

多用户环境下的认知协作通信系统性能分析^①

赵尚卿, 郭 辉, 邢 娟, 王 真

(河南理工大学 计算机科学与技术学院, 焦作 454000)

摘 要: 在存在多个主用户的环境下, 提出一种新型的两跳式协作通信系统, 并对系统的性能进行了分析. 该系统在信宿处有多个次级用户接收机, 并且采用信道参数最优的方式进行用户选择. 在瑞利衰落信道下, 对提出的协作通信系统的中断概率进行了研究, 得出了中断概率的闭合表达式及在高信噪比时的渐进表达式. 最后通过计算机仿真验证了其有效性, 分析结果显示在多用户条件下系统的整体性能得到明显提高.

关键词: 认知协作通信; 译码转发; 中断概率; 多用户

Performance Analysis of Cognitive Cooperative Communication System Based on Multiuser

ZHAO Shang-Qing, GUO Hui, XING Juan, WANG Zhen

(School of Computer Science and Technology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: With multiple primary-user coexisting, a new dual-hop cognitive cooperative communication system is proposed and analyzed. In this proposed system, multiuser existed at the destination and the optimal channel coefficient scheme is adopted to improve the system performance. Moreover, the outage probability performance is investigated over Rayleigh fading channels and the exact closed-form expression is derived, then an asymptotic expression at high signal-to-noise for the outage probability is obtained too. Finally, simulation results are presented to verify that the system performance is improved with multiuser condition.

Key words: cognitive cooperative communication; decode-and-forward; outage probability; multiuser

1 引言

认知无线电^[1]和协作通信^[2]技术是当今通信领域倍受关注的两个研究方向, 前者提高了系统频谱的利用效率, 后者改善了通信系统传输的可靠性. 而本文研究的则是将两者结合在一起, 即认知协作通信^[3]. 针对放大转发(AF, Amplify-and-Forward)协议的认知协作通信系统, 文献[4,5]在瑞利(Rayleigh)衰落信道环境下对系统进行了设计推导和分析. 文献[6,7]则将其推广到了 Nakagami-m 衰落环境中. 后来文献[8,9]在前人的基础上将两跳式系统扩展到多跳. 其中文献[8]指出了多跳式系统运算的复杂度相比两跳式的要高很多, 所以在算法上还有待完善. 而针对译码转发协议(DF, Decode-and-Forward)的认知协作通信, 文献[10]得到了在 Nakagami-m 衰落环境中系统的准确中断概率表达式并进行了仿真验证. 文献[11]研究了信源和信宿

之间具有直连信道时的系统性能, 但是在文献[10,11]中均设置次级用户(SU, Secondary-User)协作系统中, 只有一个次级用户和一个主用户(PU, Primary-User).

另一方面, 为了不干扰到主用户的通信, 次级用户的发射功率必须受到限制, 但是这样同时也会使得次级用户系统的性能比没有主用户的时候有所降低. 甚至有可能产生中断概率的“地板效应”^[10]. 具体的说, 在无线协作通信系统中, 系统的中断概率不会随着信噪比的无限增大而无限增大, 而是当信噪比高于某一门限值时, 系统的中断概率趋于某一极限值. 这种现象称为“地板效应”, 中断概率的极限值称为地板值.

为了改善这种状况, 降低中断概率的地板值, 本文提出了一种多用户的认知协作通信系统. 该系统包含一个次级用户系统, 且其周围存在若干个主用户接收机. 其中次级用户系统中有一个信源节点, 一个中继节

① 基金项目:国家自然科学基金(51174263);河南省教育厅科学技术研究重点项目(12B510011,12A520022);河南理工大学博士基金(B2013-036)

收稿时间:2013-05-23;收到修改稿时间:2013-07-01

点, 和多个次级用户接收机. 随后, 文章对该多用户协作通信系统在瑞利衰落信道环境下的性能进行了分析, 得出了中断概率的精确闭合表达式和渐进表达式, 最后, 通过运用计算机进行仿真验证了结论的准确性.

2 系统模型

典型的多用户的两跳的认知协作通信系统的构成: 一个信源节点 S , 一个中继节点 R , 多个信宿节点 D_1, \dots, D_K , 并且在次级通信系统周围存在了多个主用户 PU_1, \dots, PU_N , 假设信源、中继、信宿都只采用单天线, 而且主信源距离次级系统足够远, 这样就不会对次级系统的信源节点 S 和中继节点 R 产生影响^[10](如图 1)所示.

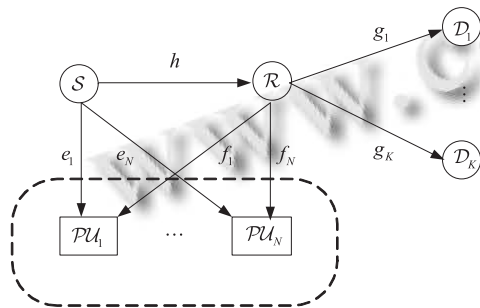


图 1 系统总体框图

其中 h 表示信源节点 S 和中继节点 R 之间的信道系数, g_k 表示中继节点 R 和信宿节点 D_k 之间的信道系数, e_n 表示信源节点于主用户 PU_N 之间的信道系数, f_n 表示中继节点 R 与主用户 PU_N 之间的信道系数.

次级通信系统在通信过程中分为两个时隙. 第一个时隙, 信源 S 以功率 P_S 向中继 R 发送信号; 第二个时隙, 中继 R 将接收到的信号进行译码转发, 以最优信道选择方案选择一个信宿 D_k 并且以功率 P_R 向信宿 D_k 发射信号. 由于次级用户的通信不能干扰到主用户, 所以信源 S 和中继 R 的发射功率要受到限制, 假设主用户能容忍的最大干扰功率为 Q , 则信源节点 S 和中继节点 R 的发射功率可以分别表示为:

$$P_S = \min \left(\frac{Q}{\max_{i=1, \dots, N} |e_n|^2}, P \right) \quad (1)$$

$$P_R = \min \left(\frac{Q}{\max_{i=1, \dots, N} |f_n|^2}, P \right) \quad (2)$$

其中 P 表示信源 S 和中继 R 的最大发射功率, 那么第

一跳 S 到 $R(S \rightarrow R)$ 和第二跳 R 到 $D_k(R \rightarrow D_k)$ 的接收信噪比分别表示为:

$$\Gamma_{SR} = \frac{P_S |h|^2}{\sigma^2} = \min \left(\frac{Q}{\max_{i=1, \dots, N} |e_n|^2}, P \right) \frac{|h|^2}{\sigma^2} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Gamma_{RD} &= P_R \frac{\max_{k=1, \dots, K} |g_k|^2}{\sigma^2} \\ &= \min \left(\frac{Q}{\max_{i=1, \dots, N} |f_n|^2}, P \right) \frac{\max_{k=1, \dots, K} |g_k|^2}{\sigma^2} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 σ^2 表示在信源 S 和中继 R 处的加性高斯白噪声 (AWGN) 的方差, $\max_{k=1, \dots, K} |g_k|^2$ 表示在第二跳时选择一个信道状况最优的信宿进行通信. 现在假设图中所有点到点的通信信道都是独立的瑞利衰落信道, 因此 $|h|^2$ 、 $|e_n|^2$ 、 $|f_n|^2$ 、 $|g_k|^2$ 分别服从参数为 $1/\Omega_h$ 、 $1/\Omega_e$ 、 $1/\Omega_f$ 、 $1/\Omega_g$ 的指数分布.

3 各模块的算法设计与实现

对于两跳 DF 协议来说, 任意一跳发生中断时系统中断, 并且由式(3)、(4)知 Γ_{SR} 和 Γ_{RD} 相互独立, 因此:

$$\begin{aligned} P_{\text{outage}} &= \Pr \{ \min(\Gamma_{SR}, \Gamma_{RD}) < \gamma_{th} \} \\ &= 1 - \Pr \{ \Gamma_{SR} > \gamma_{th} \} \Pr \{ \Gamma_{RD} > \gamma_{th} \} \\ &= 1 - [1 - F_{\Gamma_{SR}}(\gamma_{th})][1 - F_{\Gamma_{RD}}(\gamma_{th})] \\ &= F_{\Gamma_{SR}}(\gamma_{th}) + F_{\Gamma_{RD}}(\gamma_{th}) - F_{\Gamma_{SR}}(\gamma_{th})F_{\Gamma_{RD}}(\gamma_{th}) \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\Pr\{\bullet\}$ 表示概率, γ_{th} 表示给定的门限值, $F_{\Gamma_{SR}}(\bullet)$ 、 $F_{\Gamma_{RD}}(\bullet)$ 分别表示 Γ_{SR} 和 Γ_{RD} 的累积分布函数, 下面开始分别求解 $F_{\Gamma_{SR}}(\gamma)$ 和 $F_{\Gamma_{RD}}(\gamma)$ 的闭合表达式.

3.1 $F_{\Gamma_{SR}}(\gamma)$ 的闭合表达式

首先定义 $X \triangleq |h|^2$, $Y \triangleq \max_{i=1, \dots, N} |e_n|^2$, 则 X, Y 的累积分布函数 $F_X(x)$ 、 $F_Y(y)$, 以及 Y 的概率密度函数 $f_Y(y)$ 分别为

$$F_X(x) = \Pr \{ |h|^2 < x \} = 1 - \exp \left(-\frac{x}{\Omega_e} \right) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} F_Y(y) &= \Pr \left\{ \max_{i=1, \dots, N} |e_n|^2 < y \right\} = \prod_{i=1}^N F_{|e_n|^2}(y) \\ &= \left[1 - \exp \left(-\frac{y}{\Omega_e} \right) \right]^N \end{aligned} \quad (7)$$

$$f_Y(y) = N \left[1 - \exp\left(-\frac{y}{\Omega_c}\right) \right]^{N-1} \frac{1}{\Omega_c} \exp\left(-\frac{y}{\Omega_c}\right) \quad (8)$$

$$= \frac{N}{\Omega_c} \sum_{i=0}^{N-1} \binom{N-1}{i} (-1)^i \exp\left[-\frac{(i+1)y}{\Omega_c}\right]$$

利用(6)(7)(8)式, 则

$$F_{\Gamma_{SR}}(\gamma) = \Pr\left\{ \min\left(\frac{Q}{Y}, P\right) \frac{X}{\sigma^2} < \gamma \right\}$$

$$= \Pr\left\{ P \frac{X}{\sigma^2} < \gamma, Y < \frac{Q}{P} \right\} + \Pr\left\{ \frac{Q}{Y} \frac{X}{\sigma^2} < \gamma, Y \geq \frac{Q}{P} \right\}$$

$$= \Pr\left\{ X < \frac{\sigma^2 \gamma}{P}, Y < \frac{Q}{P} \right\} + \Pr\left\{ X < \frac{\sigma^2 \gamma}{Q} Y, Y \geq \frac{Q}{P} \right\}$$

$$= F_X\left(\frac{\sigma^2 \gamma}{P}\right) F_Y\left(\frac{Q}{P}\right) + \int_{\frac{Q}{P}}^{\infty} F_X\left(\frac{\sigma^2 \gamma}{Q} y\right) f_Y(y) dy \quad (9)$$

$$= 1 - \exp\left(-\frac{\sigma^2 \gamma}{P \Omega_h}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{Q}{P \Omega_c}\right) \right]^N$$

$$- \frac{N}{\Omega_c} \sum_{i=0}^{N-1} \binom{N-1}{i} (-1)^i \left(\frac{i+1}{\Omega_c} + \frac{\sigma^2 \gamma}{Q \Omega_h} \right)^{-1}$$

$$\times \exp\left[-\left(\frac{i+1}{\Omega_c} + \frac{\sigma^2 \gamma}{Q \Omega_h}\right) \frac{Q}{P}\right]$$

3.2 $F_{\Gamma_{RD}}(\gamma)$ 闭合表达式

同上, 首先定义 $U \stackrel{\Delta}{=} \max_{k=1, \dots, K} |g_k|^2$, $V \stackrel{\Delta}{=} \max_{i=1, \dots, N} |f_n|^2$, 则

U 、 V 的累积分布函数 $F_U(u)$ 、 $F_V(v)$, 以及概率密度函数 $f_U(u)$ 、 $f_V(v)$ 分别为:

$$F_U(u) = \left[1 - \exp\left(-\frac{u}{\Omega_g}\right) \right]^K \quad (10)$$

$$F_V(v) = \left[1 - \exp\left(-\frac{v}{\Omega_f}\right) \right]^N \quad (11)$$

$$f_U(u) = \frac{K}{\Omega_g} \sum_{k=0}^{K-1} \binom{K-1}{k} (-1)^k \exp\left[-\frac{(k+1)u}{\Omega_g}\right] \quad (12)$$

$$f_V(v) = \frac{N}{\Omega_f} \sum_{n=0}^{N-1} \binom{N-1}{n} (-1)^n \exp\left[-\frac{(n+1)v}{\Omega_f}\right] \quad (13)$$

利用(10)(11)(12)(13)得:

$$F_{\Gamma_{RD}}(\gamma) = \Pr\left\{ \min\left(\frac{Q}{V}, P\right) \frac{U}{\sigma^2} < \gamma \right\}$$

$$= \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma^2 \gamma}{P \Omega_g}\right) \right]^K \left[1 - \exp\left(-\frac{Q}{P \Omega_f}\right) \right]^N$$

$$+ \frac{N}{\Omega_f} \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{n=0}^{N-1} \binom{K}{k} \binom{N-1}{n} (-1)^{n+k}$$

$$\times \left(\frac{n+1}{\Omega_f} + \frac{k \sigma^2 \gamma}{Q \Omega_g} \right)^{-1} \exp\left[-\left(\frac{n+1}{\Omega_f} + \frac{k \sigma^2 \gamma}{Q \Omega_g}\right) \frac{Q}{P}\right] \quad (14)$$

最后将式(9)和(14)带入式(5)便可以得到中断概率的闭合表达式.

4 渐进表达式

接下来求高信噪比时($P \rightarrow \infty$)系统中中断概率的表达式. 由式(1)、(2)可知, 当 $P \rightarrow \infty$ 时, 信源 S 和中继 R 的发射功率完全由 Q 、 e_n 、 f_n 决定. 因此, 由式(9)、(14)可以得出 Γ_{SR} 和 Γ_{RD} 的累积分布函数表达式:

$$F_{\Gamma_{SR}}(\gamma) = 1 - \frac{N}{\Omega_c} \sum_{i=0}^{N-1} \binom{N-1}{i} (-1)^i \left(\frac{i+1}{\Omega_c} + \frac{\sigma^2 \gamma}{Q \Omega_h} \right)^{-1} \quad (15)$$

$$F_{\Gamma_{RD}}(\gamma) = \frac{N}{\Omega_f} \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{n=0}^{N-1} \binom{K}{k} \binom{N-1}{n} (-1)^{n+k}$$

$$\times \left(\frac{n+1}{\Omega_f} + \frac{k \sigma^2 \gamma}{Q \Omega_g} \right)^{-1} \quad (16)$$

然后将(15)、(16)带入(5)可得到在高信噪比时系统的中断概率. 事实上, 中断概率在 $P \rightarrow \infty$ 时的值也显示了“地板效应”的地板值.

5 计算机仿真及分析

针对多用户的通信系统, 将 DF 协作分集协议在瑞利衰落信道下的中断性能进行仿真和比较. 设信源节点 S 和信宿节点 D 之间的距离归一化为 1, 而信源节点 S 和中继节点 R 之间的归一化距离为 d , $0 < d < 1$, 路径衰落指数为 3, 这样 $\Omega_{SD} = 1$, $\Omega_h = d^{-3}$, $\Omega_g = (1-d)^{-3}$ [12]. 为了避免次级用户系统干扰到主用户的正常通信, 因此通常主用户距离信源和中继节点距离较远, 即 Ω_c 和 Ω_f 大于 Ω_{SD} , 所以不失一般性的取 $\Omega_c = 2 > \Omega_{SD}$, $\Omega_f = 2 > \Omega_{SD}$, 此外, 取 $d = 0.6$, 门限信噪比 $\gamma_{th} = 8$, $Q/\sigma^2 = 25$ dB.

图 2 给出了系统中中断概率随信噪比 p/σ^2 变化的结果. 并且分别考虑在 $K=1, 2, 20$ 的情况, 取主用户的个数 $N=2$. 由图 2 首先可以看出, 理论分析得出的中断概率闭合表达式和高信噪比时的渐进表达式均与仿真结果吻合, 证明了理论的正确性. 其次可以看出, 虽然存在地板效应, 但是通过多用户选择可以明显改善系统性能, 但从图上看, 只有当 K 从 1 变到 2 时, 取得的性能增益最大, 当 K 继续增大时 ($K=20$), 得到的性能增益明显要小的多.

图 3 则显示出在相同次级用户个数的条件下, 系统存在不同数量的主用户时的性能差异. 具体的说, 取 $K=2$, 并且分别考虑在 $N=2, 3, 4, 20$ 的情况. 由图 3

可以看出, 在次级用户个数相同的条件下, 系统同时存在的主用户数量越多, 系统的性能越差.

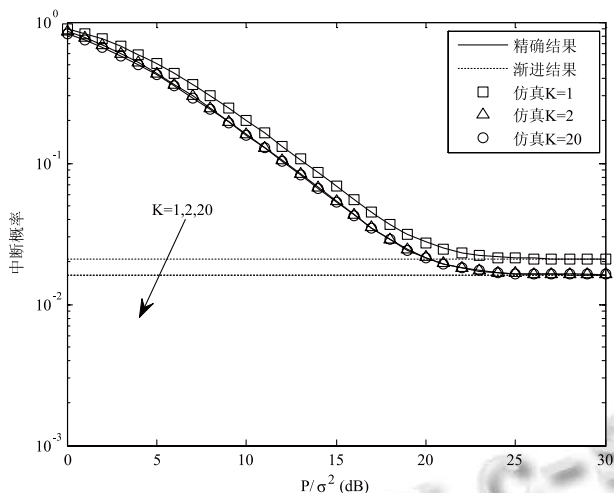


图 2 多用户条件下系统中断概率

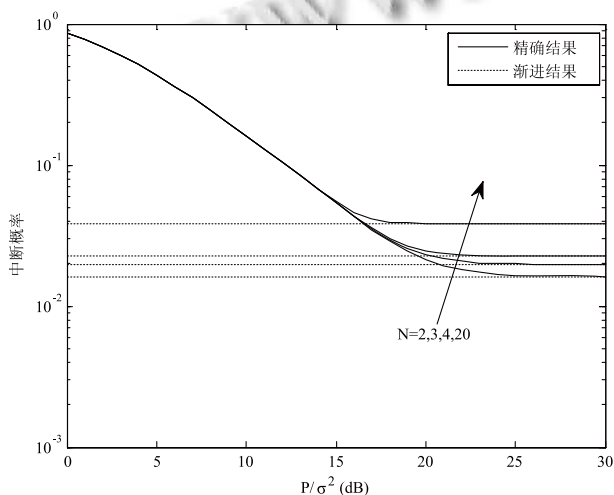


图 3 不同主用户个数下的系统中断概率

6 结语

本文通过提出一种新的认知协作通信模型, 采用多个次级接收用户进行通信. 并且在存在多个主用户的条件下, 计算分析该系统的中断概率, 推导出了中断概率的闭合表达式和渐进表达式. 并且利用本文的结果还能进一步推算系统的平均信息速率和平均误码率等.

参考文献

1 Mitola J, Maguire GQ. Cognitive radio: making software radio more personal. *IEEE Personal Communications*, 1999, 6(4): 13-18.

2 Laneman JN, Tes DNC, Wornell GW. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2004, 50(12): 3062-3080.

3 Asghari V, Aissa S. Performance of cooperative spectrum-sharing systems with amplify-and-forward relaying. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2012, 11(4): 1295-1300.

4 Duong TQ, Bao VNQ, Zepernick HJ. Exact outage probability of cognitive AF relaying with underlay spectrum sharing. *Electronics Letters*, 2011, 47(17): 1001-1002.

5 Duong TQ, Bao VNQ, Alexandropoulos GC, et al. Cooperative spectrum sharing networks with AF relay and selection diversity. *Electronics Letters*, 2011, 47(20): 1149-1151.

6 Duong TQ, Da Costa DB, Elkashlan M, et al. Cognitive amplify-and-forward relay networks over Nakagami-m fading. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2012, 61(5): 2368-2374.

7 Xia M, Aissa S. Cooperative AF relaying in spectrum-sharing systems: performance analysis under average interference power constraints and Nakagami-m fading. *IEEE Trans. on Communications*, 2012, 60(6): 1523-1533.

8 Beaulieu NC, Soliman SS. Exact analysis of multihop amplify-and-forward relaying system over general fading links. *IEEE Trans. on Communications* 2012, 60(8): 2123-2134.

9 Beaulieu NC, Farhadi G, Chen Y. A precise approximation for performance evaluation of amplify-and-forward multihop relaying system. *IEEE Trans. on Wireless Communications*. 2011, 10(12): 3985-3989.

10 Zhong C, Ratnarajah T, Wong KK. Outage analysis of decode-and-forward cognitive dual-hop systems with the interference constraint in Nakagami-m fading channels. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2011, 60(6): 2875-2879.

11 Duong TQ, Da Costa DB, Tsiftsis TA, et al. Outage and diversity of cognitive relaying systems under spectrum sharing environments in Nakagami-m fading. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(12): 2075-2078.

12 Guo H, Ge J, Ding H. Symbol error probability of tow-way amplify-and-forward relaying. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(1): 22-24.