

低信噪比下增强型解码转发协作的性能分析

朱义君, 李瑛, 田忠俊, 陈晋央

(信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 研究了接收节点将其译码状态反馈给其他节点这一增强性手段对解码转发协作的性能改善情况。推导了低信噪比条件下, 增量中继、选择中继的中断概率和吞吐量表达式, 给出了中断概率的三阶近似式。结合增量中继、选择中继的各自优点, 提出了一种联合中继模式。理论分析和数值仿真表明, 提出的联合中继模式在中断概率和吞吐量 2 个方面性能优越。

关键词: 协作分集; 解码转发; 增量中继; 选择中继; 最大流最小集

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2010)02-0081-05

Performance of improved decode-and-forward cooperation in low SNR

ZHU Yi-jun, LI Ying, TIAN Zhong-jun, CHEN Jin-yang

(Institute of Information Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: An enhancement was proposed that the receiving node feeds back its decoding state to the other nodes. Further, the enhancement can improve the performance of decode-and-forward cooperative diversity. The outage probability and throughput of incremental relay and selection relay were derived in low SNR, and the three-order approximation of outage probability was presented. Combined with the strong points of incremental relay and selection relay, joint relay was brought forward. The theoretical analysis and numerical simulation reveal that the proposed joint relay has such predominant performances as outage probability and throughput.

Key words: cooperative diversity; decode-and-forward; incremental relay; selection relay; max-flow min-cut

1 引言

无线通信中的协作技术使得单天线节点能够共享其他节点的资源, 从而形成虚拟天线阵列来有效抵抗信道衰落的影响。近年来, 大量学者对协作分集技术开展了广泛的研究^[1~3]。研究表明通过协作获得的分集增益可有效降低系统的中断概率, 但目前大多数的研究结论是建立在大信噪比条件下

的, 而对于工作在小区边缘的移动终端或纽扣电池供电的传感器节点来说, 其通信时的信噪比往往是有限的^[4,5], 甚至是在低信噪比下工作的。因此研究低信噪比下的协作技术, 具有一定的实际应用价值。

在大信噪比条件下, 协作分集的性能常用分集增益和复用增益来衡量, 而在低信噪比条件下, 能量效率变得更为重要^[6]。Salman 在文献[6]中提出了

收稿日期: 2009-09-03; 修回日期: 2010-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60872043); 国家重大科技专项新一代宽带无线移动通信网基金资助项目 (2009ZX03003-005-01)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60872043); The New-generation Mobile Wireless Communication Network of National Sci-Tech Major Special Item (2009ZX03003-005-01)

一种猝发放大转发(BAF, bursty amplify-and-forward)传输方案,并推导了低信噪比条件下其中断概率和中断容量表达式,证明其性能接近于最大流—最小集上界。文献[7]将 Salman 的研究结果推广到任意分布信道上。文献[8]和文献[9]分别研究了节点地理位置对称时,选择中继(selection relaying)和增量中继(incremental relaying)在低信噪比条件下的中断概率和中断容量。

在上述协作分集的研究中,通常假设接收节点知道完整的信道信息,而发射节点不知道信道状态信息(CSI)。本文研究的增强型解码转发协作的增强性主要体现在接收节点接收到信号之后,可以将其译码正确与否(ACK、NACK)反馈给其他节点,其他节点再根据接收节点反馈信息的不同决定下一步的协作方式。论文推导了增量中继和选择中继的吞吐量和中断概率表达式,给出了低信噪比条件下中断概率的三阶近似式,可以看出,增量中继吞吐性能好,而选择中继中断概率低。结合增量中继和选择中继的各自优点,论文提出了一种联合中继模式,在中断概率和吞吐量两方面均性能优越。

2 信号模型和参数说明

典型的三端协作模型如图 1 所示。实际应用中,由于受节点收发隔离性能的限制,通常要求其工作在半双工状态^[1]。在时分半双工解码转发模式下,每次传输包括 2 个阶段。在第一个阶段,源节点 S 发送信息,协作(中继)节点 R 和目的节点 D 接收信息;如果 R 能够正确译码,则其将在第二阶段采用相同的码本编码后发送给 D, D 将 2 个阶段接收到的 2 份信息采用最大比合并后再译码;如果第一阶段节点 R 译码错误,则在第二阶段节点 R 和节点 S 均不发送任何内容,其时隙分配如图 2(a)所示。假设 S-D、S-R、R-D 的信道增益变量 a_{sd} 、 a_{sr} 、 a_{rd} 服从相互独立的平坦衰落瑞利分布,其均值均为

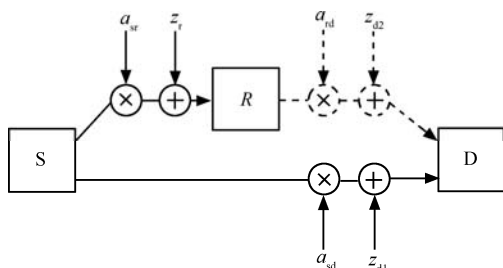


图 1 三端协作模型示意图

零,方差分别为 g_{sd} 、 g_{sr} 、 g_{rd} ,即 $|a_{sd}|^2$ 、 $|a_{sr}|^2$ 、 $|a_{rd}|^2$ 分别服从参数为 g_{sd}^{-1} 、 g_{sr}^{-1} 、 g_{rd}^{-1} 的指数分布;节点 R 和节点 D 接收到的高斯白噪声 z_r 、 z_{d1} 、 z_{d2} 相互独立,均值均为零,方差均为 N_0 。

在不采用协作直接传输时,每次传输的时间长度为 T_0 ,传输速率为 R_0 ,带宽为 B ,则其频带利用率为 $\eta_0=R_0/B$;每个节点的发射功率均为 P_0 ,则发射信噪比 $SNR=P_0/N_0$ 。采用协作之后,每个阶段的时间长度为 $T_0/2$,因此其频带利用率为 $2\eta_0$ 。

依据最大流—最小集(MFMC, max-flow min-cut)定理,在不考虑中继发射信号与源发射信号之间的相关性的条件下,3 节点协作的互信息上界为^[6]

$$I_{MFMC} \approx \left(|a_{sd}|^2 + \min(|a_{sr}|^2, |a_{rd}|^2) \right) SNR \quad (1)$$

因此, MFMC 中断概率为

$$P_{out-MFMC} = P\{I_{MFMC} < 2\eta_0\} = P\left\{ |a_{sd}|^2 + \min(|a_{sr}|^2, |a_{rd}|^2) < \frac{2\eta_0}{SNR} \right\} \quad (2)$$

当 $SNR \rightarrow 0$ 时,假设 $\eta_0 \rightarrow 0$,定义 $\gamma_0 = \frac{e^{2\eta_0} - 1}{SNR} \approx \frac{2\eta_0}{SNR}$, $\gamma_0 \rightarrow 0$ 。令随机变量 $U = |a_{sd}|^2$, $V = \min(|a_{sr}|^2, |a_{rd}|^2)$,由于 $|a_{sd}|^2$ 、 $|a_{sr}|^2$ 、 $|a_{rd}|^2$ 分别服从参数为 g_{sd}^{-1} 、 g_{sr}^{-1} 、 g_{rd}^{-1} 的指数分布,则 V 服从参数为 $\frac{g_{rd} + g_{sr}}{g_{rd}g_{sr}}$ 的指数分布,因此:

$$P_{out-MFMC} = \int P\{U + V < \gamma | V = v\} f_V(v) dv = \int_0^\gamma \left[1 - \exp\left(-\frac{v-\gamma}{g_{sd}}\right) \right] \times \frac{g_{rd} + g_{sr}}{g_{rd}g_{sr}} \exp\left(-\frac{g_{rd} + g_{sr}}{g_{rd}g_{sr}}v\right) dv \quad (3)$$

采用 $e^x \approx 1 + x + \frac{1}{2}x^2$ 对式(3)近似可以得到:

$$P_{out-MFMC} \approx \frac{(g_{sr} + g_{rd})\gamma^2}{2g_{sd}g_{sr}g_{rd}} - (g_{sr} + g_{rd}) \frac{(g_{sd}g_{sr} + g_{sd}g_{rd} + g_{sr}g_{rd})\gamma^3}{6g_{sd}^2g_{sr}^2g_{rd}^2} \quad (4)$$

在衰落信道下,只要采用合适的编码方式且码本足够长,则中断概率近似等于误码率^[10]。因此, MFMC 单位时间单位频带内所传输的有效信息量,即单位频带内的吞吐量为

$$Thr_{MFMC} = \frac{\eta_0 T_0}{T_0} (1 - P_{out-MFMC}) = \eta_0 (1 - P_{out-MFMC}) \quad (5)$$

3 增强型解码转发性能分析

3.1 IDF 传输模式

文献 [1, 9] 对 IDF (incremental relaying, incremental decode-and-forward) 模式进行了研究, 其基本思想也是将一次传输分为 2 个阶段: 第一阶段, S 发送, R 和 D 接收; 如果第一阶段 D 接收正确, 则 D 通过反馈告知 S 和 R, 取消第二阶段的传输, 并结束整个传输过程; 如果第一阶段 D 接收不正确, 则在第二阶段 R 再根据其译码正确与否决定是否给 D 传输。假设 D 每次反馈所占用的时隙为 δT , 如图 2(b) 所示。可以看出, δ 相当于反馈时隙占一帧总时间的比例。由于接收节点反馈时, 只需要告知其接收是否正确, 因此 δ 的取值较小。IDF 模式下, 系统能够获得的最大互信息为

$$I_{IDF} = \begin{cases} \frac{1}{2} \ln(1 + |a_{sd}|^2 SNR) & , |a_{sr}|^2 < \gamma_1 \\ \frac{1}{2} \ln(1 + (|a_{sd}|^2 + |a_{rd}|^2) SNR) & , |a_{sr}|^2 \geq \gamma_1 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\gamma_1 = \frac{e^{2\eta_0/(1-\delta)} - 1}{SNR} \approx \frac{2\eta_0/(1-\delta)}{SNR}$ 。在 IDF 模式下, 系统的中断概率为

$$P_{out-IDF} = P\{I_{IDF} < \eta_0\} = P\{|a_{sd}|^2 < \gamma_1\} P\{|a_{sr}|^2 < \gamma_1\} + P\{|a_{sd}|^2 + |a_{rd}|^2 < \gamma_1\} P\{|a_{sr}|^2 \geq \gamma_1\} \quad (7)$$

其中,

$$P\{|a_{sd}|^2 < \gamma_1\} = 1 - e^{-\frac{\gamma_1}{g_{sd}}} \approx \frac{\gamma_1}{g_{sd}} - \frac{\gamma_1^2}{2g_{sd}^2} + \frac{\gamma_1^3}{6g_{sd}^3} \quad (8)$$

$$P\{|a_{sr}|^2 < \gamma_1\} = 1 - e^{-\frac{\gamma_1}{g_{sr}}} \approx \frac{\gamma_1}{g_{sr}} - \frac{\gamma_1^2}{2g_{sr}^2} + \frac{\gamma_1^3}{6g_{sr}^3} \quad (9)$$

$$P\{|a_{sr}|^2 \geq \gamma_1\} = e^{-\frac{\gamma_1}{g_{sr}}} \approx 1 - \frac{\gamma_1}{g_{sr}} + \frac{\gamma_1^2}{2g_{sr}^2} - \frac{\gamma_1^3}{6g_{sr}^3} \quad (10)$$

$$P\{|a_{sd}|^2 + |a_{rd}|^2 < \gamma_1\} \approx \frac{\gamma_1^2}{2g_{sd}g_{rd}} - \frac{(g_{sd} + g_{rd})\gamma_1^3}{6g_{sd}^2g_{rd}^2} \quad (11)$$

将式(8)~式(11)代入式(7)得到 IDF 的中断概率为

$$P_{out-IDF} \approx \frac{(2g_{rd} + g_{sr})}{2g_{sd}g_{rd}g_{sr}} \gamma_1^2 - \frac{2(g_{sd} + g_{sr})}{3g_{sd}^2g_{sr}^2} \gamma_1^3 - \frac{1}{2g_{sd}g_{rd}g_{sr}} \gamma_1^3 \quad (12)$$

在 IDF 模式下, 每次传输所占用的时间为

$$T_{IDF} = \begin{cases} \frac{T + \delta T}{2} & , |a_{sd}|^2 \geq \gamma_1 \\ T & , |a_{sd}|^2 < \gamma_1 \end{cases} \quad (13)$$

因此, IDF 模式下的吞吐量为

$$Thr_{IDF} = \frac{2\eta_0}{1 + \delta + P\{|a_{sd}|^2 < \gamma_1\}(1 - \delta)} (1 - P_{out-IDF}) \quad (14)$$

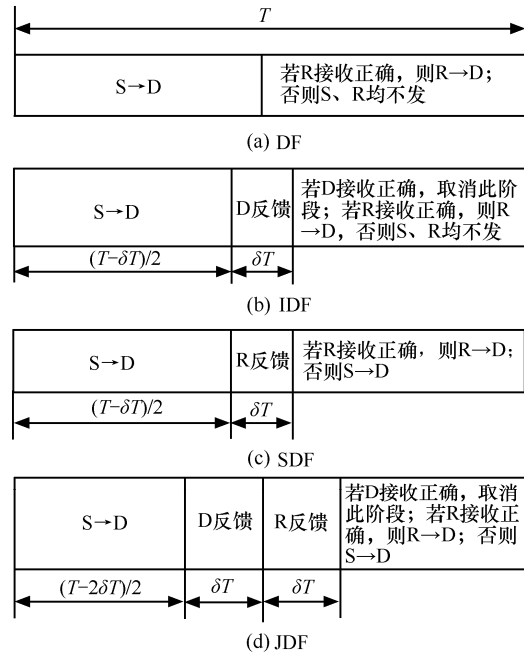


图2 各种模式下, 时隙分配示意图

3.2 SDF 传输模式

文献 [1, 8] 对 SDF (selection relaying, selection decode-and-forward) 模式进行了研究, 其基本思想是: 第一阶段, S 发送, R 和 D 接收; 如果第一阶段 R 接收正确, 则其将在第二阶段采用相同的码本编码后发送给 D; 如果第一阶段 R 接收不正确, 则其将反馈告知 S, 要求其在第二阶段给 D 再发送一遍。假设 R 每次反馈所占用的时隙也为 δT , 时隙分配如图 2(c) 所示。因此, SDF 模式下, 系统能够获得的最大互信息为

$$I_{SDF} = \begin{cases} \frac{1}{2} \ln(1 + 2|a_{sd}|^2 SNR) & , |a_{sr}|^2 < \gamma_1 \\ \frac{1}{2} \ln(1 + (|a_{sd}|^2 + |a_{rd}|^2) SNR) & , |a_{sr}|^2 \geq \gamma_1 \end{cases} \quad (15)$$

SDF 模式下, 系统的中断概率为

$$P_{\text{out-SDF}} = P\left\{|a_{\text{sd}}|^2 < \frac{\gamma_1}{2}\right\} P\left\{|a_{\text{sr}}|^2 < \gamma_1\right\} + P\left\{|a_{\text{sd}}|^2 + |a_{\text{rd}}|^2 < \gamma_1\right\} P\left\{|a_{\text{sr}}|^2 > \gamma_1\right\} \quad (16)$$

其中,

$$P\left\{|a_{\text{sd}}|^2 < \frac{\gamma_1}{2}\right\} = 1 - e^{-\frac{\gamma_1}{2g_{\text{sd}}}} \approx \frac{\gamma_1}{2g_{\text{sd}}} - \frac{\gamma_1^2}{8g_{\text{sd}}^2} + \frac{\gamma_1^3}{48g_{\text{sd}}^3} \quad (17)$$

将式(17)、式(9)、式(10)、式(11)代入式(16)得到:

$$P_{\text{out-SDF}} \approx \frac{(g_{\text{rd}} + g_{\text{sr}})}{2g_{\text{sd}}g_{\text{rd}}g_{\text{sr}}}\gamma_1^2 - \frac{7g_{\text{sd}} + 10g_{\text{sr}}}{24g_{\text{sd}}^2g_{\text{sr}}^2}\gamma_1^3 - \frac{1}{2g_{\text{sd}}g_{\text{rd}}g_{\text{sr}}}\gamma_1^3 \quad (18)$$

在 SDF 模式下, 每次传输占用的时间均为 T_0 , 因此其吞吐量为

$$Thr_{\text{SDF}} = \eta_0 (1 - P_{\text{out-SDF}}) \quad (19)$$

3.3 JDF 传输模式

由上述分析可以看出, 增量中继吞吐性能好, 但是选择中继中断概率低。结合 IDF 和 SDF 的各自优点, 本文提出了一种新型的联合解码转发 (JDF, joint decode-and-forward) 方案, 其基本思想是: 第一阶段, S 发送, R 和 D 接收, 第一阶段结束后, D 和 R 将各自接收正确与否反馈给另外 2 个节点。如果第一阶段 D 接收正确, 则取消第二阶段的传输, 并结束整个传输过程; 如果第一阶段 D 接收不正确, 但 R 接收正确, 则 R 将在第二阶段采用相同的码本编码后发送给 D; 如果第一阶段 D 接收不正确且 R 接收不正确, 则 S 将在第二阶段再给 D 重发一遍。假设 D 和 R 每次反馈所占用的时隙均为 δT , 时隙分配如图 2(d) 所示。因此, JDF 模式下, 系统能够获得的最大互信息为

$$I_{\text{JDF}} = \begin{cases} \frac{1}{2} \ln(1 + 2|a_{\text{sd}}|^2 SNR) & , |a_{\text{sr}}|^2 < \gamma_2 \\ \frac{1}{2} \ln(1 + (|a_{\text{sd}}|^2 + |a_{\text{rd}}|^2) SNR) & , |a_{\text{sr}}|^2 \geq \gamma_2 \end{cases} \quad (20)$$

其中, $\gamma_2 = \frac{e^{2\eta_0/(1-2\delta)} - 1}{SNR} \approx \frac{2\eta_0/(1-2\delta)}{SNR}$ 。比较式(15)

和式(20)2 式可知, JDF 和 SDF 的互信息表达式相似, 因此 JDF 的中断概率为

$$P_{\text{out-JDF}} \approx \frac{(g_{\text{rd}} + g_{\text{sr}})}{2g_{\text{sd}}g_{\text{rd}}g_{\text{sr}}}\gamma_2^2 - \frac{7g_{\text{sd}} + 10g_{\text{sr}}}{24g_{\text{sd}}^2g_{\text{sr}}^2}\gamma_2^3 - \frac{1}{2g_{\text{sd}}g_{\text{rd}}g_{\text{sr}}}\gamma_2^3 \quad (21)$$

在 JDF 模式下, 每次传输所占用的时间为

$$T_{\text{IDF}} = \begin{cases} \frac{T + 2\delta T}{2} & , |a_{\text{sd}}|^2 \geq \gamma_2 \\ T & , |a_{\text{sd}}|^2 < \gamma_2 \end{cases} \quad (22)$$

因此, JDF 模式下系统的吞吐量为

$$Thr_{\text{JDF}} = \frac{2\eta_0}{1 + 2\delta + P\{|a_{\text{sd}}|^2 < \gamma_2\}(1 - 2\delta)} (1 - P_{\text{out-JDF}}) \quad (23)$$

4 数值仿真和比较

假设信道传输系数的均值 g_{sd} 、 g_{sr} 、 g_{rd} 服从大尺度路径损耗模型, 即 $g_{\text{sd}} \propto 1/d_{\text{sd}}^\alpha$ 、 $g_{\text{sr}} \propto 1/d_{\text{sr}}^\alpha$ 、 $g_{\text{rd}} \propto 1/d_{\text{rd}}^\alpha$, 其中 d_{sd} 、 d_{sr} 、 d_{rd} 分别表示 S-D、S-R、R-D 的距离, α 称为路径衰落因子, 一般取 2~5, 在这里固定取 $\alpha=4$ 。假设 S、R、D 在一条直线上, 且 R 在 S、D 之间, 取 $d_{\text{sd}}=1$, $d_{\text{sr}}+d_{\text{rd}}=1$ ^[4]。取 $\eta_0=0.5$, $\delta=0.05$ 。

图 3 是 $d_{\text{sr}}=d_{\text{rd}}=0.5$, 信噪比 SNR 在 0~10dB 变化时, MFMC、IDF、SDF、JDF 的中断概率变化曲线图。可以看出, 在低信噪比条件下, IDF 的中断概率比 MFMC 高, 而 SDF 和 JDF 的中断概率比 MFMC 低。这是因为推导 MFMC 的中断概率时假定源节点不知道中继节点和目的节点的状态信息, 而 SDF 和 JDF 均利用了它们的状态信息 (ACK、NACK)。根据文献[6], BAF 的中断概率性能在低信噪比条件下与 MFMC 相当, 因此 SDF 和 JDF 的中断概率性能也优于 BAF。图 4 是 $SNR=3\text{dB}$, 中继节点 R 位置变化 (d_{sr} 在 0~1 间变化) 对 MFMC、IDF、SDF、JDF 的中断概率的影响。可见, R 在 S-D 的中间位置时, 每种传输模式的中断概率性能都是较优的。

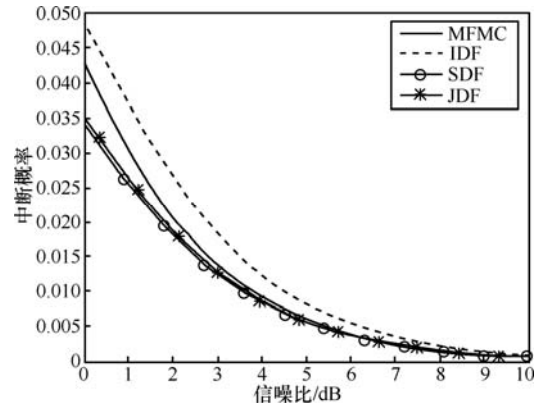


图 3 中断概率随信噪比变化曲线

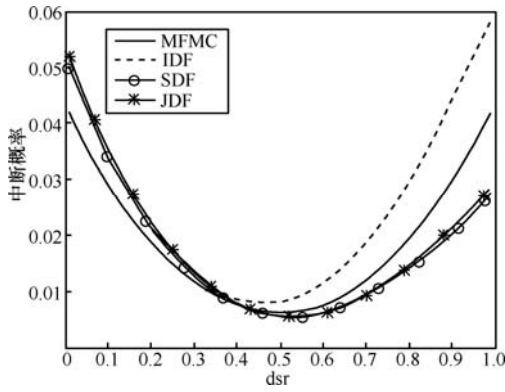


图 4 中断概率随 R 位置变化曲线

以三端协作为一个基本协作单元，随机生成 100 个单元。在每个单元中，S-D 的距离固定为 1，中继节点 R 的位置随机变化(即 S-R 的距离在 0~1 间均匀分布)。仿真得到的 MFMC、IDF、SDF、JDF 4 种模式下的平均吞吐量如图 5 所示。

综合上述仿真可以看出，在低信噪比条件下，JDF 无论是中断概率性能，还是吞吐量性能都是较优的。

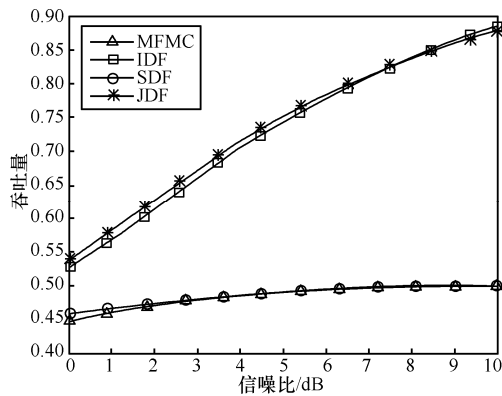


图 5 吞吐量随信噪比变化曲线

5 结束语

本文研究了中继节点和目的节点通过反馈向其他节点告知其接收是否正确(ACK、NACK)这一增强性手段对解码转发协作的性能改善情况。结合增量中继、选择中继的各自特点，提出了一种联合中继模式，分析了其中断概率和吞吐量表达式。数值仿真表明，这种新型的联合中继模式，无论是在中断概率方面还是在吞吐量方面均性能优越。

由于只考虑了 3 点协作模型，因此论文中的中断概率和吞吐量性能需要在多个节点、多条链路的模型下进一步验证。除此之外，论文的研究是建立在各节点发射功率相等，时分半双工 2 个阶段时间间隔等长的基础上的，结合节点实际位置的功率资源和时隙资

源的动态最优分配问题还需要进一步研究。

参考文献：

- [1] LANEMAN J N, WORNELL G W, TSE D N C. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [2] KHONMUJI M N, LARSSON E G. Cooperative transmission based on decode-and-forward relaying with partial repetition coding[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(4): 1-10.
- [3] IBRAHIM A S, SADEK A K, WEI F, et al. Cooperative communications with relay-selection: when to cooperate and whom to cooperate with[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(7): 2814-2827.
- [4] KHORMUJI M N, LARSSON E G. Finite-SNR analysis and optimization of decode-and-forward relaying over slow fading channels[J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2009, 58(8): 4292-4305.
- [5] STAUFFER E, OYMAN O, NARASIMHAN R, et al. Finite-SNR diversity-multiplexing tradeoffs in fading relay channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(2): 245-257.
- [6] AVESTIMEHR S A, TSE D N C. Outage capacity of the fading relay channel in the low SNR regime[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(4): 1401-1415.
- [7] ATIA G, SHARIF M, SALIGRAMA V. On optimal outage in relay channels with general fading distributions[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(10): 3786-3797.
- [8] RAJAWAT K, BANERJEE A. Selection Relaying at Low Signal to Noise Ratios[A]. Wireless Personal Multimedia Communications[C]. Jaipur, 2007.
- [9] RENK T, JAEKEL H, JONDRAL F K, et al. Outage capacity of incremental relaying at low signal-to-noise ratios[A]. IEEE 70th Vehicular Technology Conference[C]. Anchorage, Alaska, 2009.
- [10] CAIRE G, TARICCO G, BIGLIERI E. Optimum power control over fading channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1999, 45(5): 1468-1489.

作者简介：



朱义君 (1976-)，男，湖北黄冈人，信息工程大学博士生、副教授，主要研究方向为协作分集技术和 MIMO 中继技术。

李璘 (1978-)，女，辽宁沈阳人，信息工程大学博士生，主要研究方向为 MIMO 及其增强技术。

田忠骏 (1979-)，男，辽宁沈阳人，硕士，信息工程大学讲师，主要研究方向为空时通信信号处理。

陈晋央 (1987-)，男，河南洛阳人，信息工程大学硕士生，主要研究方向为通信中的现代信号处理。