

一种资源利用率高的协作无线系统

李 靖, 葛建华, 王 勇, 祁丽娟

(西安电子科技大学 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 提出了一种基于正交信号的自适应协作无线通信系统. 利用二维调制信号的同相和正交分量, 每个协作用户同时发送自己和伙伴的数据, 形成虚拟的多天线发射机, 可在不增加系统带宽和发射功率的情况下, 以分布式方式获得发射分集增益. 利用译码转发中继信道模型, 推导了系统误码率性能的理论表达式, 并分析了不同功率分配算法以及协作用户间信道和上行信道传输特性对系统性能的影响. 理论分析和仿真结果表明: 采用等功率分配算法时, 所提系统可获得分集增益, 且在用户间信道高信噪比条件下能获得完全分集增益; 采用最优功率分配算法可进一步提升协作系统性能.

关键词: 协作通信; 虚拟多天线; 分集; 资源分配

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2009)01-0028-05

Resource efficient cooperative wireless system

LI Jing, GE Jian-hua, WANG Yong, QI Li-juan

(State Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: An adaptive cooperative wireless communication system based on quadrature signaling is proposed, in which each user can transmit its own and the partner's information simultaneously in the in-phase and quadrature components of a two-dimension modulated signal. The virtual multiple-antenna transmitter generated in this way allows each user to achieve transmit diversity in a distributed fashion, without expanding the bandwidth and boosting the transmit power. With the decode-and-forward (DF) relay channel model, a closed-form bit error rate (BER) performance expression is derived, and then the effect of different power allocation algorithms together with various inter-user and uplink channel qualities on the system performance is investigated. Simulation results show that the proposed system, with an equal power allocation algorithm, provides diversity gains and can achieve a full diversity order at high inter-user channel signal-to-noise ratios (SNRs). Furthermore, additional performance benefits can be obtained by employing an optimum power allocation algorithm.

Key Words: cooperative communication; virtual multiple-antenna; diversity; resource allocation

多天线分集技术可以有效抵抗无线网络中多径衰落的影响, 提高网络容量, 改善系统性能^[1]. 在蜂窝移动通信、无线传感器网络和 ad hoc 等无线通信系统中, 终端设备由于受到功耗、体积和硬件复杂度等因素的限制, 实现多天线较为困难. 基于此, 协作分集技术应运而生^[2-6], 它使得多用户环境下的单天线终端可以按照一定方式共享彼此资源, 形成虚拟的多天线发射机, 从而获得发射分集增益, 提高系统传输性能.

在传统的基于时分复用的协作分集系统中^[3-5], 典型的两用户协作场景为: 每个用户将自身可用时隙的一半用来发送本地信息, 另一半用来发送伙伴的中继信息. 显然, 此类协作资源分配方式并不是最优的, 它会导致系统带宽扩展和协作用户的速率损失. 因此, 如何设计更为高效的协作资源分配方式是协作分集领域的一个重要研究方向. 文献[7-8]提出了一种基于正交信号的两用户协作分集系统, 可以在不增加系统带宽的情况下进行协作传输. 但该系统仅考虑逐符号传输和不进行循环冗余校验 (CRC) 的译码转发 (DF) 协议, 在

收稿日期: 2008-06-20

基金项目: 国家“863”计划资助 (2006AA01Z270); 广东省-国家自然科学基金委联合基金资助 (U0635003); 陕西省自然科学基金资助 (2007F07); 高等学校学科创新引智计划资助 (B08038)

作者简介: 李 靖 (1981-), 男, 讲师, 西安电子科技大学博士研究生, E-mail: jli@xidian.edu.cn.

低用户间信道信噪比(SNR)条件下会导致错误传播问题;此外,系统采用的等功率分配算法虽然相对简单,但缺乏对信道的自适应性,极大地降低了系统资源的利用率。

利用进行 CRC 校验的 DF 协议,笔者提出了一种基于正交信号的自适应协作分集系统及其最优功率分配算法,使每个协作用户对本地和中继信息的发送功率进行优化分配,从而提高系统资源利用率。

1 系统模型

笔者研究的两用户协作分集系统模型如图 1 所示。用户 A 和 B 以及目的端 D 均采用单天线。用户采用半双工传输,即不能同时发送和接收信息。目的端将用户发送的本地信息和伙伴中继的信息按照一定方式进行合并。因此,可将该协作分集系统看作虚拟的“两输入单输出”的多天线发射分集系统。

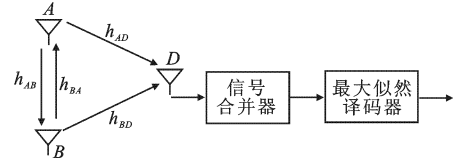


图 1 两用户协作分集系统模型

用户间信道和上行信道的衰落系数用 h_{ij} 表示, $i \in \{A, B\}$, $j \in \{A, B, D\}$, h_{ij} 均服从均值为 0 的复高斯分布, 方差为 σ_{ij}^2 。 h_{ij} 相互独立, 且在一帧内保持不变。 n_i , $i \in \{A, B, D\}$ 表示接收端的加性白噪声, 均服从均值为 0 的复高斯分布, 每维的方差为 $N_0/2$ 。与图 1 中每条链路相关的接收比特信噪比为 $\gamma_{ij} = |h_{ij}|^2 E_b/N_0$, 其平均值为 $\bar{\gamma}_{ij} = E[|h_{ij}|^2] E_b/N_0$, E_b 表示每比特信号能量。假设系统完全同步, 接收端已知理想的信道信息, 但发射端不能获得信道信息。

不失一般性, 下面讨论协作时用户 A 的数据发送和接收过程, 如图 2 所示。图中 $S_i(k)$, $i \in \{A, B\}$, $k \in \{1, \dots, N\}$ 为用户 A 和 B 发送的数据帧序列, N 为总帧数。每次协作传输分两个阶段。笔者采用二维调制进行协作, 其主要思想是每个用户从同相分量上发送本地产生数据的同时, 从正交分量上发送前一时隙对伙伴数据的估值。

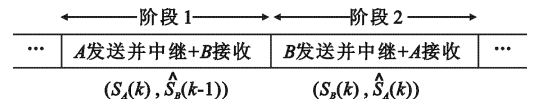


图 2 用户 A 的数据协作传输过程

在阶段 1, 用户 A 发送数据, 用户 B 和目的端接收。其中用户 A 发送的数据包括两部分: 本地数据 $S_A(k)$ 和上一次协作传输中对伙伴 B 数据的估值 $\hat{S}_B(k-1)$, 两者的功率分别为 $1-\beta^2$ 和 β^2 ($0 < \beta^2 \leq 0.5$)。用户的总发射功率归一化为 1。此时, 伙伴 B 和目的端接收的信号分别为

$$y_B(k, A) = h_{AB}((1-\beta^2)^{1/2} S_A(k) + j\beta \hat{S}_B(k-1)) + n_B(k, A) \quad (1)$$

$$y_D(k, A) = h_{AD}((1-\beta^2)^{1/2} S_A(k) + j\beta \hat{S}_B(k-1)) + n_D(k, A) \quad (2)$$

根据式(1)和最大似然(ML)译码规则, 在该阶段用户 B 对用户 A 发送数据的检测估值可表示为 $\hat{S}_A(k) = \text{sign}\{(1-\beta^2)^{1/2} \text{Re}[h_{AB}^* y_B(k, A)]\}$, 其中 $\text{Re}(\cdot)$ 表示取信号的实部。

在阶段 2, 用户 B 发送数据, 而用户 A 和目的端接收。类似地, 用户 B 也分别以部分功率 $1-\beta^2$ 和 β^2 发送本地数据 $S_B(k)$ 以及在阶段 1 对伙伴 A 数据的估值 $\hat{S}_A(k)$ 。此时, 伙伴 A 和目的端接收的信号分别为

$$y_A(k, B) = h_{BA}((1-\beta^2)^{1/2} S_B(k) + j\beta \hat{S}_A(k)) + n_A(k, B) \quad (3)$$

$$y_D(k, B) = h_{BD}((1-\beta^2)^{1/2} S_B(k) + j\beta \hat{S}_A(k)) + n_D(k, B) \quad (4)$$

当用户间信道信噪比低时, 用户 B 可能会转发错误估计的数据 $\hat{S}_A(k)$, 这样会导致错误传播, 降低协作系统性能。基于此, 笔者提出了一种适用于目的端的自适应基带接收机, 如图 3 所示。

经过协作传输, 目的端对用户 A 发送数据的检测估值可表示为

$$\hat{S}_A(k) = \text{sign}\{(1-\beta^2)^{1/2} \text{Re}[h_{AD}^* y_D(k, A)] + \theta \beta \text{Im}[h_{BD}^* y_D(k, B)]\} \quad (5)$$

其中 $\text{Im}(\cdot)$ 表示取信号的虚部。 θ 是一个二进制随机变量,

表示在阶段 1 用户 B 是否对 A 发送的数据成功解码。如果成功解码, 则 $\theta = 1$, 目的端对两路上行信道数据进

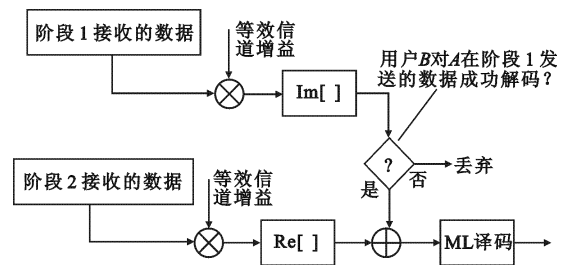


图 3 自适应基带接收机(对用户 A)

行最大比合并(MRC);反之 $\theta=0$,目的端丢弃伙伴转发的数据.同理,目的端对用户 B 发送数据的检测估值可表示为

$$\hat{S}_B(k) = \text{sign}\{(1-\beta^2)^{1/2} \text{Re}[h_{BD}^* y_D(k, B)] + \theta\beta \text{Im}[h_{AD}^* y_D(k, A)]\} \quad (6)$$

2 系统性能分析

假设每个用户均采用 BPSK 调制方式,可推导出用户 A 的端到端误码率性能.将式(2)和(4)代入式(5)可得

$$\hat{S}_A(k) = \text{sign}\{[|h_{AD}|^2(1-\beta^2) + \theta|h_{BD}|^2\beta^2]S_A(k) + n_R(k) + \theta n_I(k)\} \quad (7)$$

其中 $n_R(k)$ 和 $n_I(k)$ 为等效的加性噪声,均服从均值为0,方差分别为 $(1-\beta^2)|h_{AD}|^2N_0/2$ 和 $\beta^2|h_{BD}|^2N_0/2$ 的高斯分布.假设输入比特等概,则目的端接收用户 A 数据时的瞬时误码率可表示为

$$P_{e,A}^c = P(\hat{S}_A(k) = 1 | S_A(k) = -1) = \sum_{\theta=0}^1 P(\theta)P(\hat{S}_A(k) = 1 | S_A(k) = -1, \theta) = \\ P_{e,AB}P(n_R(k) > |h_{AD}|^2(1-\beta^2)) + (1 - P_{e,AB}) \cdot \\ P(n_R(k) + n_I(k) > |h_{AD}|^2(1-\beta^2) + |h_{BD}|^2\beta^2) = P_{e,AB}Q((2(1-\beta^2)\gamma_{AD})^{1/2}) + \\ (1 - P_{e,AB})Q((2[(1-\beta^2)\gamma_{AD} + \beta^2\gamma_{BD}])^{1/2}) \quad (8)$$

其中 $P_{e,AB} = P(\theta = 0)$,表示用户 B 对 A 的数据进行判决时的误帧率,且 Q 函数定义为 $Q(x) \triangleq \int_x^\infty \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ ($x \geq 0$).对于 Rayleigh 衰落信道,其接收信噪比概率密度函数(pdf)为 $p(\gamma_{ij}) = (1/\bar{\gamma}_{ij}) \exp(-\gamma_{ij}/\bar{\gamma}_{ij})$ ($\gamma_{ij} > 0$), $i \in \{A, B\}$, $j \in \{A, B, D\}$.根据相应的信噪比 pdf 对式(8)求平均,可得到用户 A 的平均端到端误码率性能为

$$P_{e,A} = P_{e,AB}P_{e,\text{non-cop}} + (1 - P_{e,AB})P_{e,\text{cop}} \quad (9)$$

其中 $P_{e,\text{non-cop}}$ 和 $P_{e,\text{cop}}$ 分别表示非协作和协作场景下用户 A 的平均误码率.

2.1 用户间误帧率 $P_{e,AB}$

在准静态衰落信道条件下,用户 B 接收用户 A 数据的误帧率为

$$P_{e,AB} = \int_0^\infty \{1 - (1 - P_{b,\text{BPSK}}(\gamma_{AB}))^{N_f}\} p(\gamma_{AB}) d\gamma_{AB} \quad (10)$$

其中 N_f 表示帧长,条件误码率 $P_{b,\text{BPSK}}(\gamma_{AB}) = Q((2(1-\beta^2)\gamma_{AB})^{1/2})$ ^[9].将 $P_{b,\text{BPSK}}(\gamma_{AB})$ 和 $p(\gamma_{AB})$ 代入(10),并采用 Prony 近似法^[10] $Q(x^{1/2}) \approx a \exp(-bx)$ 可得

$$P_{e,AB} \approx 1 - (1 - a)^{N_f} \left[1 + \sum_{k=1}^{N_f} \prod_{l=1}^k \frac{ab}{1 - a} \frac{N_f + 1 - l}{1 + \frac{N_f + 1 - l}{2(1-\beta^2)\bar{\gamma}_{AB}}} \right] \quad (11)$$

其中 $a = 0.18, b = 0.55$ 是通过仿真得到的近似值.

2.2 非协作和协作场景下的误码率

由前面的分析可知, $P_{e,\text{non-cop}}$ 和 $P_{e,\text{cop}}$ 分别对应于将式(8)中的 $Q((2(1-\beta^2)\gamma_{AD})^{1/2})$ 和 $Q((2[(1-\beta^2)\gamma_{AD} + \beta^2\gamma_{BD}])^{1/2})$ 根据 γ_{AD} 和 γ_{BD} 的 pdf 求平均.

在非协作场景下, $P_{e,\text{non-cop}}$ 可表示为^[9]

$$P_{e,\text{non-cop}} = \frac{1}{2} \left[1 - \left[\frac{(1-\beta^2)\bar{\gamma}_{AD}}{1 + (1-\beta^2)\bar{\gamma}_{AD}} \right]^{1/2} \right] \quad (12)$$

在协作场景下, $P_{e,\text{cop}}$ 需要根据 $(1-\beta^2)\bar{\gamma}_{AD}$ 和 $\beta^2\bar{\gamma}_{BD}$ 的取值分两种情况进行考虑.

情况 1 $(1-\beta^2)\bar{\gamma}_{AD} = \beta^2\bar{\gamma}_{BD}$.典型场景为:采用等功率分配算法($\beta^2 = 0.5$)且两协作用户的上行信道对称($\bar{\gamma}_{AD} = \bar{\gamma}_{BD}$).此时协作系统的性能等效为单天线发送双天线接收且两路接收信噪比相同的分集系统的性能,因此 $P_{e,\text{cop}}$ 可表示为^[9]

$$P_{e,\text{cop}} = \left[2 + \left(\frac{\beta^2 \bar{\gamma}_{BD}}{1 + \beta^2 \bar{\gamma}_{BD}} \right)^{1/2} \right] \left[\frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{\beta^2 \bar{\gamma}_{BD}}{1 + \beta^2 \bar{\gamma}_{BD}} \right)^{1/2} \right] \right]^2 \quad (13)$$

情况 2 $(1 - \beta^2) \bar{\gamma}_{AD} \neq \beta^2 \bar{\gamma}_{BD}$. 典型场景为:采用不等功率分配算法($\beta^2 \neq 0.5$)或两协作用户的上行信道不对称($\bar{\gamma}_{AD} \neq \bar{\gamma}_{BD}$). 此时 $P_{e,\text{cop}}$ 可表示为

$$P_{e,\text{cop}} = \int_0^\infty \int_0^\infty Q((2[(1 - \beta^2)\gamma_{AD} + \beta^2\gamma_{BD}])^{1/2}) p(\gamma_{AD}) p(\gamma_{BD}) d\gamma_{AD} d\gamma_{BD} =$$

$$\frac{1}{2} \left[1 - \frac{(1 - \beta^2) \bar{\gamma}_{AD}}{(1 - \beta^2) \bar{\gamma}_{AD} - \beta^2 \bar{\gamma}_{BD}} \left(\frac{(1 - \beta^2) \bar{\gamma}_{AD}}{1 + (1 - \beta^2) \bar{\gamma}_{AD}} \right)^{1/2} \right] +$$

$$\frac{1}{2} \left[\frac{\beta^2 \bar{\gamma}_{BD}}{(1 - \beta^2) \bar{\gamma}_{AD} - \beta^2 \bar{\gamma}_{BD}} \left(\frac{\beta^2 \bar{\gamma}_{BD}}{1 + \beta^2 \bar{\gamma}_{BD}} \right)^{1/2} \right] \quad (14)$$

将式(11)和(12),式(13)或(14)代入式(9)可得到用户 A 的端到端误码率性能表达式. 在给定用户间信道和上行信道传输特性的条件下,可求出误码率最小准则下的最优功率分配因子. 此时问题转化为

$$\beta_{\text{opt}} = \arg \min_{\beta} P_{e,A} \quad (15)$$

式(15)中的 β_{opt} 可通过数值仿真方法得到. 协作用户利用该功率分配算法可以根据信道状况对分配给本地和中继信号的功率进行自适应调整,降低系统误码率,提高系统资源利用率.

3 仿真结果与分析

下面给出了采用不同的功率分配算法时,在对称和非对称上行信道条件下,所提系统的误码率性能理论值和 Monte Carlo 仿真结果. 仿真条件是: BPSK 星座调制,所有信道互相独立,且均为平坦 Rayleigh 衰落. 用户间信道对称($\bar{\gamma}_{AB} = \bar{\gamma}_{BA} = \gamma_0$). 帧长为 128 bit,帧数为 10^6 .

3.1 等功率分配

图 4 给出了在对称上行信道条件下,用户间信道信噪比 γ_0 取不同值时,用户 A 的误码率性能理论值和仿真结果. 由图 4 可以看出,理论值和仿真结果吻合. 与直接传输相比,所提系统能获得显著的性能增益,且增益随着 γ_0 的增加而增加. 当 γ_0 足够大时,用户 A 能获得二阶完全分集增益(从性能曲线的斜率可以看出). 此外,相对于文献[7-8]中的固定协作系统,所提自适应系统即使在用户间信道质量劣于上行信道的情况下,也能获得性能改善. 如 $\gamma_0 = 15$ dB,上行信道信噪比在 15~30 dB 范围内变化时,有 3~4 dB 的增益. 理想协作(无噪声用户间信道, $\gamma_0 = \infty$)是所提系统可提供增益的极限,在 BER 为 10^{-3} 时增益等于 10 dB.

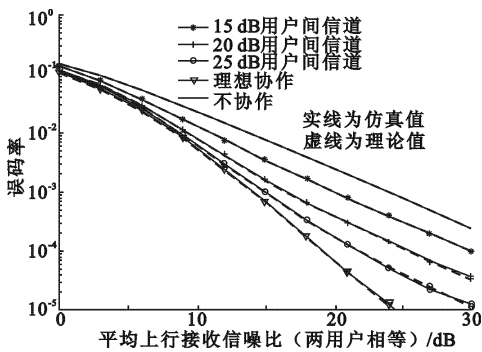


图 4 用户 A 的误码率性能(对称上行信道)

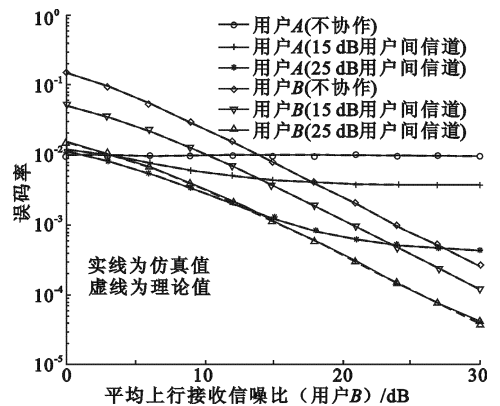


图 5 用户 A 和 B 的误码率性能(非对称上行信道)

图 5 给出了在非对称上行信道条件下, γ_0 分别取 15 dB 和 25 dB 时,用户 A 和 B 的误码率性能理论值和仿真结果. 在仿真中,用户 A 的上行信道信噪比 $\bar{\gamma}_{AD}$ 固定为 14 dB,用户 B 的上行信道信噪比 $\bar{\gamma}_{BD}$ 从 0 dB 至 30 dB 变化. 从图 5 可以看出,无论用户 A 还是 B 具有更好的上行信道质量,协作时两者均能获得性能增益,

增益的大小与用户间信道质量相关. 图 5 还说明, 随着 $\bar{\gamma}_{BD}$ 的增加, 用户 A 的性能变化不大, 而用户 B 的性能改善明显, 这说明协作用户自身的上行信道质量在其性能中占主导作用.

3.2 最优功率分配

图 6 给出了在对称上行信道条件下, γ_0 分别取 15 dB 和 25 dB 时, 用户 A 在不同功率分配算法下的性能比较. 由于理论值和仿真值吻合, 图中只给出了理论值. 在给定的用户间信道和上行信道条件下, 运用数值仿真方法求出的使平均误码率 $P_{e,A}$ 最小的功率因子 β^2 为 0.18~0.35. 因此, 当用户间信道质量改善时, 应相应提高分配给伙伴的功率, 以获得更好的协作性能. 图 6 表明, 与等功率分配相比, 采用最优功率分配可进一步提升系统性能. 此外, 最优功率分配带来的性能增益随着 γ_0 的增加相应减小了, 这是由于当系统性能已足够好时, 对其进行优化带来的收益也会减小.

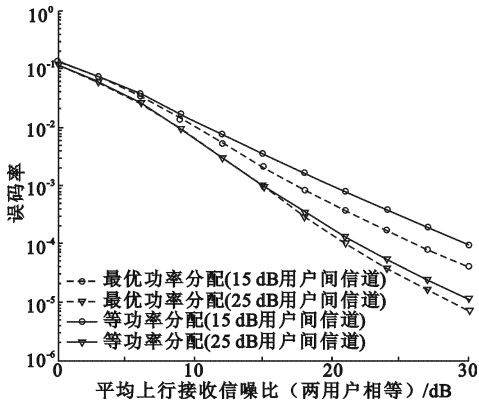


图 6 用户 A 的误码率性能(对称上行信道)

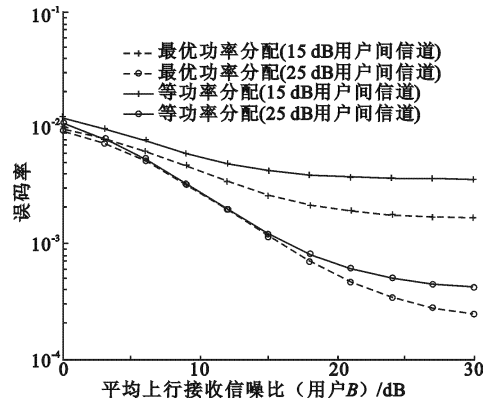


图 7 用户 A 的误码率性能(非对称上行信道)

图 7 给出了在非对称上行信道条件下, γ_0 分别取 15 dB 和 25 dB 时, 用户 A 在不同功率分配算法下的性能比较. 此时的最优功率因子 β^2 为 0.24~0.32. 对该图的分析与图 6 类似.

4 总 结

笔者提出了一种基于正交信号的自适应协作无线通信系统, 并在不同的功率分配算法以及对称和非对称上行信道条件下进行了系统的仿真. 研究表明采用等功率分配时, 所提系统在用户间信道高信噪比条件下能获得二阶完全分集增益; 但等功率分配并不是最优的, 采用最优功率分配可进一步提高协作系统性能, 该增益大小与用户间信道质量有关. 此外, 笔者的分析和研究均基于未编码系统, 若将所提协作系统辅之以差错控制编码技术还可以获得编码增益, 进一步提高系统的传输性能.

参考文献:

- [1] Choi J. Performance Analysis for Transmit Antenna Diversity with/without Channel Information[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2002, 51(1): 101-113.
- [2] Sendonaris A, Erkip E, Zhang B. User Cooperation Diversity—Part I and II [J]. IEEE Trans on Communications, 2003, 51(11): 1927-1948.
- [3] Nosratinia A, Hunter T E, Hedayat A. Cooperative Communication in Wireless Networks[J]. IEEE Communication Magazine, 2004, 42(10): 68-73.
- [4] Hunter T E, Sanayei S, Nosratinia A. Outage Analysis of Coded Cooperation[J]. IEEE Trans on Inform Theory, 2006, 52(2): 375-391.
- [5] Hunter T E, Nosratinia A. Diversity through Coded Cooperation[J]. IEEE Trans on Inform Theory, 2006, 52(2): 283-289.