}^2 P_s (t/(T - \tau))$ 是主次用户发生碰撞后, 次用户接收信号功率, $h_{ps}^2 P_0 (t/(T - \tau))$ 是主次用户发生碰撞后, 主用户在次用户接收端作为对次用户的干扰的接收信号功率。并有

$$P_0 = \frac{P_{t0}}{r_{ps}^\alpha}, \quad P_s = \frac{P_{ts}}{r_{ss}^\alpha} \quad (2)$$

P_{t0} 为主用户发送端的发送功率; P_{ts} 为次用户发送端的发送功率。因 t 服从如下指数分布

$$f(t) = \frac{1}{\beta_0} \exp(-t/\beta_0) dt \quad (3)$$

因此, 发生碰撞时的 SINR 均值表示为

$$\begin{aligned} \overline{\gamma_c(\cdot)} &= \int_0^{T-\tau} \gamma_c(\cdot) \frac{1}{\beta_0} \exp(-t/\beta_0) dt \\ &= A \left(1 - e^{-\frac{T-\tau}{\beta_0}} \right) - \frac{AN_0 B(T-\tau)}{\left(h_{ps}^2 \frac{P_{t0}}{r_{ps}^\alpha} \right)^2} e^{-\frac{N_0 B(T-\tau)}{\beta_0 h_{ps}^2 \frac{P_{t0}}{r_{ps}^\alpha}}} \\ &\quad \cdot [E_1(N_0 B(T-\tau)) - E_1(h_{ps}^2 (P_{t0}/r_{ps}^\alpha)(T-\tau) + N_0 B(T-\tau))] \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $A = \frac{h_{ss}^2 P_{ts} r_{ps}^\alpha}{\beta_0^2 h_{ps}^2 P_{t0} r_{ss}^\alpha}$ 。因为, $h_{ps}^2 P_{t0} \ll r_{ps}^\alpha$, 所以 $h_{ps}^2 \frac{P_{t0}}{r_{ps}^\alpha} \ll 1$, $N_0 B(T-\tau) \approx h_{ps}^2 (P_{t0}/r_{ps}^\alpha)(T-\tau) + N_0 B(T-\tau)$, $[E_1(N_0 B(T-\tau)) - E_1(h_{ps}^2 (P_{t0}/r_{ps}^\alpha)(T-\tau) + N_0 B(T-\tau))]$ 趋近于零。因此式(4)中的第 2 项可以省略。

$$\begin{aligned} \overline{\gamma_c(\cdot)} &= \frac{h_{ss}^2 P_{ts} r_{ps}^\alpha}{\beta_0^2 h_{ps}^2 P_{t0} r_{ss}^\alpha} \left(1 - e^{-\frac{T-\tau}{\beta_0}} \right) \\ &= \frac{\gamma_{ss} P_{ts} r_{ps}^\alpha}{\beta_0^2 \gamma_{ps} P_{t0} r_{ss}^\alpha} \left(1 - e^{-\frac{T-\tau}{\beta_0}} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\gamma_{ss} = h_{ss}^2/(N_0 B)$, $\gamma_{ps} = h_{ps}^2/(N_0 B)$, γ_{ss} 是当次用户发送单位功率时, 信道 h_{ss} 上的瞬时 SINR 值, γ_{ps} 是当主用户发送单位功率时, 信道 h_{ps} 上的瞬时 SINR 值。从式(5)可以看出, 在碰撞发生时, 次用户的 SINR 关于随机变量 t 的均值 $\overline{\gamma_c(\cdot)}$ 是发送功率 P_{t0} 和 P_{ts} , 距离参数 r_{ss} 和 r_{ps} , 主用户占用信道的模型参数 β_0 , T , τ 的函数外, 也是信道 h_{ss} 上的瞬时 SINR 值 γ_{ss} 和信道 h_{ps} 上的瞬时 SINR 值 γ_{ps} 的参数。参数 γ_{ss} 是随机变量, 当参量 γ_{ps} 固定时, 分析 $\overline{\gamma_c(\cdot)}$ 在信道 h_{ss} 上的均值。当信道 h_{ss} 为 Rayleigh 信道时, $\overline{\gamma_c(\cdot)}$ 的均值为

$$\begin{aligned} \overline{\gamma_{fc}} &= \int_{\gamma_0}^{\infty} \frac{\gamma_{ss} P_{ts} r_{ps}^\alpha}{\beta_0^2 \gamma_{ps} P_{t0} r_{ss}^\alpha} \left(1 - e^{-\frac{T-\tau}{\beta_0}} \right) f_0(\gamma_{ss}) d\gamma_{ss} \\ &= \frac{\overline{\gamma_{ss}} P_{ts} r_{ps}^\alpha}{\beta_0^2 \gamma_{ps} P_{t0} r_{ss}^\alpha} e^{-\frac{\gamma_0}{\overline{\gamma_{ss}}}} \left(1 - e^{-\frac{T-\tau}{\beta_0}} \right) \left(1 + \frac{\gamma_0}{\overline{\gamma_{ss}}} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $f_0(\gamma_{ss})$ 是变量 γ_{ss} 在 Rayleigh 衰落信道条件下的概率密度函数, γ_0 是次用户中断概率对应的 SINR 值, $\overline{\gamma_{ss}}$ 是次用户在信道 h_{ss} 上通信的平均 SINR 值。式(6)中的 SINR 均值对应次用户的容量为

$$\overline{C_c} = \frac{T-\tau}{T} B \lg(1 + \overline{\gamma_{fc}(\cdot)}) \quad (7)$$

式(7)表明了碰撞发生时, 次用户可达到容量的一个均值。同样地, 在 T 时间内, 主用户不出现时, 次用户 SINR 是关于随机变量 tt 的函数, 其表达式为

$$\gamma_{nc}(\cdot) = \frac{h_{ss}^2 (P_{ts}/r_{ss}^\alpha) tt}{N_0 B(T-\tau)} \quad (8)$$

tt 服从如下指数分布

$$f(tt) = \frac{1}{\beta_1} \exp\left(-\frac{tt}{\beta_1}\right) dtt \quad (9)$$

此时, 没有发生碰撞时的 SINR 均值表示为

$$\begin{aligned} \overline{\gamma_{nc}(\cdot)} &= \int_0^{T-\tau} \gamma_{nc}(\cdot) \frac{1}{\beta_1} \exp\left(-\frac{tt}{\beta_1}\right) dtt \\ &= \frac{\gamma_{ss} P_{ts}}{r_{ss}^\alpha (T-\tau)} \left(e^{-\frac{T-\tau}{\beta_1}} (\tau - T - \beta_1) + \beta_1 \right) \end{aligned} \quad (10)$$

$\overline{\gamma_{nc}(\cdot)}$ 对应的一个帧内的关于 γ_{ss} 的瞬时信道容量为

$$\overline{C_{nc}} = \frac{T-\tau}{T} B \lg(1 + \overline{\gamma_{nc}(\cdot)}) \quad (11)$$

在 Rayleigh 衰落信道条件下 $\overline{\gamma_{nc}(\cdot)}$ 的均值为

$$\begin{aligned}\overline{\gamma_{fnc}} &= \int_{\gamma_0}^{\infty} \frac{\gamma_{ss} P_{ts}}{r_{ss}^{\alpha} (T - \tau)} \left(e^{-\frac{T-\tau}{\beta_1} (\tau - T - \beta_1) + \beta_1} \right) f_0(\gamma_{ss}) d\gamma_{ss} \\ &= \frac{\gamma_{ss} P_{ts}}{r_{ss}^{\alpha} (T - \tau)} e^{-\frac{\gamma_0}{\gamma_{ss}}} \left(e^{-\frac{T-\tau}{\beta_1} (\tau - T - \beta_1) + \beta_1} \right) \left(1 + \frac{\gamma_0}{\gamma_{ss}} \right)\end{aligned}\quad (12)$$

这个 SINR 均值对应次用户容量为

$$\overline{C_{nc}} = \frac{T - \tau}{T} B \lg(1 + \overline{\gamma_{fnc}}(\cdot)) \quad (13)$$

式(13)表明了主用户在未发生碰撞时, 次用户可达到容量的一个均值。

4 次用户 SINR 的二阶统计特性

次用户在无线授权信道上传输, 其信道特性与衰落信道特性一致, 在衰落信道条件下, 次用户 SINR 的二阶统计特性包括电平交叉率和平均衰落持续时间两个重要参数。同样, 在 OSA 系统中, 主用户占用信道的随机特性也会影响到次用户在无线信道上的传播特性, 其 SINR 的二阶统计特性也会反映主用户占用信道的信息。为此, 此处以次用户二阶统计特性来作为定义次用户检测频率的理论基础。

电平交叉率(LCR)用来描述 SINR 电平通过一个给定门限电平的次数。对瑞利衰落信道而言, 其 LCR 表达式为^[8]

$$N_j = \sqrt{\frac{2\pi\gamma_j}{\gamma}} f_D e^{-\gamma_j/\bar{\gamma}} \quad (14)$$

其中 f_D 为衰落信道的最大多普勒频率, $\bar{\gamma}$ 为衰落信道的平均 SINR, γ_j 为 SINR 门限值。平均衰落持续时间(AFD)用来描述 SINR 电平在门限值以下持续的时间。对瑞利衰落信道而言, 其 AFD 表达式为^[8]

$$\begin{aligned}\overline{T_{afd}} &= \frac{p(\gamma_2 \leq \gamma < \gamma_1)}{N_2 - N_1} \\ &= \frac{e^{-\gamma_1/\bar{\gamma}} - e^{-\gamma_2/\bar{\gamma}}}{\bar{\gamma} \sqrt{2\pi\bar{\gamma}} f_D (\sqrt{\gamma_2} e^{-\gamma_2/\bar{\gamma}} - \sqrt{\gamma_1} e^{-\gamma_1/\bar{\gamma}})}\end{aligned}\quad (15)$$

显然, 由于主用户的出现, 使次用户的 SINR 会突然降低到正常电平以下, 次用户 SINR 电平在正常值与主用户出现时的干扰值之间的平均持续时间为

$$\overline{T_{AFD}}(T^*) = \frac{p(\overline{\gamma_{fnc}}(T^*) \leq \gamma < \overline{\gamma_{fnc}}(T^*))}{N_2 - N_1} \quad (16)$$

在此, T^* 是次用户帧长的一个最优解。

5 次用户帧长的设计

对于单个次用户而言, 其传输帧长的设计要确保次用户有一个最有效的容量, 因此须满足以下要

求:

$$\max \overline{C_{nc}} \quad (17)$$

即, 使次用户正常传输时的信道容量最大化, 通过以上优化的求解可以得到次用户帧长的一个最优解 T^* 。

另一方面, 从次用户 SINR 的二阶统计特性角度来看, 主用户在次用户传输过程中出现时, 次用户 SINR 的均值为 $\overline{\gamma_{fnc}}(\cdot)$, 当次用户选择最优帧长 T^* 时对应的 SINR 的均值为 $\overline{\gamma_{fnc}}(T^*)$ 。主用户在次用户传输过程中没有出现时, 次用户 SINR 的均值为 $\overline{\gamma_{fnc}}(\cdot)$, 同样地, 当次用户选择最优帧长 T^* 时对应的 SINR 的均值为 $\overline{\gamma_{fnc}}(T^*)$ 。根据式(16), 次用户选择最优帧长 T^* 时, SINR 在两种情况下的均值之间的 AFD 表示为 $T_{AFD}(T^*)$ 。

次用户 SINR 电平保持在 $\overline{\gamma_{fnc}}(T^*)$ 电平之上的平均时间为 T_{AFD} 秒, 意味着在时间 T_{AFD} 之内, 次用户与主用户碰撞的概率很低, 在 T_{AFD} 时间之外, 次用户就需要对信道状况进行重新检测, 因此, T_{AFD} 被定义为次用户对信道的检测频率, 即对信道进行下一次检测的时间间隔为 T_{AFD} 。

在此, 定义了次用户检测频率和传输帧长两种不同的参量。对两种参量的选择需要根据系统设计的要求。如果系统中只允许次用户设置固定传输帧长, 此时次用户需要在 T_{AFD} 和 T^* 之间选择最小值作为传输帧长, 即有

$$T = \min(T^*, T_{AFD}) \quad (18)$$

这种系统的实际应用场景如 WLAN 中的移动用户作为认知用户时, 其帧长要求是固定的, 暂时不能支持插入检测。

如果系统允许在一帧内插入检测, 如 IEEE802.22 标准中提到的 TSS(Two-Stage Sensing)检测方案, 此时, 次用户可以选择最优帧长 T^* , 将检测时间 τ 内的检测作为帧首的细检测, 在帧长 T^* 内以间隔 T_{AFD} 插入粗检测。

6 仿真分析

本文中的仿真参数设定如下: 主用户发送端到主用户接收端的距离 r_{mp} 为 5 m, 主用户发送端之间的距离 D 为 15 m, 次用户发送端到次用户接收端的距离 r_{ss} 为 1 m, 次用户中断概率门限对应的 SINR 值 γ_0 和次用户在信道 h_{ss} 上的平均 SINR 值 $\overline{\gamma_{ss}}$ 均为 1 dB。次用户发射端的发送功率假设为 -3, 0, 3 dBW。表 1 给出了 $\beta_0=352$ ms, $\beta_1=650$ ms 时, 不同发射功率下, AFD 对应不同帧长 T 时, 取得的最大值 T_{AFDm} 及其对应的帧长 T_m 。表 2 给出了 $\beta_0=352$ ms, $\beta_1=352$ ms 时, 不同发射功率下, AFD 最大

表 1 T_{AFDm} 随次用户发送功率变化表 $\beta_0=352\text{ ms}$, $\beta_1=650\text{ ms}$

$P_{ts}(\text{dBW})$	-3	0	1	2	3
$T_{AFDm}(\text{ms})$	17.422	26.764	31.394	37.283	44.996
$T_m(\text{ms})$	120	120	120	120	120

表 2 T_{AFDm} 随次用户发送功率变化表 $\beta_0=352\text{ ms}$, $\beta_1=352\text{ ms}$

$P_{ts}(\text{dBW})$	-3	0	1	2	3
$T_{AFDm}(\text{ms})$	17.42	26.76	31.389	37.277	44.988
$T_m(\text{ms})$	20	120	120	120	120

值 T_{AFDm} 的变化情况。

表 1, 表 2 说明主用户在授权信道上释放信道的平均时间对 T_{AFDm} 的影响大于主用户占用信道的平均时间对 T_{AFDm} 的影响。在不同发射功率下, 次用户几乎都在同一个帧长, 即 $T_m=120\text{ ms}$, 取得最大值 T_{AFDm} 。并且, 取得的最大值 T_{AFDm} 对应的帧长 T_m 的值随着 β_0 和 β_1 的变化很小, 只是在 P_{ts} 很低时 ($P_{ts}=-3\text{ dBW}$), 变化明显。此外, 主用户在授权信道上释放信道的平均时间变长, T_{AFDm} 的时间也有稍许变长, 将近 0.01 ms 。此外, 次用户发送功率越大, 次用户取同样帧长情况下, AFD 的值越长。说明较大的发送功率使得次用户对主用户的抗干扰能力增强, 即主用户对次用户的影响减弱。

图 3 给出了次用户可达到信道容量均值随帧长 T 在次用户不同发送功率条件下变化的曲线图。次用户可达到信道容量均值曲线也是次用户帧长的凹函数, 存在最大值。并且最大值随着次用户发送功率的增加而增加。最大值对应的帧长 T 即是所求的最优帧长 T^* , 表 3 给出了 $P_{ts}=-3\text{ dBW}$ 时, T^* 随主用户占用信道信息变化的情况说明。

表 3 说明, 主用户在授权信道上释放信道的平均时间对 T^* 的影响与对 T_{AFDm} 的影响相比, 比较弱。参数 β_1 一定, T^* 一定; 参数 β_0 越大, T^* 值稍大。说明主用户释放信道的时间越长, 次用户对主用户检

表 3 T_{AFDm} 随主用户信息变化表

β_0	352	352	650	650	352
β_1	650	352	650	352	1408
$T^*(\text{ms})$	120	20	120	20	120

测的频率可以越少。并且, T^* 值不随次用户发送功率的变化而变化。主用户在授权信道上占用信道的平均时间 β_0 对 T^* 的影响随 β_1 的变化而变化。

同时, 仿真结果可以进一步验证第 5.1 节中提出的次用户检测方案。当次用户只选择一个传输帧长时, 次用户在 T^* 和 T_{AFDm} 之间取最小值; 当次用户支持粗细两步检测策略时, 选择 T^* 作为传输帧长, T_{AFDm} 作为一个帧长内粗检测的检测频率。

7 结论

本文主要从次用户角度探讨了在认知 OSA 系统中次用户信号干扰噪声比的特性, 进而探讨了 OSA 系统中次用户的信道容量表达式, 由主用户对信道占用特性和无线信道传播特性得到 SINR 的均值, 进而得到次用户可达到信道容量的均值。发掘决定次用户信道容量的主要参数, 包括主次用户的位置信息、次用户传输帧长、检测时间、主用户占用信道特性参数、无线信道衰落因子等, 其中只有次用户发送功率和主用户对信道占用特性对帧长和检测频率有影响, 其它参数, 如距离、衰落因子等对帧长和检测频率没有影响, 但是, 距离和衰落因子对次用户可达到的最大信道容量值有影响。并在此基础上, 设计次用户对主用户发送数据信息帧长以及检测频率。得到两种设计方案, 当次用户只选择一个传输帧长时, 次用户在由优化准则得到的最优帧长 T^* 和由发生干扰和未发生干扰情况下 SINR 值的二阶统计特性得到的最大平均衰落持续时间 T_{AFDm} 之间取最小值; 当次用户支持粗细两步检测策略时, 选择由容量均值最大化得到的最优帧长 T^* 作为传输帧长, T_{AFDm} 作为一个帧长内插入粗检测

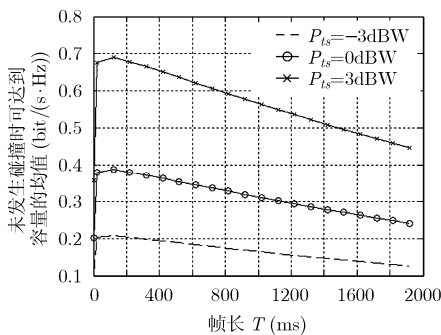


图 3 次用户可达到容量均值比较图

的间隔时间。同时发现, 距离和衰落因子对次用户可达到的最大信道容量值有影响, 并且本文中讨论的 SINR 值以及相关的参数对主次用户的共享/共存方式也会产生影响, 具体的影响和作用以及多用户情况作为后续的研究工作正在进行中。

参 考 文 献

- [1] Gacia L and Wang Yuan-ye. Comparison of spectrum sharing techniques for IMT-A systems in local area networks[C]. IEEE 69th Vehicular Technology Conference, 2009, Barcelona, VTC Spring 2009: 1-5.
- [2] Attar A, Nakhai M R, and Aghvami A H. Cognitive radio game for secondary spectrum access problem[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(4): 2121-2131.
- [3] Buzzi S, Poor H, and Saturnino D. Noncooperative waveform adaptation games in multiuser wireless communications [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2009, 26(5): 64-76.
- [4] Felegyhazi M, Cagalj M, and Hubaux J P. Efficient MAC in cognitive radio systems: a game-theoretic approach [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(4): 1984-1995.
- [5] Pei Yi-yang, Hoang Anh-tuan, and Liang Ying-chang. Sensing-throughput tradeoff in cognitive radio networks: how frequently should spectrum sensing be carried out?[C]. IEEE 18th International Symposium on PIMRC 2007, Athens, Sept. 3-7, 2007: 1-5.
- [6] Zhou Xiang-wei, Li Ye, Kwon Young-hoon, and Soong A. Detection timing and channel selection for periodic spectrum sensing in cognitive radio[C]. IEEE GLOBECOM 2008, New Orleans, LO, Nov. 30-Dec.4, 2008: 1-5.
- [7] Zheng Shou-kang, Liang Ying-chang, Kam Pooi-yuen, and Hoang Anh-tuan. Cross-layered design of spectrum sensing and MAC for opportunistic spectrum access [C]. IEEE WCNC 2009, Budapest, Apr. 5-8, 2009.
- [8] Rappaport T S. *Wireless Communications: Principles and Practice* (2nd ed.) [M]. New York, Prentice Hall PTR. 2001, Chapter 2.

孙 君: 女, 1980 年生, 博士后, 研究方向为异构网络融合、频谱理论、动态频谱管理、频谱感知、信道估计、系统性能分析和优化等。

朱洪波: 男, 1956 年生, 教授, 博士生导师, 长期从事通信工程、无线通信、电磁兼容、移动通信、宽带无线技术等教学和科研工作。