

一种增强型选择放大转发机会协作分集协议

任品毅, 魏莉, 廖学文

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对协作分集系统中放大转发协议存在的噪声放大问题, 提出了一种增强型选择放大转发机会协作分集协议. 该协议首先在多个中继中选择最优的中继, 然后目的节点对源节点第1步广播的信息做出成功、半成功和失败3种反馈, 源节点和最优中继节点根据反馈信息分别采取非协作传输、源节点重传和中继放大转发3种方式, 由于加入了源节点重传, 因此减少了中继放大转发次数及噪声的放大. 理论分析和仿真结果表明, 当中断概率为 10^{-3} 、中继个数为4时, 与增强型放大转发机会协作分集协议相比, 该协议约有0.4 dB的信噪比增益, 并且达到了和理想分布式空时码相同的分集-复用折中.

关键词: 协作分集; 增强型选择; 机会中继

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)08-0053-05

A Cooperative Diversity Protocol with Incremental Selection and Amplify Forward Opportunistic Relaying

REN Pinyi, WEI Li, LIAO Xuewen

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An improved cooperative diversity protocol named incremental selection amplify forward opportunistic relaying (ISAFOR) is proposed to improve the noise amplification problem in amplify-forward protocol. The new scheme first chooses the best relay among relays. The destination sends three types of feedback when it receives the information which is sent from the source node in the first step. The three types of feedback are success, half-success and failure. Then the protocol will work with 3 transmissions: non-cooperative transmission, retransmission and amplify forwarding. It is the retransmission by the source that the new protocol reduces the times of amplify-forwarding and the noise amplification. Theoretical analysis, simulation results and comparisons with the incremental amplify forward opportunistic relaying show that when the number of relays is 4 and the outage probability is 10^{-3} , the proposed protocol achieves about 0.4 dB signal to noise ratio gain and obtains the same diversity-multiplexing as ideal distributed space-time code.

Keywords: cooperative diversity; incremental selection; opportunistic relaying

协作分集可以抵抗多径衰落, 增大系统覆盖范围, 从而受到业界的广泛关注^[1-2]. 很多关于协作分集的研究都是基于固定中继这一假设^[3-4], 然而源节点周围存在很多潜在中继节点, 因此如何根据环境选择最合适的节点进行协作便成为研究的热点. 尽

管已经出现了大量适合协作通信的分布式空时码的研究成果^[5-7], 但这些研究工作都需要复杂的空时编码. Bletsas提出了一种简单的中继选择方法^[8-9], 并证明了该方法可以达到与分布式空时编码相同的分集-复用折中. 文献[10]提出了一种增强型放大转发

机会协作分集协议(Incremental Amplify Forward Opportunistic Relaying, IAFOR),由于引入反馈,该协议实现了更高的频谱效率,但是存在噪声放大问题.针对放大转发协议的缺点,研究者提出了基于中继链路质量的混合中继协议^[11]和混合译码-放大转发中继协议^[12],这两种协议相较于AF协议,误码率和中断概率分别有所改善,但实现较为复杂.

本文针对IAFOR协议^[10]中存在的噪声放大问题,借鉴负载平衡^[4]的思想,提出了一种增强型选择放大转发机会协作分集协议(Incremental Selection Amplify Forward Opportunistic Relaying, ISAFOR).本文协议首先依据机会中继的原则^[9]选择最优中继,其次目的节点对源节点广播的信息做出成功、半成功和失败3种反馈信息,继而针对不同情况分别采用非协作传输、源节点重传和中继放转发发送方式.理论分析和仿真结果表明,本文协议达到了与理想分布式空时码相同的分集-复用折中,并且与IAFOR协议相比,中断概率有所降低.

1 系统模型

考虑一个无线网络,源节点 s 、目的节点 d 以及中继节点 r_k ($k \in \{1, \dots, K\}$)都只有单根天线,并且工作于半双工模式.假设每个中继都处于侦听状态, s 发送请求发送(RTS)分组,第 k 个中继 r_k ($k \in \{1, \dots, K\}$)和 d 均能收到, d 回复允许发送(CTS)分组,每个中继收到CTS分组之后,启动一个定时器.定时器的初始值 T_k 与对应中继节点的信道度量参数 h_k 成反比,即 $T_k = \frac{\lambda}{h_k}$,其中 $h_k = \min(|h_{sr_k}|^2, |h_{r_k d}|^2)$ ^[8], h_{sr_k} 和 $h_{r_k d}$ 分别为源节点 s 和第 k 个中继节点之间的信道衰落系数以及第 k 个中继节点和目的节点之间的信道衰落系数,服从均值为0、方差分别为 $\sigma_{sr_k}^2$ 和 $\sigma_{r_k d}^2$ 的复高斯分布, λ 为时间常数.因此,具有最大 h_k 的定时器将首先超时,对应最优中继 r_b 发送一个标志分组,表明其最佳中继身份,其他尚未超时的中继则退出竞争.机会中继系统模型如图1所示.

若一次协作发送过程的时间为 T ,且源节点 s 在第1步发送的信息为 $x_s = (x_s[1], \dots, x_s[T/2])$,那么目的节点 d 和最优中继 r_b 接收到的信号分别为

$$\left. \begin{aligned} y_{d,1}[t] &= h_{sd}(P_s)^{1/2}x_s[t] + n_{sd}[t] \\ t &= 1, \dots, T/2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

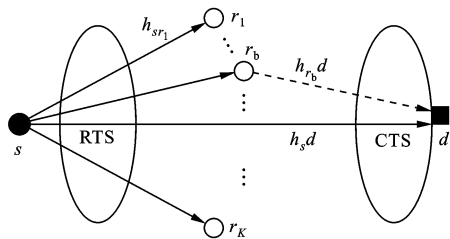


图1 机会中继系统模型

$$\left. \begin{aligned} y_{r_b}[t] &= h_{sr_b}(P_s)^{1/2}x_s[t] + n_{sr_b}[t] \\ t &= 1, \dots, T/2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

若 r_b 采用放大转发方式,那么第2步目的节点接收到的信号为

$$\left. \begin{aligned} y_{d,2}[t] &= h_{r_b d}\beta y_{r_b}[t - \frac{T}{2}] + n_{r_b d}[t] \\ t &= (T/2) + 1, \dots, T \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: h_{sd} 、 h_{sr_b} 、 $h_{r_b d}$ 分别表示 s 和 d 之间、 s 和 r_b 之间以及 r_b 和 d 之间的信道衰落系数,它们是均值为0、方差分别为 σ_{sd}^2 、 $\sigma_{sr_b}^2$ 、 $\sigma_{r_b d}^2$ 的复高斯随机变量; n_{sd} 、 n_{sr_b} 、 $n_{r_b d}$ 分别为独立同分布的0均值、方差为 N_0 的复高斯白噪声.源节点 s 的发送功率为 P_s ,最优中继节点 r_b 的发送功率为 P_r ,考虑到中继节点的发送功率受限,

则放大转发功率因子 $\beta = \left(\frac{P_r}{(|h_{sr_b}|^2 P_s + N_0)} \right)^{1/2}$ ^[14].

2 增强型选择放大转发机会协作分集协议

基于目的节点反馈的传统机会中继协作分集协议IAFOR^[10]只考虑目的节点对源节点信息译码的正确与否,在目的节点接收源节点信息失败的情况下,直接采用最优中继放大转发.然而,中继节点在放大接收信号的同时,也放大了噪声.针对上一节的系统模型,IAFOR协议的目的节点在第2步接收到的信号为

$$\begin{aligned} y_{d,2} &= h_{r_b d}\beta y_{r_b} + n_{r_b d} = \\ &= \frac{(P_r P_s)^{1/2}}{(|h_{sr_b}|^2 P_s + N_0)^{1/2}} h_{sr_b} h_{r_b d} x_s + n'_{r_b d} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $n'_{r_b d} = \left(\frac{P_r}{(|h_{sr_b}|^2 P_s + N_0)} \right)^{1/2} h_{r_b d} m_{sr_b} + n_{r_b d}$.

由式(4)可以看出, r_b 在对接收信号进行放大的同时,相应地也放大了噪声.

如果通过重传就可以保证目的节点成功接收,那么第2步中 r_b 不工作,而是源节点 s 重发,因此可以避免噪声放大.基于此,考虑 d 对 s 信息接收正确与否的程度, d 发送不同的反馈信息.如果在相同

的信道条件下源节点 s 重传能保证目的节点 d 可靠译码,那么 d 反馈半成功, r_b 不转发;反之, d 反馈失败, r_b 放大转发。

以中断概率为优化目标,根据 s 与 d 之间的传输是否发生中断,目的节点 d 反馈不同的信息。假设所有节点的发射功率相等,即 $P_s = P_r = P$, 发送信噪比 $R_{SN} = \frac{P}{N_0}$, 则非协作传输的互信息为 $I_1 = \text{lb}(1 + R_{SN} |h_{sd}|^2)$, s 重传的互信息为 $I_2 = \frac{1}{2} \text{lb}(1 + 2R_{SN} |h_{sd}|^2)$, r_b 放大转发的互信息为 $I_3 = \frac{1}{2} (\text{lb}(1 + |h_{sd}|^2 R_{SN}) + f(|h_{sr_b}|^2 R_{SN}, |h_{r_b d}|^2 R_{SN}))^{[3]}$ 。其中, $f(x, y) = \frac{(xy)}{(1+x+y)}$ 。

若信息传输速率为 $R(R_{SN})$, 当 $I_1 > R(R_{SN})$ 时, 目的节点 d 反馈成功, 最优中继节点 r_b 不工作, s 发送新的信息; 当 $I_1 < R(R_{SN})$ 且 $I_2 \geq \frac{R(R_{SN})}{2}$ 时, 目的节点 d 反馈半成功, 此时 s 重传, 节点中继 r_b 不工作; 当 $I_2 < \frac{R(R_{SN})}{2}$ 时, 目的节点 d 反馈失败, 最优中继节点 r_b 采用放大转发方式。

ISAFOR 协议的流程如下。

(1) 源节点 s 发送数据之前, 通过发送 RTS/CTS 分组估计出 h_{sk}, h_{kd} , 再从 K 个中继中选择一个最优中继 r_b , 选择的原则为

$$(|h_{sr_b}|^2, |h_{r_b d}|^2) = \arg \max_{k \in \{1, \dots, K\}} \{\min(|h_{sr_k}|^2, |h_{r_k d}|^2)\} \quad (5)$$

(2) 第 1 步发送过程结束之后, 目的节点根据信道估计的结果发送 3 种反馈信息以确定第 2 步采用的传输方式: ① 成功 ($|h_{sd}|^2 > \frac{2^{R(R_{SN})}-1}{R_{SN}}$), 此时 r_b 不对此反馈信息做出任何动作, 而源节点 s 在第 2 步发送下一时刻的新信息; ② 半成功 ($\frac{2^{R(R_{SN})}-1}{2R_{SN}} \leq |h_{sd}|^2 < \frac{2^{R(R_{SN})}-1}{R_{SN}}$), 此时 r_b 不对此反馈信息做出任何动作, 而在相同的信道条件下, 源节点 s 重发信息; ③ 失败 ($|h_{sd}|^2 < \frac{2^{R(R_{SN})}-1}{2R_{SN}}$), 源节点 s 对此反馈信息不做出任何动作, r_b 则对上一步接收到的信号放大转发。

针对上一节所述系统模型, ISAFOR 协议目的节点第 2 步的接收信号可以表示为

$$y_{d,2}[t] = \begin{cases} h_{sd}x_s[t+1] + n_{sd}[t] & (|h_{sd}|^2 > \frac{2^{R(R_{SN})}-1}{R_{SN}}) \\ h_{sd}x_s[t] + n_{sd}[t] & (\frac{2^{R(R_{SN})}-1}{2R_{SN}} \leq |h_{sd}|^2 < \frac{2^{R(R_{SN})}-1}{R_{SN}}) \\ h_{r_b d}\beta y_{sr_b}[t - \frac{T}{2}] + n_{r_b d}[t] & (|h_{sd}|^2 < \frac{2^{R(R_{SN})}-1}{2R_{SN}}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $x_s[t+1]$ 表示源节点发送的下一时刻的新信息, $t = T/2+1, T/2+2, \dots, T$ 。

最后, 目的节点对两步接收到的信号进行最大比合并(MRC)。

3 性能分析

3.1 分集-复用折中

定义 1 假设信息传输速率为 $R(R_{SN}) = \text{lb}(1 + R_{SN}^r)$, $r \in (0, 1)$ 。若 $P_{\text{out}}(R_{SN})$ 表示系统的中断概率, 那么系统的分集-复用折中关系为^[13]

$$d(r) = - \lim_{R_{SN} \rightarrow \infty} \frac{\text{lb} P_{\text{out}}(R_{SN})}{\text{lb} R_{SN}} \quad (7)$$

式中: r 为复用增益; $d(r)$ 为分集增益。

ISAFOR 协议的中断概率为

$$P_{\text{out}} = P\{I_{\text{ISAFOR}} < R(R_{SN})\} = P\left\{|h_{sd}|^2 < \frac{R_{SN}^{r-1}}{2}, |h_{sd}|^2 + \frac{f(|h_{sr_b}|^2 R_{SN}, |h_{r_b d}|^2 R_{SN})}{R_{SN}} < R_{SN}^{r-1}\right\} \quad (8)$$

由于 $P(X+Y < \theta) \leq P(X \leq \theta, Y \leq \theta)$, 且 $h_{sd}, h_{sr_b}, h_{r_b d}$ 相互独立, 式(8)可写为

$$P_{\text{out}} \leq P\left(|h_{sd}|^2 \leq \frac{R_{SN}^{r-1}}{2}\right) P(f(R_{SN} |h_{sr_b}|^2, R_{SN} |h_{r_b d}|^2) \leq R_{SN}^{r-1}) \quad (9)$$

根据文献[8]中的定理 4, 在高信噪比下, 系统的中断概率为

$$P_{\text{out}} \leq P\left\{|h_{sd}|^2 < \frac{R_{SN}^{r-1}}{2}, \min(|h_{sr_b}|^2, |h_{r_b d}|^2) \leq R_{SN}^{r-1} + R_{SN}^{r-1}(1 + R_{SN}^r)^{1/2}\right\} \approx R_{SN}^{r-1} R_{SN}^{K(r-1)} = R_{SN}^{(K+1)(r-1)} \quad (10)$$

系统的分集-复用折中关系式为

$$d(r) = - \lim_{R_{SN} \rightarrow \infty} \frac{\text{lb} P_{\text{out}}}{\text{lb} R_{SN}} = (K+1)(1-r) \quad (11)$$

式(11)表明, 采用 ISAFOR 协议可以达到和理

想分布式空时编码协作系统相同的分集-复用折中.

3.2 平均传输速率

假设直接传输时的信息传输速率为 $R(R_{\text{SN}}) = \text{lb}(1 + R_{\text{SN}}^r)$, $r \in (0, 1)$. 由于采用不同的发送方式信息传输速率不同, 所以 ISAFOR 协议的平均传输速率为

$$\bar{R}(R_{\text{SN}}) = R(R_{\text{SN}})P(|h_{sd}|^2 > R_{\text{SN}}^{-1}) + \frac{R(R_{\text{SN}})}{2}P(|h_{sd}|^2 \leq R_{\text{SN}}^{-1}) \quad (12)$$

式(12)中第1部分表示目的节点 d 对源节点 s 信息译码成功, 采用非协作发送方式, 信息的传输速率为 $R(R_{\text{SN}})$. 式(12)中的第2部分表示源节点 s 重传和最优中继节点 r_b 放大转发时, 信息传输速率为 $\frac{R(R_{\text{SN}})}{2}$.

高信噪比下的平均传输速率为

$$\begin{aligned} \bar{R}(R_{\text{SN}}) &= R(R_{\text{SN}})P(|h_{sd}|^2 > R_{\text{SN}}^{-1}) + \\ &\frac{R(R_{\text{SN}})}{2}P(|h_{sd}|^2 \leq R_{\text{SN}}^{-1}) = \\ R(R_{\text{SN}}) - \frac{R(R_{\text{SN}})}{2}R_{\text{SN}}^{-1} &\stackrel{R_{\text{SN}} \rightarrow \infty}{\approx} R(R_{\text{SN}}) \end{aligned} \quad (13)$$

可见, ISAFOR 协议在高信噪比下可以近似达到和直接传输相同的平均传输速率.

4 性能仿真

假设所有节点分布在 2×2 的归一化正方形区域内, 源节点 s 和目的节点 d 的坐标分别为 $S(0, 0)$ 和 $D(2, 2)$, 其他节点随机分布在该区域内, 第 k 个中继节点的坐标为 (x_k, y_k) , 其中 $k \in \{1, 2, \dots, K\}$. 图2给出了节点的分布图. 假设所有信道为瑞利平坦衰落信道, 各信道衰落系数相互独立, 信道衰落系数 h_{ij} 的方差 $\sigma_{ij}^2 = d_{ij}^{-\beta}$, 其中 d_{ij} 表示节点 i 和节点 j 之间的距离, β 为路径损耗指数且 $\beta = 2$, 信息传输速率 $R = 1 \text{ b/(s} \cdot \text{Hz)}$. 采用 Monte Carlo 仿真技术进行仿真, 分别考虑网络中存在 2 个、4 个和 6 个中继时 IAFOR 和 ISAFOR 协议的性能.

图3给出了中继个数分别为 2、4、6 时, IAFOR 和 ISAFOR 协议的中断概率性能. 从图3中可以看出, 当中断概率为 10^{-3} 时, 中继个数为 2、4 和 6, 本文提出的 ISAFOR 协议较 IAFOR 协议均分别有 0.6、0.4 和 0.1 dB 左右的信噪比增益. 这是因为在 IAFOR 协议中, 当直接传输失败 (即 $|h_{sd}|^2 < \frac{2^{R(R_{\text{SN}})} - 1}{R_{\text{SN}}}$) 时, 中继直接对接收信号进行放大转发, 而 ISAFOR 协议将信道状态信息进行细

分, 当 $\frac{2^{R(R_{\text{SN}})} - 1}{2R_{\text{SN}}} \leq |h_{sd}|^2 < \frac{2^{R(R_{\text{SN}})} - 1}{R_{\text{SN}}}$ 时, 不采用中继放大转发, 而是由源节点重传, 可保证不会发生中断, 当 $|h_{sd}|^2 < \frac{2^{R(R_{\text{SN}})} - 1}{2R_{\text{SN}}}$ 时, 中继放大转发. 由于两种协议都是在放大转发下可能发生中断, 所以相比于 IAFOR 协议, ISAFOR 协议通过对信道状态信息的细分, 避免了不必要的中继放大转发, 减少了噪声放大, 因此中断概率得以降低. 另外, 从图3中也可以看出, 随着中继个数的增多, ISAFOR 协议的中断概率逐渐降低, 这是因为它们都只选用一个最优的中继进行转发, 中继个数越多, 在某一时刻选择信道质量较好的中继的概率就会增加. 这体现了通过中继选择带来的分集效果的改善.

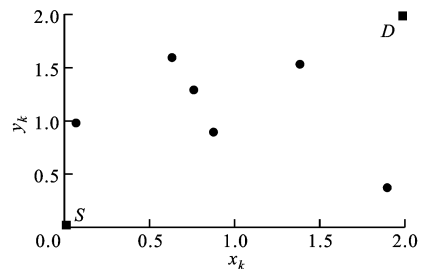


图2 节点分布图

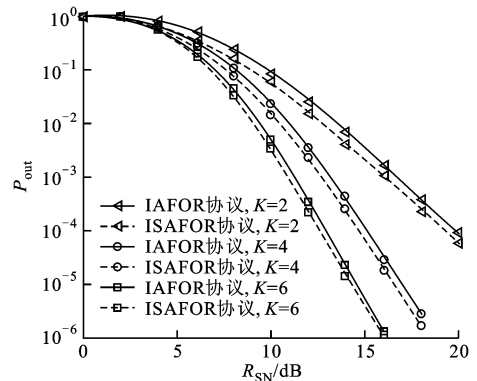


图3 2种协议的中断概率性能

归一化频谱效率和复用增益分别定义为 $\eta_{\text{norm}} = \frac{\bar{R}}{\text{lb}(1 + R_{\text{SN}}\sigma_{sd}^2)}$ [3] 和 $r = \lim_{R_{\text{SN}} \rightarrow \infty} \frac{\bar{R}}{\text{lb}R_{\text{SN}}}$ [8]. 由于 $r = \lim_{R_{\text{SN}} \rightarrow \infty} \frac{\bar{R}}{\text{lb}R_{\text{SN}}} \approx \lim_{R_{\text{SN}} \rightarrow \infty} \frac{\bar{R}}{\text{lb}(1 + R_{\text{SN}}\sigma_{sd}^2)} = \eta_{\text{norm}}$, 且中断概率可以体现系统的分集增益, 因此归一化频谱效率和中断概率的关系反映了系统的分集-复用折中效果. 假设 $R_{\text{SN}} = 15 \text{ dB}$, 图4给出了中继数分别为 2、4、6 时, IAFOR 和 ISAFOR 两种协议的中断概率和归一化频谱效率的关系. 从图4中可以看出, 在相同的归一化频谱效率下, ISAFOR 协议的中断性能明显优于 IAFOR 协议. 这是由于 ISAFOR 协议较

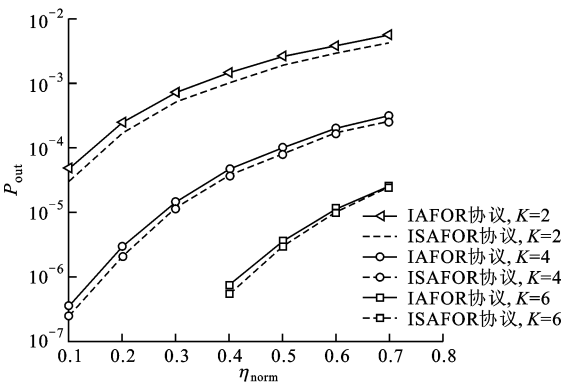


图 4 2 种协议的中断概率节点分布图
随归一化频谱效率的变化

IAFOR 协议增加了半成功的反馈信息,而在半成功条件下源节点重传可以保证成功接收.另外,随着中继数的增加,ISAFOR 协议和 IAFOR 协议的中断概率逐渐接近,这是因为随着中继数的增加,可利用的分集增益越多,而 IAFOR 协议中最优中继的转发效果会更加接近于 ISAFOR 协议中源节点重发的传输效果,所以两者的中断概率性能非常接近.

5 结束语

本文提出了一种增强型选择放大转发机会协作分集协议,并对该协议的性能进行了理论分析和仿真实验. ISAFOR 协议采用简单的最优中继选择算法,以较低的复杂度实现了和理想分布式空时码相同的分集-复用折中,并且在高信噪比下,获得的平均传输速率与直接传输速率相同. 相比于增强型放大转发机会协作分集协议,本文协议的中断概率性能有所改善.

参考文献:

[1] SENDONAI S A, ERKIP E, AAZHANG B. User co-operation diversity — part I: system description [J]. IEEE Trans on Communications, 2003, 51 (11): 1927-1938.

[2] SENDONAI S A, ERKIP E, AAZHANG B. User co-operation diversity — part II: implementation aspects and performance analysis [J]. IEEE Trans on Communications, 2003, 51(11):1939-1948.

[3] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Co-operative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Trans on Inform Theory, 2004, 50 (12):3062-3080.

[4] ZHOU Q F, LAU F C M. Two incremental relaying

protocols for cooperative networks [J]. IET Communications, 2008, 2 (10):1272-1278.

[5] XIA Xianggen. A distributed space-time coding in asynchronous wireless relay networks [J]. IEEE Trans on Wireless communications, 2008, 7(5): 1812-1816.

[6] ZHONG Zhimeng, ZHU Shihua, NALLANATHAN A. A distributed space-time trellis code for asynchronous cooperative communications under frequency-selective channels [J]. IEEE Trans on Wireless communications, 2009, 8 (2): 796-805.

[7] 高贞贞, 朱世华, 徐静. 放大转发异步协作通信系统中的差分空时频传输方案 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43 (6): 62-66.

GAO Zhenzhen, ZHU Shihua, XU Jing. Differential space-time-frequency transmission for amplify-and-forward asynchronous cooperative communications [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43 (6): 62-66.

[8] BLETSA A, KHISTI A, REED D P. A simple cooperative diversity method based on network path selection [J]. IEEE J Sel Areas Communications, 2006, 24 (3): 659-672.

[9] BLETSA A, SHIN H, WIN M Z. Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2007, 6 (9): 3450-3460.

[10] BLETSA A, KHISTI A, WIN M Z. Opportunistic cooperative diversity with feedback and cheap radios [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2008, 7 (5): 1823-1827.

[11] FRICKE J C, BUTT M M, HOEHER P A. Quality-oriented adaptive forwarding for wireless relaying [J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12 (3): 200-202.

[12] BAO Xingkai, LI Jing. Efficient message relaying for wireless user cooperation: decode-amplify-forward (DAF) and hybrid DAF and coded-cooperation [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2007, 6 (11): 3975-3984.

[13] ZHENG Lizhong, TSE D N C. Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple-antenna channels [J]. IEEE Trans on Inform Theory, 2003, 49 (5):1073-1096.

[14] LIU K J R, SADEK A K, SU Weifeng. Cooperative Communications and networking [M]. Cambridge, U K: Cambridge University Press, 2009:151-170.

(编辑 刘杨)