

认知无线网络中一种基于放大转发的协作传输策略

褚御芝* 郑宝玉

(南京邮电大学信号处理与传输研究院 南京 210003)

(南京邮电大学宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室 南京 210003)

摘要: 在不干扰主用户数据传输的条件下,通过次用户间的彼此协作传输,可以使认知无线网络获得明显的空间和时间分集增益,从而改善次用户传输性能。该文针对主次用户共存,主用户交替转移信道忙闲状态的网络环境下,提出了一种基于放大转发的协作传输方案,当主用户存在时机会的使用中继节点转发数据,并且对所提方案的无冲突传输时间进行了理论分析,给出了非协作传输和协作传输模式下的无冲突传输时间的解析表达式,理论分析和仿真结果表明,协作传输方案的无冲突传输时间明显优于非协作传输方案,次用户协作为认知无线网络带来可观的性能增益。

关键词: 认知无线电; 协作传输; 无冲突传输时间; 放大转发

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)03-0509-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00465

A Cooperative Transmission Scheme Based on Amplify and Forward in Cognitive Radio Networks

Chu Yu-zhi Zheng Bao-yu

(*Institute of Signal Processing and Transmission, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China*)

(*Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology Ministry of Education, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210003, China*)

Abstract: Cognitive Radio Networks (CRNs) improve Secondary Users' (SUs) transmission performance through cooperative transmission between SUs without interfering the regular transmissions of the Primary Users (PU). In this paper, a new cooperative transmission scheme is proposed based on AF (Amplify and Forward) protocol while PU and SUs coexist in the same CRN and each PU can be either active (ON) or inactive (OFF) in any given slot. When the licensed frequency is occupied by the PU, SU can opportunist use the relay to transmit signals. Analytical expression of the non-interference transmission durations is given. Non-cooperative and cooperative schemes derived show the effect of cooperative transmission on the non-interference transmission durations performance. Besides, numerical experiments are conducted to verify the effectiveness of the proposed cooperative schemes. The increase of non-interference transmission durations by cooperative transmission confirms the advantages of the new scheme.

Key words: Cognitive Radio (CR); Cooperative transmission; Non-interference transmission durations; Amplify and forward

1 引言

随着无线应用范围的日益扩展,各种新型无线接入方式不断出现,导致了无线频谱资源越来越紧缺。因此,如何进一步提高频谱利用率,以满足爆炸式增长的无线通信业务需求,已成为下一代无线

通信网络亟待解决的关键问题。认知无线电^[1-3]作为一种革命性的智能频谱共享技术,可在不影响主用户(Primary User, PU)通信的前提下,智能地利用大量空闲频谱以满足次用户(Secondary User, SU)即认知用户(Cognitive User, CU)的可靠通信,从而实现频谱资源共享,有效地提高了无线频谱的利用率,已成为现代无线通信领域新的研究热点。

协作分集作为一种新的空间分集技术,可通过多用户之间共享天线和其他网络资源的形式构造“虚拟多天线阵列”,并通过分布式处理产生协作来

2010-05-11 收到, 2010-11-26 改回

国家自然科学基金(60972039)和国家 863 计划项目(2009AA01Z241)

资助课题

*通信作者: 褚御芝 d0010906@njupt.edu.cn

获得一定的空间分集增益,是近年来颇受关注的无线通信新技术之一。文献[4,5]详细分析了协作分集与网络容量和中断概率等系统性能的关系以及放大转发、解码转发、编码协作等中继协作策略及其应用于协作分集在无线通信中的广泛应用奠定了坚实的基础。人们已将协作分集技术应用于频谱感知中,提出了多种协作频谱感知方案,以提高主用户的检测精度,实现同步与非同步感知数据的准确融合^[6-9]。

但在传统协作感知的研究中,仅限于频谱感知方面的协作,并未将协作分集引入到认知无线网络的多用户通信中;然而,当主用户 QoS 要求很高时,往往次用户的数据吞吐能力将明显下降,以致无法满足很多无线业务的通信要求,因此通过次用户间的协作传输提高通信性能显得尤为重要。

对于协作传输问题,文献[10]就认知无线网络中的协作分集技术,进行了初步的研究报道,相关结果表明通过次用户间或主次用户间的相互协作,可以使整个系统获得空间分集和频率分集。文献[11]研究了基于主用户 QoS 保障的次用户协作通信问题,提出了认知无线网络环境下最佳次用户中继的选择,并给出了次用户发射机与最佳次用户中继间的最优功率分配算法,以显著提高次用户的网络容量。文献[12]提出了一种协作中继方案 CRS (Cooperative Relay Scheme)以提高次用户的接收信干比,并给出了次用户间的一种机会频谱共享算法,仿真算法表明次用户信干比显著改善。但是文献[11,12]中的协作传输模式均属于确定性协作传输,并没有考虑因网络环境的动态变化而导致协作失效的情况,在实际网络环境中显得不尽合理。文献[13]虽然在考虑主用户实时变化的条件下,分析了系统的有效传输时间,但是这种传输没有考虑基于放大转发的协作中继技术。

针对上述问题本文提出了一种新的基于放大转发的协作传输方案,该方案在综合考虑了主用户的实时状态和传输信道的中断概率条件下,在次用户不需要或无法使用直传方式传输数据的情形下,通过放大中继转发的方式为次用户网络提供更为可靠的通信服务,大大的提高了次用户的无冲突传输时间、数据吞吐量和系统的鲁棒性。

2 系统模型

如图 1 所示,在主用户网络中,次用户传输节点 SS 正向次用户接收节点 ST 发送数据信息,且主用户准备接入该无线频段,以发送自身的数据信息。假设 SS 和中继节点 R 分布在不同的 PU 覆盖范围,

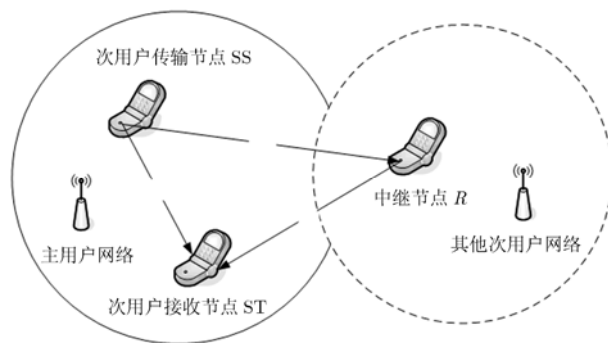


图 1 认知无线网络中协作传输的系统模型

使用不同的频段进行数据传输。由于次用户 SS 如果和主用户同时发送数据信息将会对主用户的传输造成干扰,为了保证次用户的传输连续性和传输质量,当检测出主用户存在时,SS 改变传输路径,通过位于其他次用户网络中的中继节点 R 将数据信息转发至次用户接收节点 ST,在不干扰主用户的情况下,最大限度的满足次用户的发送请求。同时,当主用户不存在时,若 SS 和 R 之间的信道较直连信道更利于信息的传输时,利用中继节点进行协作传输。

因此,本文主要考虑两种传输模式协作条件下对次用户所获得的传输时间增益:(1)SS 到 R 和 R 到 ST 之间链路发生中断且主用户未占用授权频段时,SS 通过直传模式直接将数据传输到 ST;(2)当 SS 到 ST 之间产生中断而 SS 到 R 之间未发生中断且主用户处于空闲状态时或主用户占用信道时,使用中继转发模式实现数据的传输。

不失一般性,时隙分配如图 2 所示,其中 t_s 表示次用户感知主用户是否存在的时间间隔, T_d 表示在节点成功感知后连续传输数据的时间间隔。主用户在 ON/OFF 状态中交替更新^[14],ON 状态下,主用户占用授权频段,OFF 状态下,授权频段空闲,次用户可机会使用频段。其中忙/闲状态间的转移间隔符合指数分布^[15],即



图 2 时隙分配图

$$\left. \begin{aligned} f_{\text{on}}(t) &= \alpha e^{-\alpha t} \\ f_{\text{off}}(t) &= \beta e^{-\beta t} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 α, β 分别表示信道状态从 ON-OFF 和从 OFF-OFF 的转移速率,由于信道的转移可以近似为二状态的生灭过程,且信道处于 ON 和 OFF 状态的时间间隔为 $1/\alpha$ 和 $1/\beta$,所以信道的稳态概率分别为

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{on}} &= \beta / (\alpha + \beta) \\ P_{\text{off}} &= \alpha / (\alpha + \beta) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

在 T_d 时段, 由文献[4]所得到的基于 AF 的协作传输模型可知, 当 SS 采用中继转发模式实现数据的传输时, 不同节点接收到的数据信息 r_{st} , r_{sr} , r_{rt} 可以表示为

$$\left. \begin{aligned} r_{st} &= \sqrt{P_s d_{st}^{-a}} h_{st} s + n_{st} \\ r_{sr} &= \sqrt{P_s d_{sr}^{-a}} h_{sr} s + n_{sr} \\ r_{rt} &= A \sqrt{P_s d_{sr}^{-a} d_{rt}^{-a}} h_{sr} h_{rt} s + A \sqrt{d_{rt}^{-a}} h_{rt} n_{sr} + n_{rt} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中 P_s 为信号传输的能量, h_{st} , h_{sr} , h_{rt} 分别表示对应的信道衰落因子; d_{st} , d_{sr} , d_{rt} 分别表示对应的节点间的距离, a 为路径衰落系数, A 为中继节点的放大增益, 为了便于理论分析, 不妨假设放大增益 $A^2 = 1/d_{rt}^{-a} |h_{rt}|^2$, 以此抵消 R-ST 的信道衰落。

此外, 对系统模型做如下假设: 所有无线信道在空间上相互统计独立; 系统中的所有次用户均可以同时进行信号接收和发射; 无线网络中具有集中控制器, 以实时侦听所有次用户的信道状况, 并对各个次用户发送控制数据包; 所有节点都以等功率发射数据; 所有传输信道属于时变信道, 并且在在一个符号周期内信道衰落因子 h_{ij} 恒定不变, 在瑞利信道衰落的条件下, 服从指数分布, 即 $p(|h_{ij}|^2) = 1/\sigma_{ij}^2 \cdot \exp(-|h_{ij}|^2/\sigma_{ij}^2), |h_{ij}|^2 \geq 0$, σ_{ij}^2 为 i 节点和 j 节点之间信号衰落的方差; 信道噪声均为零均值和双边功率谱密度为 N_0 的复高斯白噪声。

3 次用户的无冲突传输时间

本节将详细分析在传统无协作传输模式下和协作传输下的无冲突传输时间, 并通过比较两者的关系得出协作传输所获得的时间增益。由于在 T_d 时间间隔内主用户可能会发生状态的转移, 因此定义在主用户发生状态转移的条件下, 次用户能够避免来自主用户干扰并能无中断地传输数据时间为无冲突传输时间。同时在 $i-j$ 链路中的互信息量 I_{ij} , 中断概率 p_{ij} 分别定义为

$$I_{ij} = \lg(1 + \text{SNR}_{ij}) \quad (4)$$

$$p_{ij} = \Pr\{I_{ij} \leq V\} \quad (5)$$

其中 V 为信道的传输速率, SNR_{ij} 为 $i-j$ 链路的瞬时信噪比。

3.1 非协作传输的无冲突传输时间

传统的感知传输模型^[13]中, 如果次用户在 t_s 时隙内检测到了一个空闲信道, 则在 T_d 时隙内 SS 通过直传方式向 ST 节点传输数据信息, 因此根据定义可知在非协作传输模式下, 次用户的无冲突时间

为

$$T_c^u = \Pr_{dt}^u (T_{c|H_1}^u P(H_1 | \widehat{H}_0) + T_{c|H_0}^u P(H_0 | \widehat{H}_0)) \quad (6)$$

其中 $T_{c|H_1}^u$, $T_{c|H_0}^u$ 表示主用户分别处于 ON/OFF 状态下, 次用户可以无冲突传输的时间, 即

$$T_{c|H_1}^u = \int_0^{T_d} f_{\text{on}}(t)(T_d - t)dt = T_d - \frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha T_d}) \quad (7)$$

$$T_{c|H_0}^u = \int_{T_d}^{\infty} f_{\text{off}}(t)T_d dt + \int_0^{T_d} f_{\text{off}}(t)t dt = \frac{1}{\beta}(1 - e^{-\beta T_d}) \quad (8)$$

式(7)表示当次用户检测发生错检的情况下, 由于 T_d 时隙中主用户信道状态发生转移而带来的无冲突传输时间, 式(8)表示在次用户正确检测时, 由于 T_d 时隙中主用户信道状态没有发生转移而带来的无冲突传输时间。

$P(H_1 | \widehat{H}_0)$ 和 $P(H_0 | \widehat{H}_0)$ 分别表示在感知用户检测到主用户状态为 H_0 而主用户实际处于 H_1 状态的概率和感知用户的检测结果为 H_0 而实际主用户信道状态处于 H_0 的概率。根据贝叶斯准则, 可以得到

$$\left. \begin{aligned} P(H_1 | \widehat{H}_0) &= \frac{P_m P_{\text{on}}}{P_m P_{\text{on}} + (1 - P_f) P_{\text{off}}} \\ P(H_0 | \widehat{H}_0) &= 1 - P(H_1 | \widehat{H}_0) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} p(\widehat{H}_0) &= P_m P_{\text{on}} + (1 - P_f) P_{\text{off}} \\ p(\widehat{H}_1) &= P_d P_{\text{on}} + P_f P_{\text{off}} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中 P_m , P_f 分别代表感知用户的漏检概率和虚警概率, $p(\widehat{H}_0)$ 和 $p(\widehat{H}_1)$ 分别表示次用户感知到主用户空闲或忙的概率。 \Pr_{dt}^u 表示 SS-ST 中能够无中断传输的概率, 由于经 SS-ST 传输数据后, ST 能够接收到的信号为 $r_{st}^u = \sqrt{P_s d_{st}^{-a}} h_{st}^u s + n_{st}^u$, 其中 P_s^u 为传输能量, d_{st} 为 SS 与 ST 之间的距离, h_{st}^u 表示信道衰落系数, 因此 \Pr_{dt}^u 可以表示为

$$\Pr_{dt}^u = p(\widehat{H}_0)(1 - p_{ij}^{dt}) = p(\widehat{H}_0) \exp\left[-\frac{N_0(2^{V^u} - 1)}{P_s^u d_{st}^{-a}}\right] \quad (11)$$

其中 V^u , P_s^u 分别表示在无协作传输模式下的传输速率和发送功率。 $p(\widehat{H}_0)$ 表示次用户感知到主用户空闲的概率, 将式(7)-式(11)代入式(6)可得

$$\begin{aligned} T_c^u &= p(\widehat{H}_0) \exp\left[-\frac{N_0(2^{V^u} - 1)}{P_s^u d_{st}^{-a}}\right] \left(\left(T_d - \frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha T_d}) \right) \right. \\ &\quad \left. \cdot P(H_1 | \widehat{H}_0) + \frac{1}{\beta}(1 - e^{-\beta T_d}) P(H_0 | \widehat{H}_0) \right) \quad (12) \end{aligned}$$

3.2 基于放大转发的协作传输下的无冲突传输时间

根据第2节系统模型可知, 在协作传输策略下次用户无冲突传输时间 T_c^c 可以表示为

$$T_c^c = T_{C|H_1}^c p(\widehat{H}_1) + T_{C|H_0}^c p(\widehat{H}_0) \quad (13)$$

其中 $T_{C|H_1}^c$, $T_{C|H_0}^c$ 表示在协作传输模式中, 主用户分别处于 ON/OFF 状态下, 次用户可以无冲突传输的时间。由定义可知 $T_{C|H_1}^c$, $T_{C|H_0}^c$ 可以表示为

$$\left. \begin{aligned} T_{C|H_1}^c &= T_d \left(\Pr_{dt|H_1} + \Pr_{rt|H_1} \right) \\ T_{C|H_0}^c &= T_{dt|H_0}^c \Pr_{dt|H_0} + T_{rt|H_0}^c \Pr_{rt|H_0} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中 $\Pr_{dt|H_1}$, $\Pr_{rt|H_1}$ 和 $T_{dt|H_0}^c$, $T_{rt|H_0}^c$ 分别表示在主用户存在的条件下, SS 使用直传和中继传输的概率分布和无冲突传输时间, $\Pr_{dt|H_0}$, $\Pr_{rt|H_0}$ 表示在主用户空闲的状态下, SS 使用直传和中继传输的概率分布, 由于 $p(|h_{ij}|^2) = \exp(-|h_{ij}|^2)$, 同时令 $\kappa = N_0(2^{R^c} - 1)/P_s$, 则 $\Pr\{|h_{ij}|^2 \leq \kappa d_{ij}^a\} = 1 - \exp(-\kappa d_{ij}^a)$, 因此, $\Pr_{dt|H_1}$, $\Pr_{rt|H_1}$, $\Pr_{dt|H_0}$ 和 $\Pr_{rt|H_0}$ 可以分别表示为

$$\Pr_{dt|H_1} = 0, \quad \Pr_{rt|H_1} = 1 - \Pr_{dt|H_1} = 1 \quad (15)$$

$$\Pr_{dt|H_0} = \exp(-\kappa d_{st}^a) (1 - \exp(-\kappa d_{sr}^a) \exp(-2\kappa d_{sr}^a)) \quad (16)$$

$$\Pr_{rt|H_0} = (1 - \exp(-\kappa d_{st}^a)) \exp(-\kappa d_{sr}^a) \quad (17)$$

式(15)表明在主用户存在的条件下, SS 仅由中继节点 R 通过放大转发的方式将数据传输给 SS, 式(16)表明, 在主用户未占用授权频段时, 只有当 SS-R 和 R-ST 链路中出现中断时才使用直传模式传输数据; 式(17)表示, 在主用户未占用授权频段时, 当 SS-ST 直传链路中出现中断而 SS-R 中未出现中断时使用中继转发模式传输数据。

由于在直连传输模式下的无冲突传输时间与非协作传输下的无冲突传输时间相同, 在中继传输模式下的无冲突传输时间为总传输时间, 即

$$\left. \begin{aligned} T_{rt|H_0}^c &= T_d \\ T_{dt|H_0}^c &= \left(T_d - \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha T_d}) \right) P(H_1 | \widehat{H}_0) \\ &\quad + (1/\beta) (1 - e^{-\beta T_d}) P(H_0 | \widehat{H}_0) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

将式(18)和式(10)代入式(13)可知在协作通信模式下的无冲突传输时间为

$$\begin{aligned} T_c^c &= T_d p(\widehat{H}_1) + \\ &\left(T_{dt|H_0}^c \left(\exp(-\kappa d_{st}^a) (1 - \exp(-\kappa d_{sr}^a)) (1 - \exp(-2\kappa d_{sr}^a)) \right) \right. \\ &\left. + T_d \left(\exp(-\kappa d_{sr}^a) - \exp(-\kappa d_{sr}^a - \kappa d_{st}^a) \right) \right) \\ &\cdot p(\widehat{H}_0) \end{aligned} \quad (19)$$

同时, 为了比较协作传输策略中对次用户有效传输时间的改善, 定义变量 G 为次用户所获得的时间增益

$$G = 10 \lg(T_c^c / T_c^u) \quad (20)$$

其中 T_c^c , T_c^u 分别对应式(19)和式(12)。

4 仿真结果及分析

本文通过蒙特卡洛仿真实验验证在瑞利衰落环境下协作传输策略的性能, 为了便于比较, 同时给出了在相同环境下非协作传输策略的性能仿真。按照第 2 节给出的系统模型, $h(t)$ 为满足方差为 1 的瑞利衰落, 主用户近似为在 ON/OFF 状态中交替更新的马尔科夫过程, 信道状态从 ON-OFF 的转移速率 $\alpha = 0.4/s$, 信道状态从 OFF-ON 的转移速率 β 分别等于 $0.4/s$, $0.6/s$, $0.8/s$, 传输时间 $T_d = 2$ s, 次用户的检测概率 $P_d = 0.9$, $a=2$, $d_{sr} = 50$ m, $d_{st} = 100$ m, $R^c = 3$ bit/(s·Hz)。图 3 中仿真曲线由蒙特卡洛仿真实验得到, 实验次数 $M = 10000$ 。

图 3(a), 3(b)给出了在 $P_f = 0.1$, 的条件下 T_c^c , T_c^u 随平均信噪比 $10 \lg(P_s / N_0)$ 的变化曲线。图 3(c), 3(d)给出了在 $\bar{\gamma} = 25$ dB 条件下, 无冲突时间随 P_f 变化情况, 从图 3 中可以看出在协作传输方式下的次用户的有效传输时间明显大于非协作方式下的传输时间, 且传输的时间与平均信噪比、 P_f 和转移速率 β 的值成正比。值得一提的是, 从图 3 中可以看出, 在非协作传输模式下, 次用户的有效传输时间与 P_f 和转移速率 β 的值成反比, 这是因为随着 P_f 的增大, 次用户误将空闲的频谱检测为忙状态, 因此可用于传输数据的时间也相应减少, 同时 β 的增长表示主用户占用信道的概率增大, 在非协作传输的过程中, 主用户占用信道次用户只能中断传输, 而在协作传输模式下, 由于中继节点的机会传输为次用户提供了更多传输机会, 因而也就使得次用户的传输时间相应增长。

图 4(a)给出了在 $\bar{\gamma} = 25$ dB 的条件下, 时间增益 G 随虚警概率 P_f 变化曲线; 图 4(b)给出了在 $d_{st} = 100$ m 时, 时间增益 G 随虚警概率 d_{sr} 的变化曲线。由上述两图不难看出, G 与 P_f 成正比关系, 随着 d_{sr} 的增大而有一定程度的提高, 但在整个 P_f 和 d_{sr} 的取值区域内 G 都是恒大于 0 的, 进一步表明了协作传输能够为系统带来可观的时间增益。

5 结束语

本文提出了一种基于放大转发的协作传输策略, 以改善认知网络中次用户数据的有效传输。同时, 分析了该协作传输策略的无冲突传输时间, 得到了相应的解析闭式解。为了便于性能比较, 我们对传统感知网络中次用户传输的无冲突传输时间也进行了相应的理论推导, 给出了无冲突传输时间的解析表达式。数值和仿真实验结果表明: 协作传输较传统的无协作模式的无冲突传输时间明显增加, 通过用户协作可以为认知无线网络中次用户传输带来可观的时间增益, 显著改善次用户传输的性能。

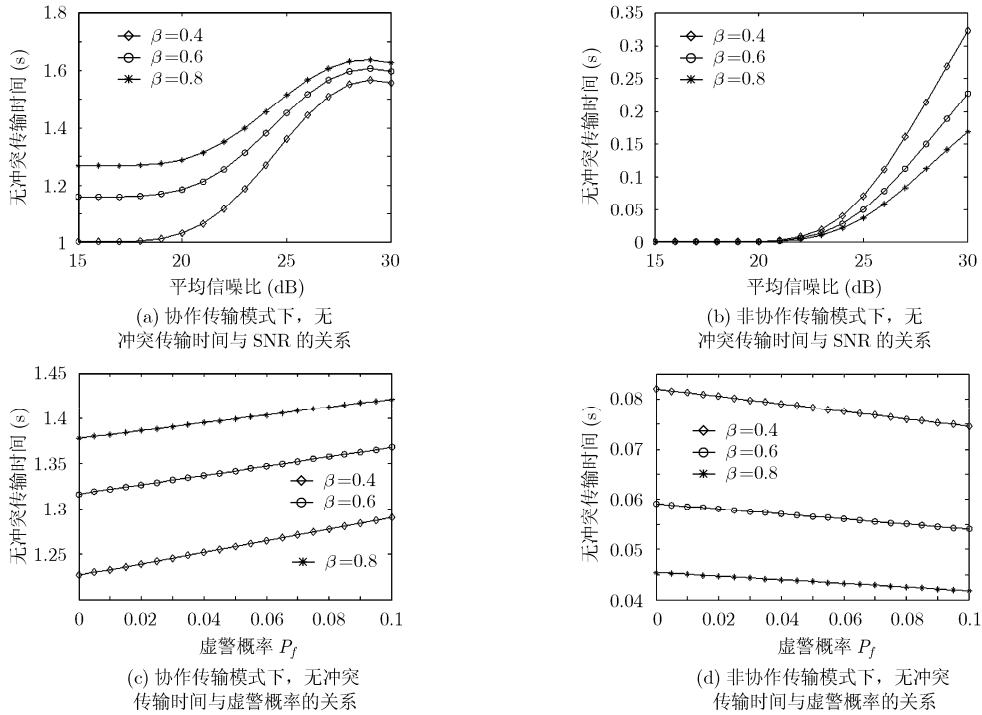


图 3 无冲突传输时间的变化曲线

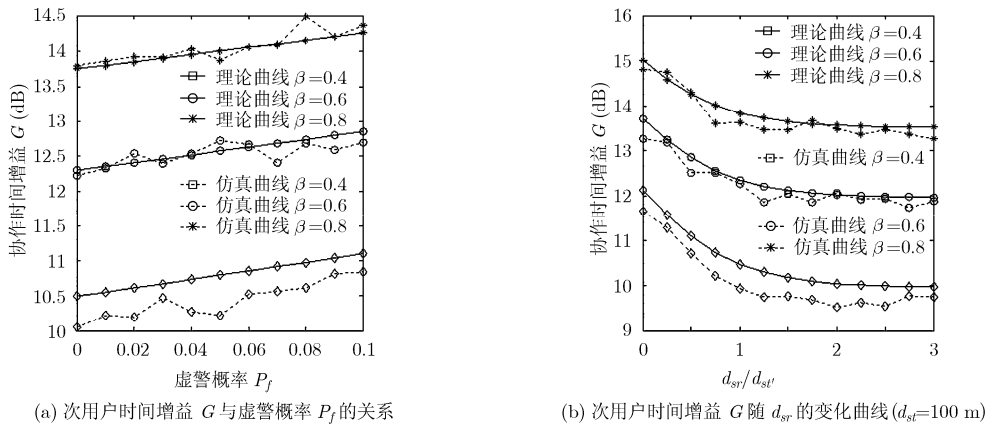


图 4 次用户协作增益与 P_f , d_{sr} 的关系

参考文献

[1] Mitola I J. Software radios: survey, critical evaluation and future directions[J]. *IEEE Aerosp Electron Systems Magazine*, 1993, 8(4): 25-31.

[2] Akyildiz I F, Lee W Y, Vuran M C, and Mohanty S. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey[J]. *Computer Networks*, 2006, 50(13): 2127-2159.

[3] Zheng Yong-hong, Liang Ying-Chang, Hoang Anh-tuan, and Zhang Rui. A review on spectrum sensing for cognitive radio: challenges and Solutions[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. 2010, Article ID 381465. doi:10.1155/2010/381465.

[4] Sendonaris A, Erkip E, and Aazhang B. User cooperation diversity part I: system description[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2003, 51(11): 1927-1938.

[5] Laneman J N, Tse D N C, and Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(12): 3062-3080.

[6] Zhu Jia, Zheng Bao-yu, and Zou Yu-long. Detection time analysis for the multiple-user cooperative spectrum sensing scheme in cognitive[J]. *Science in China*, 2009, 52(10): 1915-1925.

[7] Duan Dong-liang, Yang Liu-qing, and Principe J C. Cooperative diversity of spectrum for cognitive radio systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010,

- 58(6): 3218–3227.
- [8] Bin Shen and Kyung Sup Kwak. Soft combination schemes for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. *ETRI Journal*, 2009, 31(3): 263–270.
- [9] Zhou Xiang-wei, Ma Jun, and Li Ye. Probability-based combination for cooperative spectrum sensing[J]. *IEEE Transactions on Communication*, 2010, 58(2): 463–466.
- [10] Zhang Qian, Jia Jun-cheng, and Zhang Jin. Cooperative relay to improve diversity in cognitive radio networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(2): 111–117.
- [11] Lien Shao Yu, Prasad N R, Chen Kwang Cheng, and Su Chih Wei. Providing statistical quality-of-service guarantees in cognitive radio networks with cooperative[C]. *Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management (CogART)*. Aalborg 2009: 6–11.
- [12] Gong Xiao-wen, Yuan Wei, Liu Wei, Cheng Wen-qing, and Wang Shu. A cooperative relay scheme for secondary communication in cognitive radio networks[C]. *Proc. of Globecom, New Orleans, LA, 2008*: 1–6.
- [13] Zhou Xiang-wei and Li Ye. Detection timing and channel selection for periodic spectrum sensing in cognitive radio[C]. *Proc. of Globecom, New Orleans, LA, 2008*: 1–5.
- [14] Kim H and Shin K G. Efficient discovery of spectrum opportunities with MAC-layer sensing in cognitive radio systems[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(5): 533–545.
- [15] Cox D R. *Renewal Theory*[M]. New York: John Wiley&Sons Inc, 1962: 123–131.
- 褚御芝: 女, 1986 年生, 博士生, 从事协作感知方面的研究工作.
- 郑宝玉: 男, 1945 年生, 上海交通大学兼职教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线通信与网络信号处理、现代通信中的智能信号与信息处理、量子信号与信息处理等.