

基于双向流的门限机会中继策略^①

胡同森, 张 茜, 田贤忠

(浙江工业大学 计算机科学与技术系, 杭州 310023)

摘 要: 对两节点在彼此覆盖范围内的双向传输流模型进行研究。用瞬时链路状态信息的机会中继策略, 选择出最佳中继节点, 然后根据门限值来判断是否需要最佳中继参与协作, 当两节点直连链路状态大于门限值时, 节点间直接交互信息, 无需中继节点的协助; 反之, 信源和最佳中继共同协作参与传输。相比直接传输模型, 本策略提高网络吞吐量的同时, 增大了系统的分集增益, 有效的提高了系统的抗衰落性能, 并在信噪比高时有效降低系统误码率。

关键字: 协作分集, 网络编码, 机会中继, 门限

Threshold-Opportunistic Relaying Strategy Based on Bi-Directional Flows Network

HU Tong-Sen, ZHANG Xi, TIAN Xian-Zhong

(Department of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: We research a bi-directional traffic flows network which two nodes are in each signal coverage area's in this article. Selecting optimum relaying using opportunistic relaying strategy based on instantaneous channel state information, then judging whether needs optimum relaying participates in the cooperation according to the threshold value. Don't need relay for transmission when the direct-transmission channel state is bigger than the threshold value; whereas sources and optimum relaying cooperate together. Comparing with direct transmission model, this strategy improves the network throughput, enhances the performance against fading, and reduces system symbol-error-rate effectively in high signal-to-noise ratio.

Keywords: cooperative diversity; network coding; opportunistic relaying; threshold

1 引言

协作分集技术^[1,2]通过搜集网络中的闲置天线作为中继协助转发信息, 以虚拟天线阵的形式克服无线信道衰落, 获得空间分集增益。在实际的通信中, 人们总是寻求中继合作伙伴来保证信源发送信号的质量, 但是忽略了中继节点的协作会占用网络的带宽, 它并不是无条件的。选择哪些中继节点参与协作, 以及中继节点何时参与协作是未来研究的重点。

Z. Lin 等人^[3]提出了一种基于位置信息的中继选择算法, 它要求系统有距离或位置估算装置; 而基于平均接收信噪比的选择算法^[4], 在实际应用中, 平均信噪比的估算开销很大; 文献^[5]提出了基于瞬时信道状况的中继选择方案, 充分考虑了无线信道的噪声和

衰落的影响, 该方法具有适用性, 但文中没有考虑直连链路和双向流的情况。Ahmed • S 等人^[6]首次提出了协作时机的问题, 并应用在单中继协作通信系统中, 不过它忽略了中继和信宿节点的链路状态信息, 之后作者在文献^[7]中对其做了改进, 在门限的选择时充分考虑了信源、中继、信宿之间的链路状态, 但没有考虑双向流模型, 没有引入中继节点的网络编码操作。

本文对多中继双向流信道模型进行研究, 基于瞬时链路状态信息提出了一种基于门限的中继选择策略, 同时在解码转发(Decode and forward, DF)协议的基础上引入网络编码的概念^[8-10]。首先通过机会中继策略从多个中继中选择一个最佳中继节点, 然后通过直达链路和中继转发链路状态的比较决定是否需要中继节

① 收稿时间:2010-10-13; 收到修改稿时间:2010-12-02

点参与协作,最后得出系统的误码率(Symbol-Error-Ratio, SER),求解系统的分集增益。

文章结构安排如下:本文第 2 节介绍双向流的系统模型。第 3 节给出最佳中继节点的选择和门限设定方式。第 4 节对直接传输模式和最佳中继节点的参与协作模式进行比较。第 5 节给出数值仿真结果。第 6 节进行全文总结。

2 系统模型

N 中继双向流模型如图 1 所示,图中信源节点 A, B 在彼此的覆盖范围内,所有中继节点都采用半双工通信模式,即不能同时发送和接收数据。基于分时复用的调度策略进行传输。

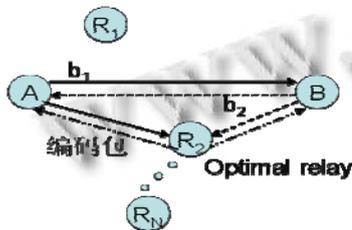


图 1 N 中继双向流模型

传统传输过程如下:第 1 时隙(实线),节点 A 广播发送信息 b_1 , 节点 B 和中继节点都收到该信息,同时中继节点对收到的信息进行译码操作;第 2 个时隙(均匀虚线),节点 B 广播发送信息 b_2 , 节点 A 和中继节点都收到该信息,同时中继节点对收到的信息进行译码操作;之后的 N 个时隙, N 个中继点分别编码之前正确译码的信息,然后分时轮流广播给 A、B 节点, A、B 正确接收后,根据自己已有信息从网络编码信息中解码出所需数据。此时节点 A、B 分别获得 N+1 阶的分集增益。

采用机会中继策略,从 N 个中继中选择信道状态最好的一个节点参与协作,系统的整个传输仅需 3 个时隙,远小于传统传输过程的 N+1 个时隙,有效的提高带宽利用率的同时可保证系统获得 N+1 阶的满分集增益。机会中继策略下,系统传输过程的前两个时隙与传统过程一样,不同的是第 3 个时隙(如图 1 中虚线所示),最佳中继节点对前两个时隙译码的信号进行编码,而后广播发送编码包给信源 A 和 B。在此基础上引入的门限的概念,由门限值来判定最佳中继节点

是否参与编码转发。具体操作可见第 3 节。

3 中继节点选择和门限设定

3.1 最佳中继

在图 1 的双向流模型中,系统由信源 A、信源 B 以及 N 个中继候选节点构成,中继节点各自监听来自信源 A 的 RTSA 分组和来自信源 B 的 RTSB 分组,中继节点 i 可分别获得信源 A 到中继节点 i、信源 B 到中继节点 i 的信道信息 $\beta_{A,R_i}, \beta_{R_i,B}$,用于下面最佳节点的计算选择上。

假设图 1 中网络是双向对称的,即瞬时信道增益 $\beta_{i,j} = \beta_{j,i}$ 。依据“信源 A-中继 R_i ”和“ R_i 中继-信源 B”的瞬时信道增益 $\beta_{A,R_i}, \beta_{R_i,B}$ 分别计算 N 个中继节点的调和平均值(如公式(1)所示),然后从中选择调和平均值最大的中继为最佳中继节点 R。此时系统模型就仅由信源 A、最佳中继 R 和信源 B 组成。

调和平均值函数为:

$$\beta_i = \mu_H(q_1\beta_{R_i,B}, q_2\beta_{A,R_i}) = \frac{2q_1q_2\beta_{A,R_i}\beta_{R_i,B}}{q_1\beta_{R_i,B} + q_2\beta_{A,R_i}} \quad (1)$$

其中 $i=1,2,\dots,N, q_1 = \frac{S^2}{r}, q_2 = \frac{T}{1-2r}, r = \frac{P_1}{P}$ 为功率比,在 MPSK 调制下,

$$S = \frac{1}{\pi} \int_0^{(M-1)\pi} \sin^2\theta d\theta = \frac{M-1}{2M} + \frac{\sin(2\pi/M)}{4\pi}$$

$$T = \frac{1}{\pi} \int_0^{(M-1)\pi} \sin^4\theta d\theta = \frac{3(M-1)}{8M} + \frac{\sin(2\pi/M)}{4\pi} - \frac{\sin(4\pi/M)}{32\pi}$$

通过公式(1)的计算各中继节点的调和平均值,然后选取最佳中继节点 R, 即 $\beta_{\max} = \max\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N\}$ 。

3.2 门限的设定

将 $\beta_{A,B}/\beta_{\max}$ 与门限值 α 进行比较(其中 $\beta_{A,B}$ 为信源 A 和 B 之间的即时信道增益),如果 $\beta_{A,B}/\beta_{\max} \geq \alpha$, 节点 A、B 间直接交换信息,无需最佳中继的协助,反之,信源和最佳中继共同协作参与传输,中继节点引入网络编码操作,当中继前两个时隙都译码正确时转发编码信息,否则不转发,共有以下三种传输情况。假设所有信道服从均值为 0, 方差为 1 的平坦瑞利分布, $h_{A,B}, h_{B,A}, h_{A,R}, h_{R,A}, h_{B,R}, h_{R,B}$ 分别代表相应链路的信道增益,且信道增益是慢衰落的,由于双向流网络是双向对称的,则 $h_{A,B} = h_{B,A}, h_{A,R} = h_{R,A}, h_{B,R} = h_{R,B}$ 。 η_A, η_B, η_R 等代表接收节点观测到均值为 0, 方差为 N_0

的加性高斯白噪声。

情况 1: 直传链路

第 1 时隙信源 A 发送信息给 B:

$y_B^s = \sqrt{P/2}h_{A,B}x_1 + \eta_B$, 其中 $h_{A,B}$ 为 AB 链路的信道增益, η_B 为 B 节点接收的高斯白噪声。

第 2 时隙信源 B 发送信息给 A:

$y_A^s = \sqrt{P/2}h_{B,A}x_2 + \eta_A$, 其中 P 为总的传输功率。由于网络是双向对称的, 故设信源 A 和 B 的发送功率相等, 皆为 $P/2$ 。

情况 2、3: 最佳中继转发编码信息、不转发编码信息

第 1 时隙信源 A 广播发送信息给 B、R:

$y_B^c = \sqrt{P_1}h_{A,B}x_1 + \eta_B, y_{A,R}^c = \sqrt{P_1}h_{A,R}x_1 + \eta_R$, 最佳中继译码接收信息为 \hat{x}_1 。

第 2 时隙信源 B 广播发送信息给 A、R:

$y_A^c = \sqrt{P_1}h_{B,A}x_2 + \eta_A, y_{B,R}^c = \sqrt{P_1}h_{B,R}x_2 + \eta'_R$, 最佳中继译码接收信息为 \hat{x}_2 。

第 3 时隙最佳中继 R 编码前两个时隙的译码信息 $x = \hat{x}_1 \oplus \hat{x}_2$, 并广播发送。信源 A 和 B 接收的编码信息为:

$$y_{R,A}^c = \sqrt{P_2}h_{R,A}x + \eta'_A, y_{R,B}^c = \sqrt{P_2}h_{R,B}x + \eta'_B$$

当最佳中继 \hat{x}_1, \hat{x}_2 都译码正确时 (情况 2, 转发编码信息), $\tilde{P}_2 = P_2$, 否则 $\tilde{P}_2 = 0$ (情况 3, 前两个时隙译码信息任何一个有错时, 不转发编码信息)。信源和最佳中继节点的发送功率分布满足 $2P_1 + P_2 = P$ 。

4 性能比较

M-PSK 调制方式下的误码率

$$\Pr(e) = \Pr(e/\phi) \cdot \Pr(\phi) + \Pr(e/\phi^c) \cdot \Pr(\phi^c) \quad (2)$$

其中, $\Pr(e/\phi) \cdot \Pr(\phi)$ 为直接传输模式下的误码率, $\Pr(e/\phi^c) \cdot \Pr(\phi^c)$ 为最佳中继节点参与协作模式下的误码率。

信源 A、B 直接交互传输时, 信噪比 SNR 可表示为 $\gamma^\phi = P\beta_{A,B}/2N_0 = P\beta_{B,A}/2N_0$, 引用文献[11]中的条件概率公式有:

$$\begin{aligned} \Pr(e/\phi^c, \beta_{A,B}) &= \Pr(e/\phi^c, \beta_{B,A}) \\ &= \psi(\gamma^\phi) = \frac{1}{\pi} \int_0^{(M-1)\pi} \exp\left(-\frac{b\gamma^\phi}{\sin^2 \theta}\right) d\theta \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $b = \sin^2(\pi/M)$, 由此可得直传传输模式下的误码率:

$$\begin{aligned} &\Pr(e/\phi) \cdot \Pr(\phi) \\ &= \Pr(e/\phi^c, \beta_{A,B}) \Pr(\phi) + \Pr(e/\phi^c, \beta_{B,A}) \Pr(\phi) \\ &= 2\Pr(e/\phi^c, \beta_{A,B}) \Pr(\phi) \\ &\approx 2 \sum_{n=0}^N \binom{N}{n} (-1)^n \times F_1\left(1 + \frac{t\delta_{A,B}^2 n}{2\alpha} + \frac{bP}{2N_0 \sin^2 \theta} \delta_{A,B}^2\right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{其中, } F_1(x(\theta)) = \frac{1}{\pi} \int_0^{(M-1)\pi} \frac{1}{x(\theta)} d\theta, t = 1/q_2 \delta_{A,R}^2 + 1/q_1 \delta_{R,B}^2.$$

在最佳中继节点参与协作的模式下, 目的节点分别接收到直传链路和中继节点的编码信息, 采用最大比合并方式得到目的节点的信噪比, 然后解码获得原信息。则最终节点 A、B 得到的信噪比分别为:

$$\gamma_A^{\phi^c} = (P_1 \beta_{B,A} + \tilde{P}_2 \beta_{R,A})/N_0, \gamma_B^{\phi^c} = (P_1 \beta_{A,B} + \tilde{P}_2 \beta_{R,B})/N_0.$$

只有前两个时隙两信源各自发送的信息被中继正确译码后, 中继节点才编码译码后信息并广播发送, 否则不进行编码转发。则中继编码转发信息的概率为:

$$\begin{aligned} \Pr(rc) &= (1 - \psi\left(\frac{P_1 \beta_{A,R}}{N_0}\right))(1 - \psi\left(\frac{P_1 \beta_{B,R}}{N_0}\right)) \\ &= 1 - \psi\left(\frac{P_1 \beta_{A,R}}{N_0}\right) - \psi\left(\frac{P_1 \beta_{B,R}}{N_0}\right) + \psi\left(\frac{P_1 \beta_{A,R}}{N_0}\right) \psi\left(\frac{P_1 \beta_{B,R}}{N_0}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

综合上述信息可知最佳中继节点参与协作的模式的条件误码率为:

$$\begin{aligned} &\Pr(e/\phi^c) \\ &= \Pr(e/\phi^c, \beta_{A,B}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) + \Pr(e/\phi^c, \beta_{B,A}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) \\ &= \psi(\gamma_B^{\phi^c})|_{\tilde{P}_2=0} (1 - \Pr(rc)) + \psi(\gamma_B^{\phi^c})|_{\tilde{P}_2=P_2} \Pr(rc) \\ &\quad + \psi(\gamma_A^{\phi^c})|_{\tilde{P}_2=0} (1 - \Pr(rc)) + \psi(\gamma_A^{\phi^c})|_{\tilde{P}_2=P_2} \Pr(rc) \end{aligned} \quad (6)$$

公式(5)代入(6)可得,

$$\begin{aligned} &\Pr(e/\phi^c) \\ &= \Pr(e/\phi^c, \beta_{A,B}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) + \Pr(e/\phi^c, \beta_{B,A}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) \\ &= \psi(\gamma_B^{\phi^c})|_{\tilde{P}_2=0} \left[\psi\left(\frac{P_1 \beta_{A,R}}{N_0}\right) + \psi\left(\frac{P_1 \beta_{B,R}}{N_0}\right) - \psi\left(\frac{P_1 \beta_{A,R}}{N_0}\right) \psi\left(\frac{P_1 \beta_{B,R}}{N_0}\right) \right] \\ &\quad + \psi(\gamma_B^{\phi^c})|_{\tilde{P}_2=P_2} \left[1 - \psi\left(\frac{P_1 \beta_{A,R}}{N_0}\right) - \psi\left(\frac{P_1 \beta_{B,R}}{N_0}\right) + \psi\left(\frac{P_1 \beta_{A,R}}{N_0}\right) \psi\left(\frac{P_1 \beta_{B,R}}{N_0}\right) \right] \\ &\quad + \psi(\gamma_A^{\phi^c})|_{\tilde{P}_2=0} \left[\psi\left(\frac{P_1 \beta_{A,R}}{N_0}\right) + \psi\left(\frac{P_1 \beta_{B,R}}{N_0}\right) - \psi\left(\frac{P_1 \beta_{A,R}}{N_0}\right) \psi\left(\frac{P_1 \beta_{B,R}}{N_0}\right) \right] \\ &\quad + \psi(\gamma_A^{\phi^c})|_{\tilde{P}_2=P_2} \left[1 - \psi\left(\frac{P_1 \beta_{A,R}}{N_0}\right) - \psi\left(\frac{P_1 \beta_{B,R}}{N_0}\right) + \psi\left(\frac{P_1 \beta_{A,R}}{N_0}\right) \psi\left(\frac{P_1 \beta_{B,R}}{N_0}\right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{设 } \Pr(X_{B_1} / \phi^c, \beta_{A,B}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) = \psi(\gamma_B^{\phi^c}) \psi\left(\frac{P_1 \beta_{A,R}}{N_0}\right) \psi\left(\frac{P_1 \beta_{B,R}}{N_0}\right),$$

$$\Pr(X_{B_2} / \phi^c, \beta_{A,B}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) = \psi(\gamma_B^{\phi^c}) \psi\left(\frac{P_1 \beta_{A,R}}{N_0}\right),$$

$$\Pr(X_{B_3} / \phi^c, \beta_{A,B}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) = \psi(\gamma_B^{\phi^c}) \psi\left(\frac{P_1 \beta_{B,R}}{N_0}\right),$$

$$\begin{aligned} \Pr(Y_B/\phi^c, \beta_{A,B}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) &= \psi(\gamma_B^{\phi^c}), \\ \Pr(X_{A_1}/\phi^c, \beta_{B,A}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) &= \psi(\gamma_A^{\phi^c}) \psi\left(\frac{P_1\beta_{A,R}}{N_0}\right) \psi\left(\frac{P_1\beta_{B,R}}{N_0}\right), \\ \Pr(X_{A_2}/\phi^c, \beta_{B,A}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) &= \psi(\gamma_A^{\phi^c}) \psi\left(\frac{P_1\beta_{A,R}}{N_0}\right), \\ \Pr(X_{A_2}/\phi^c, \beta_{B,A}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) &= \psi(\gamma_A^{\phi^c}) \psi\left(\frac{P_1\beta_{B,R}}{N_0}\right), \\ \Pr(Y_A/\phi^c, \beta_{B,A}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) &= \psi(\gamma_A^{\phi^c}). \end{aligned}$$

则

$$\begin{aligned} &\Pr(X_{B_1}/\phi^c, \beta_{A,B}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) \Pr(\phi^c) \\ &= \int_{\tilde{\beta}} \frac{1}{\pi^3} \int_{\theta_1}^{(M-1)\pi} \int_{\theta_2}^{(M-1)\pi} \int_{\theta_3}^{(M-1)\pi} \frac{1 - \exp(-PC(\theta) + \frac{1}{\delta_{A,B}^2}) \alpha \beta_{\max}}{1 + P_1C(\theta) \delta_{A,B}^2} p_{\tilde{\beta}}(\tilde{\beta}) \\ &\quad \cdot \exp(-(\tilde{P}_2C(\theta) \beta_{R,B} + P_1C(\theta_2) \beta_{A,R} + P_1C(\theta_3) \beta_{B,R})) d\theta_3 d\theta_2 d\theta_1 d\tilde{\beta} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $\tilde{\beta} = [\beta_{A,R}, \beta_{R,B}]$, $C(\theta) = \frac{b}{N_0 \sin^2 \theta}$.

用 β_{\max} 的相关函数代替 $\beta_{A,R}, \beta_{R,B}$ [11], 将公式(8)转化为:

$$\begin{aligned} &\Pr(X_{B_1}/\phi^c, \beta_{A,B}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) \Pr(\phi^c) \\ &\leq \frac{1}{\pi^3} \int_{\theta_1}^{(M-1)\pi} \int_{\theta_2}^{(M-1)\pi} \int_{\theta_3}^{(M-1)\pi} \frac{d\theta_1}{1 + P_1C(\theta_1) \delta_{A,B}^2} \int_{\theta_2}^{(M-1)\pi} \int_{\theta_3}^{(M-1)\pi} \left[M_{\beta_{\max}} \left(\frac{\tilde{P}_2C(\theta)}{2q_1} + \frac{P_1C(\theta_2)}{2q_2} + \frac{P_1C(\theta_3)}{2q_1} \right) - \right. \\ &\quad \left. M_{\beta_{\max}} \left((P_1C(\theta) + \frac{1}{\delta_{A,B}^2}) \alpha + \frac{\tilde{P}_2C(\theta)}{2q_1} + \frac{P_1C(\theta_2)}{2q_2} + \frac{P_1C(\theta_3)}{2q_1} \right) \right] d\theta_3 d\theta_2 \end{aligned} \quad (9)$$

公式(9)中 $M_{\beta_{\max}}(\cdot)$ 为 β_{\max} 的矩母函数, 且其表达式为:

$$M_{\beta_{\max}}(\gamma) \approx N \sum_{n=0}^{N-1} \binom{N-1}{n} (-1)^n M_{\beta_{\max}}(\gamma + \frac{nt}{2}).$$

同理可得:

$$\begin{aligned} &\Pr(X_{B_2}/\phi^c, \beta_{A,B}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) \Pr(\phi^c) \\ &\leq \frac{1}{\pi^2} \int_{\theta_1}^{(M-1)\pi} \frac{d\theta_1}{1 + P_1C(\theta_1) \delta_{A,B}^2} \int_{\theta_2}^{(M-1)\pi} \left[M_{\beta_{\max}} \left(\frac{P_2C(\theta_1)}{2q_1} + \frac{P_1C(\theta_2)}{2q_2} \right) - \right. \\ &\quad \left. M_{\beta_{\max}} \left((P_1C(\theta_1) + \frac{1}{\delta_{A,B}^2}) \alpha + \frac{P_2C(\theta_1)}{2q_1} + \frac{P_1C(\theta_2)}{2q_2} \right) \right] d\theta_2 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} &\Pr(X_{B_3}/\phi^c, \beta_{A,B}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) \Pr(\phi^c) \\ &\leq \frac{1}{\pi^2} \int_{\theta_1}^{(M-1)\pi} \frac{d\theta_1}{1 + P_1C(\theta_1) \delta_{A,B}^2} \int_{\theta_2}^{(M-1)\pi} \left[M_{\beta_{\max}} \left(\frac{P_2C(\theta_1)}{2q_1} + \frac{P_1C(\theta_2)}{2q_1} \right) - \right. \\ &\quad \left. M_{\beta_{\max}} \left((P_1C(\theta_1) + \frac{1}{\delta_{A,B}^2}) \alpha + \frac{P_2C(\theta_1)}{2q_1} + \frac{P_1C(\theta_2)}{2q_1} \right) \right] d\theta_2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} &\Pr(Y_B/\phi^c, \beta_{A,B}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) \\ &\leq \frac{1}{\pi} \int_{\theta}^{(M-1)\pi} \frac{M_{\beta_{\max}} \left(\frac{P_2C(\theta)}{2q_1} \right)}{1 + P_1C(\theta) \delta_{A,B}^2} - \frac{M_{\beta_{\max}} \left((P_1C(\theta) + \frac{1}{\delta_{A,B}^2}) \alpha + \frac{P_2C(\theta)}{2q_1} \right)}{1 + P_1C(\theta) \delta_{A,B}^2} d\theta \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} &\Pr(X_{A_1}/\phi^c, \beta_{B,A}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) \\ &\leq \frac{1}{\pi^3} \int_{\theta_1}^{(M-1)\pi} \int_{\theta_2}^{(M-1)\pi} \int_{\theta_3}^{(M-1)\pi} \frac{d\theta_1}{1 + P_1C(\theta_1) \delta_{B,A}^2} \int_{\theta_2}^{(M-1)\pi} \left[M_{\beta_{\max}} \left(\frac{P_2C(\theta_1)}{2q_2} + \frac{P_1C(\theta_2)}{2q_1} \right) - \right. \\ &\quad \left. M_{\beta_{\max}} \left((P_1C(\theta_1) + \frac{1}{\delta_{B,A}^2}) \alpha + \frac{P_2C(\theta_1)}{2q_2} + \frac{P_1C(\theta_2)}{2q_1} + \frac{P_1C(\theta_3)}{2q_1} \right) \right] d\theta_3 d\theta_2 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} &\Pr(X_{A_2}/\phi^c, \beta_{B,A}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) \Pr(\phi^c) \\ &\leq \frac{1}{\pi^2} \int_{\theta_1}^{(M-1)\pi} \frac{d\theta_1}{1 + P_1C(\theta_1) \delta_{B,A}^2} \int_{\theta_2}^{(M-1)\pi} \left[M_{\beta_{\max}} \left(\frac{P_2C(\theta_1)}{2q_2} + \frac{P_1C(\theta_2)}{2q_2} \right) - \right. \\ &\quad \left. M_{\beta_{\max}} \left((P_1C(\theta_1) + \frac{1}{\delta_{B,A}^2}) \alpha + \frac{P_2C(\theta_1)}{2q_2} + \frac{P_1C(\theta_2)}{2q_2} \right) \right] d\theta_2 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} &\Pr(X_{A_3}/\phi^c, \beta_{B,A}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) \Pr(\phi^c) \\ &\leq \frac{1}{\pi^2} \int_{\theta_1}^{(M-1)\pi} \frac{d\theta_1}{1 + P_1C(\theta_1) \delta_{B,A}^2} \int_{\theta_2}^{(M-1)\pi} \left[M_{\beta_{\max}} \left(\frac{P_2C(\theta_1)}{2q_2} + \frac{P_1C(\theta_2)}{2q_1} \right) - \right. \\ &\quad \left. M_{\beta_{\max}} \left((P_1C(\theta_1) + \frac{1}{\delta_{B,A}^2}) \alpha + \frac{P_2C(\theta_1)}{2q_2} + \frac{P_1C(\theta_2)}{2q_1} \right) \right] d\theta_2 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} &\Pr(Y_A/\phi^c, \beta_{B,A}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) \\ &\leq \frac{1}{\pi} \int_{\theta}^{(M-1)\pi} \frac{M_{\beta_{\max}} \left(\frac{P_2C(\theta)}{2q_1} \right)}{1 + P_1C(\theta) \delta_{B,A}^2} - \frac{M_{\beta_{\max}} \left(P_1C(\theta) + \frac{1}{\delta_{B,A}^2} \right) \alpha + \frac{P_2C(\theta)}{2q_1}}{1 + P_1C(\theta) \delta_{B,A}^2} d\theta \end{aligned} \quad (16)$$

通过上述转化可得最佳中继节点参与协作模式的误码率为:

$$\begin{aligned} &\Pr(e/\phi^c) \Pr(\phi^c) \\ &= \Pr(X_{B_1}/\phi^c, \beta_{A,B}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) \Pr(\phi^c) |_{P_2=0} \\ &\quad + \Pr(X_{B_2}/\phi^c, \beta_{A,B}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) \Pr(\phi^c) |_{P_2=0} \\ &\quad + \Pr(X_{B_3}/\phi^c, \beta_{A,B}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) \Pr(\phi^c) |_{P_2=0} \\ &\quad - \Pr(X_{B_1}/\phi^c, \beta_{A,B}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) \Pr(\phi^c) |_{P_2=P_2} \\ &\quad - \Pr(X_{B_2}/\phi^c, \beta_{A,B}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) \Pr(\phi^c) |_{P_2=P_2} \\ &\quad - \Pr(X_{B_3}/\phi^c, \beta_{A,B}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) \Pr(\phi^c) |_{P_2=P_2} \\ &\quad + \Pr(Y_B/\phi^c, \beta_{A,B}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) \Pr(\phi^c) |_{P_2=P_2} \\ &\quad + \Pr(X_{A_1}/\phi^c, \beta_{B,A}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) \Pr(\phi^c) |_{P_2=0} \\ &\quad + \Pr(X_{A_2}/\phi^c, \beta_{B,A}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) \Pr(\phi^c) |_{P_2=0} \\ &\quad + \Pr(X_{A_3}/\phi^c, \beta_{B,A}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R}) \Pr(\phi^c) |_{P_2=0} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\Pr(X_{A_1}/\phi^c, \beta_{B,A}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R})\Pr(\phi^c)|_{P_2=P_2} \\
 & -\Pr(X_{A_2}/\phi^c, \beta_{B,A}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R})\Pr(\phi^c)|_{P_2=P_2} \\
 & -\Pr(X_{A_3}/\phi^c, \beta_{B,A}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R})\Pr(\phi^c)|_{P_2=P_2} \\
 & +\Pr(Y_A/\phi^c, \beta_{B,A}, \beta_{A,R}, \beta_{B,R})\Pr(\phi^c)|_{P_2=P_2}
 \end{aligned} \tag{17}$$

将公式(8)到(16),

$P_1=rP, P_2=(1-2r)P, t=1/q_2\delta_{A,R}^2+1/q_1\delta_{R,B}^2$ 代入公式(17), 整理得:

$$\Pr(e/\phi^c)\Pr(\phi^c)\leq(CG\cdot\gamma)^{-(N+1)} \tag{18}$$

其中, 信噪比 $\gamma=P/N_0$, CG 表示编码增益。最佳中继节点参与协作时信宿节点获得的满分集增益 $N+1$, 而直接传输模式的分集度为 1。

$$\begin{aligned}
 CG = & \left[\frac{N! \left(\frac{1-2r}{T\delta_{A,R}^2} + \frac{r}{S^2\delta_{R,B}^2} \right)^{N-1}}{b^{N+1}\delta_{A,B}^2} \right. \\
 & \left. \frac{\left(\frac{1-2r}{T\delta_{A,R}^2} + \frac{r}{S^2\delta_{R,B}^2} \right) \cdot I(2N+2)}{(2\alpha)^N} + \right. \\
 & \left. \frac{\left(\frac{S^2\delta_{R,B}^2}{r} + \frac{T\delta_{A,R}^2}{1-2r} \right) \cdot \frac{S^{2N}I(2N+2)+T^N S \cdot I(2N)}{r^{N+1}(1-r)^N} \right] \\
 & + \left[\frac{N! \left(\frac{1-2r}{T\delta_{B,R}^2} + \frac{r}{S^2\delta_{R,A}^2} \right)^{N-1}}{b^{N+1}\delta_{B,A}^2} \right. \\
 & \left. \frac{\left(\frac{1-2r}{T\delta_{B,R}^2} + \frac{r}{S^2\delta_{R,A}^2} \right) \cdot I(2N+2)}{(2\alpha)^N} + \right. \\
 & \left. \frac{\left(\frac{S^2\delta_{R,A}^2}{r} + \frac{T\delta_{B,R}^2}{1-2r} \right) \cdot \frac{S^{2N}I(2N+2)+T^N S \cdot I(2N)}{(2r)^{N+1}(1-2r)^N} \right]^{1/(N+1)} \tag{19}
 \end{aligned}$$

5 数值仿真

由直接传输模式误码率公式(4)和最佳中继节点参与协作模式误码率公式(18)可知误码率是信噪比 $\gamma=P/N_0$ 所构成的函数, 其次还与发射功率比 r 、门限、即时链路状态有关。假设信源采用 QPSK 调制方式处理信号, 信宿节点接收到的高斯白噪声方差 $N_0=1$, 即

时链路状态信息 $\delta_{A,B}^2=\delta_{B,A}^2=\delta_{A,R}^2=\delta_{R,A}^2=\delta_{B,R}^2=\delta_{R,B}^2=1$ 。

在中继节点和信噪比一定时, 误码率是由发射功率比 r 、门限 α 构成的函数, 此时可寻找使得误码率最小的门限值和发送功率比 α 的最佳组合。图 2 给出信噪比 $\gamma=40db$ 、单中继情况下误码率随门限值、发送功率比的分布图, 此时使得误码率最小的最佳门限值为 3, 最优发送功率比 0.35。

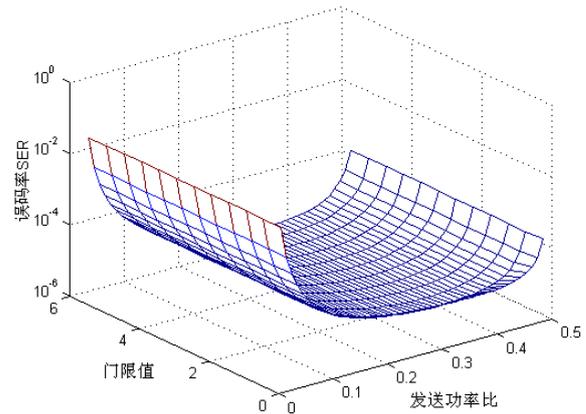


图 2 单中继 40db 下误码率随门限值、发送功率比的分布图

以下在 $r=0.35, \alpha=3$ 时, 以中继节点和信噪比为变量, 对直接传输和最佳中继参与协作模式的误码率进行比较。

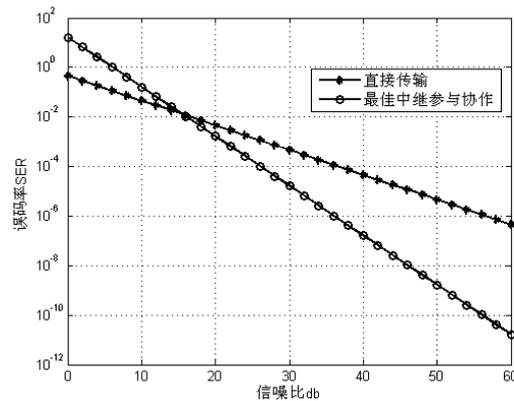


图 3 单个中继节点时的误码率随信噪比变化曲线

图 3 给出了单个中继节点时的误码率随信噪比变化的对比图, 从图中上可以看出, 在高信噪比条件下, 中继节点参与协作时的误码率比直接传输低很多。最佳中继参与协作模式下增大了系统的分集增益, 提高

系统的抗衰落性能（系统获得全分集增益，而直接传输模式的分集增益为1），同时中继节点的网络编码操作提高了系统的吞吐量。

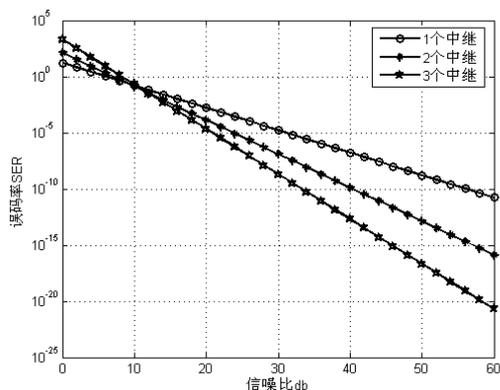


图4 多中继节点下误码率比较

图4显示了1个、2个、3个中继节点时的误码率，各情况最佳中继节点协作模式下均能获得满分集增益，在高信噪比条件下随着中继节点个数的增加误码率越低，系统性能越好。

6 总结

本文在多中继双向流信道模型中引入了网络编码和基于门限的中继选择策略，首先通过机会中继策略从多个中继中选择一个最佳中继节点，然后通过直达链路和中继转发链路状态的比较决定是否需要中继节点参与协作，在最佳中继参与协作的时候，中继节点对来自两信源 A、B 的信息进行网络编码后转发，大大提高了系统的吞吐量，同时使系统获得 N+1 阶的满分集增益，提高系统的抗衰落性能，同时在高信噪比条件下，采用最佳中继协作模式，信息节点使用最大信噪比合并收到 2 份的信息，可提取获得高质量的信息，有效降低了系统误码率。

参考文献

1 Laneman JN, Tse DNC, Wornell GW. Cooperative diversity in

wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. IEEE Trans. Information Theory, 2004: 3062–3080.

2 Laneman JN, Wornell GW. Distributed space-time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks. IEEE Trans. Information Theory, 2003: 2415–2425.

3 Zorzi M, Rao RR. Geographic random forwarding for ad hoc and sensor networks multi-hop performance. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2003.

4 Lin Z, Erkip E. Relay search algorithms for coded cooperative system. Proc of IEEE Globecom, 2005.

5 Bletsas A, Khisti A, Reed DP, Lippman A. A simple cooperative diversity method based on network path selection. IEEE Journal on Selected Areas of Communication (JSAC), Special Issue on 4G Wireless Systems, 2006: 659–672.

6 Siriwongpairat PW, Himsoon T. Optimum Threshold-Selection Relaying for Decode-and-Forward Cooperation Protocol. Proc of WCNC, 2006.

7 Ibrahim AS, Sadek AK. Relay selection in multinode cooperative communications: when to cooperate and whom to cooperate with. Proc. of IEEE Globecom, 2006.

8 Chen Y, Kishore S, Li J. Wireless diversity through network coding. Proc. Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2006), 2006:1681–1686.

9 Zhang S, Liew S, Lam P. Physical layer network coding. Proc. 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom 2006), 2006.

10 Popovski PandYomo H. The anti-packets can increase the achievable throughput of a wireless multi-hop network. Proc. IEEE International Conference on Communication (ICC 2006), 2006.

11 Simon MK, Alouini MS. A unified approach to the performance analysis of digital communication over generalized fading channels. Proc. IEEE, 1998:1860–1877.