

不对称双向中继信道中的再生双向中继选择及功率分配

吉晓东^{*①②} 郑宝玉^① 崔景伍^①

^①(南京邮电大学信号处理与传输研究院 南京 210003)

^②(南通大学电子信息学院 南通 226019)

摘要: 该文研究不对称双向中继信道下的被动式再生中继选择问题。首先, 通过理论分析给出了传统3节点网络的可达速率域。然后, 在瑞利衰落信道环境下, 理论推导了系统中断概率的闭合表达式。接着, 利用系统业务知识和信道状态信息, 提出一种改进型的最大最小中继选择准则。进一步, 研究中继端叠加信号的功率分配, 提出了两种功率分配因子选择算法, 并对所提算法进行了理论分析。仿真结果表明: 通过被动式再生中继选择和功率分配可以显著提高系统的中断性能, 在信道不对称情况下性能优势明显。

关键词: 无线通信; 双向中继; 解码转发; 中继选择; 不对称信道

中图分类号: TN925

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)07-1707-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01313

Opportunistic Relaying and Power Allocation for Bidirectional Regenerative Relaying in Asymmetric Two-way Relay Channels

Ji Xiao-dong^{①②} Zheng Bao-yu^① Cui Jing-wu^①

^①(Institute of Signal Processing and Transmission, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

^②(School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: The problem of reactive relay selection for two-way decode-and-forward relaying is investigated. First, the achievable rate region of conventional three-node scenario is characterized. Then, a closed-form expression of the outage probability is derived. Next, by using the channel state information and with the aid of traffic knowledge, a reactive relay selection criterion is proposed. Further, optimal power allocation between superposed signals at the relay is investigated. As a result, two novel policies selecting the optimal scaling coefficients are presented and analyzed in terms of outage probability. Simulation results demonstrate that the system outage performance is improved significantly, especially when the channels are asymmetric.

Key words: Wireless communication; Two-way relaying; Decode-and-Forward; Relay selection; Asymmetric channel

1 引言

协作中继(cooperative relaying)技术在提高无线通信系统有效性、可靠性方面已显示出强大的威力。然而, 由于实际中继通信系统的半双工限制, 使得传统的单向协作中继(one-way relaying)在提高无线通信性能的同时也带来了频谱效率的损失。为此, Rankov等人^[1]针对经典的3节点网络, 基于放大转发(Amplify-and-Forward, AF)和解码转发

(Decode-and-Forward, DF)协议提出一种称之为双向中继(two-way/bidirectional relaying)的协作中继机制。当前, 对于DF系统的双向中继选择, 一般是基于Bletsas等人^[2]提出的max-min和max-sum准则。Krikidis等人^[3]从分集(diversity)的角度, 研究基于max-min和max-sum准则的DF双向中继选择, 并提出一种混合机会中继策略, 即根据具体情况智能地在两者之间切换。Oechtering等人^[4]针对采用叠加编码(Superposition Coding, SC)的DF双向中继系统(DF-SC), 从可达速率域的角度, 提出了一种基于可达速率域加权和速率的中继选择策略。然而, 上述的研究均是考虑主动式(proactive)选择^[5,6], 并且系统业务特性并未涉及。实际上, 对于DF系统, 当网络中的某个中继节点不能够正确解码源节点信息

2012-10-12 收到, 2013-02-18 改回

国家自然科学基金(61071086, 61071093, 61271240), 江苏自然科学基金重点(BK2010077), 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(2011D05)和江苏省高校自然科学研究项目(11KJB510018, 12KJB510024)资助课题

*通信作者: 吉晓东 xiaodong.ji@ieee.org

时,该中继节点就应不再参加中继选择。因此,对于DF系统而言,采用被动式(reactive)选择^[5]更加合适。另一方面,在实际通信系统中,由于用户业务类型的不同,节点的目标速率也不尽相同。最近,文献[7]针对AF双向中继系统,研究系统业务的不对称性对系统中断性能的影响,并提出一种不对称AF双向中继选择算法。与此同时,文献[7]针对采用叠加编码的DF双向中继系统(DF-SC),对系统业务不对称情况下的中继端发射功率分配进行了初步研究。然而,对于DF双向中继系统,研究业务不对称情况下的再生中继选择还未见报导。为此,我们考虑一般化的双向中继模型,包括不对称业务,不对称链路特性,并且从双向传输的角度,研究根据系统业务知识来实现DF系统的被动式再生中继选择,最终达到任意业务类型和链路特性下的系统中断性能优化。

2 系统模型及中断性能分析

图1给出了系统模型。图中A和B为源节点,R为中继节点; m_i 和 s_i 分别表示节点*i*在第1时隙发送的二进制信息和编码调制信号,其中 $i \in \{A, B\}$; s_R 表示中继R在第2时隙的广播信号; h_{ij} 为节点*i*到节点*j*的信道增益,其中 $i, j \in \{A, B, R\}$ 且 $i \neq j$ 。本文中,用 $r_i, i \in \{A, B\}$,来表示节点*i*的信息发送速率; P_i 和 w_i 分别表示节点*i*的平均发送功率和节点*i*处的高斯白噪声,其中 $i \in \{A, B, R\}$ 。除此之外,本文还作了如下假设:(1)瑞利信道特性 $h_{AR} \sim \mathcal{CN}(0, g_1), h_{BR} \sim \mathcal{CN}(0, g_2)$,其中 $g_1 = 1/\lambda_1, g_2 = 1/\lambda_2$;(2) h_{AR} 和 h_{BR} 统计独立;(3) w_A, w_B 和 w_R 服从独立正态分布,均值为0,方差为1;(4)节点的平均发射功率均为 P 。

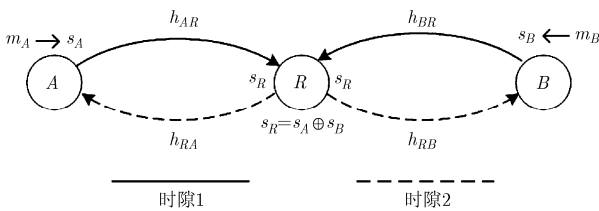


图1 系统模型

首先,第1个时隙源节点A和B将各自的二进制信息 m_A 和 m_B ,通过编码调制为发送信号 s_A 和 s_B ,并同时向中继R进行发送。在第1时隙末,中继R接收的两路合并信号为

$$y_R = \sqrt{P}h_{AR}s_A + \sqrt{P}h_{BR}s_B + w_R \quad (1)$$

此时,中继R将对接收信号 y_R 进行联合解码,即解码源节点发送的二进制信息 m_A 和 m_B 。由于第1时

隙两个源节点同时向中继发送消息,因此可以将该信道看作是多址接入信道(MAC)^[6]。因而,中继R能够正确解码A和B发送信息的条件是 $[r_A, r_B] \in \mathcal{R}_{MAC}$,其中 \mathcal{R}_{MAC} 为第1时隙MAC信道的可达速率域^[8],如式(2)所示。

$$\mathcal{R}_{MAC} = \left\{ [v_A, v_B] \in \mathbb{R}_+^2 : v_A \leq \mathcal{V}_{AR}, v_B \leq \mathcal{V}_{BR}, v_A + v_B \leq \mathcal{V}_2 \right\} \quad (2)$$

式(2)中 $[v_A, v_B]$ 表示源节点A和B的目标速率; \mathcal{V}_{AR} , \mathcal{V}_{BR} 和 \mathcal{V}_2 分别为链路 $A \rightarrow R, B \rightarrow R$ 与系统的容量限^[8],分别由式(3),式(4)和式(5)给出。

$$\mathcal{V}_{AR} = \frac{1}{2} \log_2 (1 + P|h_{AR}|^2) \quad (3)$$

$$\mathcal{V}_{BR} = \frac{1}{2} \log_2 (1 + P|h_{BR}|^2) \quad (4)$$

$$\mathcal{V}_2 = \frac{1}{2} \log_2 (1 + P|h_{AR}|^2 + P|h_{BR}|^2) \quad (5)$$

当条件 $[r_A, r_B] \in \mathcal{R}_{MAC}$ 满足,中继R将解码信息进行编码调制,并进行叠加编码后得第2时隙的广播信号 $s_R = \sqrt{\alpha}s_A + \sqrt{\beta}s_B$,这里 α 和 β 是功率分配因子($0 < \alpha, \beta < 1, \alpha + \beta = 1$)。在第2个时隙,中继R将 s_R 广播给源节点A和B。由于节点A和B已知各自的发送信号和信道状态信息(CSI),它们可以通过干扰自消除将自己的信号项去除得最终接收信号。这样A和B的接收信噪比(SNR)可分别表示为 $\text{SNR}_A = \beta P|h_{AR}|^2, \text{SNR}_B = \alpha P|h_{BR}|^2$ 。最后,源节点A和B分别对接收信号进行解码得到对方发送的信息。

对于第2个时隙,由于中继同时向源节点A和B发送信息,因此可以将信道看做是广播信道(BRC)^[6]。因而,第2时隙末,源节点A和B能够正确解码中继R广播信号的条件是 $[r_A, r_B] \in \mathcal{R}_{BRC}$,其中 \mathcal{R}_{BRC} 为第2时隙BRC(Broadcast)信道的可达速率域^[6],如式(6)所示。

$$\mathcal{R}_{BRC} = \left\{ [v_A, v_B] \in \mathbb{R}_+^2 : v_A \leq \mathcal{V}_{RA}, v_B \leq \mathcal{V}_{RB} \right\} \quad (6)$$

式(6)中, \mathcal{V}_{RA} 和 \mathcal{V}_{RB} 分别为链路 $R \rightarrow A$ 和 $R \rightarrow B$ 的容量限^[8],具体由式(7)和式(8)给出。

$$\mathcal{V}_{RA} = \frac{1}{2} \log_2 (1 + \beta P|h_{AR}|^2) \quad (7)$$

$$\mathcal{V}_{RB} = \frac{1}{2} \log_2 (1 + \alpha P|h_{BR}|^2) \quad (8)$$

由以上的讨论可知,源节点能够成功完成一次信息交互的条件是 $[r_A, r_B] \in \mathcal{R}_{DF}$,其中 $\mathcal{R}_{DF} = \{\mathcal{R}_{MAC} \cap \mathcal{R}_{BRC}\}$ 为整个系统的可达速率域。因此,单中继系统的中断概率可表达为

$$p_{\text{out}}^{\text{DF-SC}} = \mathbb{P}([r_A, r_B] \notin \mathcal{R}_{DF-SC}) \quad (9)$$

进一步通过理论推导可得系统中断概率,具体由式(10)给出。

$$P_{\text{out}}^{\text{DF-SC}} = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\lambda_1 \frac{z_B}{\beta P} - \lambda_2 \frac{z_B}{P}\right), & \text{for Event 1} \\ 1 - \exp\left\{-\lambda_1 \frac{z_B}{\beta P} - \lambda_2 \frac{z_A}{\alpha P}\right\}, & \text{for Event 2} \\ 1 - f_3\left(\frac{z_B}{\beta P}, \frac{z_B}{P}, \frac{z_{AB}}{\beta P}\right), & \text{for Event 3} \\ 1 - f_3\left(\frac{z_B}{\beta P}, \frac{z_A}{\alpha P}, \frac{z_{AB}}{P}\right), & \text{for Event 4} \\ 1 - f_3\left(\frac{z_A}{P}, \frac{z_B}{P}, \frac{z_{AB}}{P}\right), & \text{for Event 5} \\ 1 - f_3\left(\frac{z_A}{P}, \frac{z_A}{\alpha P}, \frac{z_{AB}}{P}\right), & \text{for Event 6} \\ 1 - \exp\left(-\lambda_1 \frac{z_A}{P} - \lambda_2 \frac{z_A}{\alpha P}\right), & \text{for Event 7} \end{cases} \quad (10)$$

其中 $z_A = 2^{2r_A} - 1$, $z_B = 2^{2r_B} - 1$, $z_{AB} = z_A + z_B + z_A z_B$, Event 1 – Event 7 和函数 $f_3(\bullet, \bullet, \bullet)$ 的定义为

$$\begin{aligned} \text{Event1} &\triangleq \left\{ z_A \leq \min\left(\alpha z_B, \frac{z_B}{\beta(1+z_B)}\right) \right\} \\ \text{Event2} &\triangleq \left\{ \alpha z_B \leq z_A < \frac{z_B}{\beta(1+z_B)} \right\} \\ &\cup \left\{ \begin{array}{l} \frac{z_B}{\beta(1+z_B)} \leq z_A < \frac{z_B}{\beta} \\ \frac{z_A}{\alpha(1+z_A)} < z_B \leq \frac{z_A}{\alpha} \\ \frac{z_A}{\alpha} + \frac{z_B}{\beta} \geq z_{AB} \end{array} \right\} \\ \text{Event3} &\triangleq \left\{ \frac{z_B}{\beta(1+z_B)} \leq z_A < \min\left(\frac{z_B}{\beta}, \alpha z_B\right) \right\} \\ \text{Event4} &\triangleq \left\{ \begin{array}{l} \frac{z_B}{\beta(1+z_B)} \leq z_A < \frac{z_B}{\beta} \\ \frac{z_A}{\alpha(1+z_A)} < z_B \leq \frac{z_A}{\alpha} \\ \frac{z_A}{\alpha} + \frac{z_B}{\beta} < z_{AB} \end{array} \right\} \\ \text{Event5} &\triangleq \left\{ \frac{z_B}{\beta} \leq z_A < \alpha z_B \right\} \\ \text{Event6} &\triangleq \left\{ \frac{z_A}{\alpha(1+z_A)} < z_B \leq \min\left(\beta z_A, \frac{z_A}{\alpha}\right) \right\} \\ \text{Event7} &\triangleq \left\{ z_B \leq \min\left(\beta z_A, \frac{z_A}{\alpha(1+z_A)}\right) \right\} \\ f_3(a, b, c) &= \mathbb{P}\{a \leq x, b \leq y, c \leq x + y\} \\ &= 1 - \exp[-\lambda_1(c-b) - \lambda_2 b] \\ &\quad - \begin{cases} \lambda_1(c-a-b)\exp(-\lambda_2 c), & \lambda_1 = \lambda_2 \\ \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \{ \exp[-\lambda_1(c-b) - \lambda_2 b] \\ - \exp[-\lambda_1 a - \lambda_2(c-a)] \}, & \lambda_1 \neq \lambda_2 \end{cases} \end{aligned}$$

3 中继选择准则

这一节研究“最佳”中继选择问题。这里假设网络中存在 N 个待选中继；可选中继集 D_t ($t = 1, 2, \dots, 2^N - 1$) 为第 1 时隙末能够正确解码源节点信息的中继集合。进一步，设 $\mathcal{D} = \{\emptyset \cup D_t, t = 1, 2, \dots, 2^N - 1\}$ ，其中 \emptyset 为空集； $|D_t|$ ($0 \leq |D_t| \leq N$) 为集合 D_t 的大小。

由第 2 节的讨论可知，第 i ($i \in \{1, 2, \dots, N\}$) 个中继节点能够正确解码源节点信息的条件如式(2)所示。假设第 1 时隙末能够正确完成解码的中继集合为 D_t ，则源节点通过第 i ($i \in D_t$) 个中继的协作传输获得的瞬时 SNR 为 $\text{SNR}_{A,i} = \beta_i P |h_{AR,i}|^2$ ， $\text{SNR}_{B,i} = \alpha_i P |h_{BR,i}|^2$ ，其中 $h_{AR,i}$ 和 $h_{BR,i}$ 为第 i 个中继到源节点 A 和 B 的信道增益； α_i 和 β_i 为第 i 个中继端的叠加信号功率分配因子。因此，对于由源节点 A 和 B 与第 i ($i \in D_t$) 个中继组成的 3 节点网络，系统在第 2 个时隙的中断概率可表达为

$$\begin{aligned} P_{\text{out},i}^{\text{DF-SC-2}} &= \mathbb{P}(\text{SNR}_{A,i} < z_B \text{ or } \text{SNR}_{B,i} < z_A) \\ &= \mathbb{P}\left\{ \min\left(\frac{\text{SNR}_{A,i}}{z_B}, \frac{\text{SNR}_{B,i}}{z_A}\right) < 1 \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

为了使式(11)中给出的中断概率最小，结合 max-min 准则，下面给出了一种修改的最大最小准则(Modified Max-Min strategy, MMM)，如式(12)所示。

$$n^* = \arg \max_{i,i \in D_t} \left[\min\left(\frac{\beta_i |h_{AR,i}|^2}{z_B}, \frac{\alpha_i |h_{BR,i}|^2}{z_A}\right) \right] \quad (12)$$

值得注意的是，当 $r_A = r_B$, $\alpha_i = \beta_i$ 时，式(12)将退化为 max-min 准则。

为了进一步降低系统中断概率，下面考虑中继端叠加信号功率分配因子的选择。为此，研究以下两个问题：(1)基于统计 CSI 信息的固定分配因子(Fixed Scaling Coefficients, FSC)选择；(2)基于瞬时 CSI 信息的动态分配因子(Variable Scaling Coefficients, VSC)选择。

(1)FSC 的选择 由于叠加信号功率分配的目的在于使得系统第 2 个时隙的中断概率最小化。因此，下面首先给出系统第 2 时隙的中断概率，即式(11)的最终表达式，如式(13)所示。

$$P_{\text{out},i}^{\text{DF-SC-2}} = 1 - \exp\left[-\left(\lambda_{1,i} \frac{z_B}{\beta_i P} + \lambda_{2,i} \frac{z_A}{\alpha_i P}\right)\right] \quad (13)$$

因此，FSC 的选择等价为

$$\begin{aligned} (\alpha_i, \beta_i) &= \arg \min_{\alpha, \beta} \lambda_{1,i} \frac{z_B}{\beta_i P} + \lambda_{2,i} \frac{z_A}{\alpha_i P} \\ \text{s.t. } & -\alpha_i < 0, -\beta_i < 0 \\ & \alpha_i + \beta_i = 1 \end{aligned} \quad (14)$$

问题式(14)的解可由式(15)和式(16)给出。

$$\alpha_i^{\text{FSC}} = \frac{\sqrt{\lambda_{2,i} z_A}}{\sqrt{\lambda_{1,i} z_B} + \sqrt{\lambda_{2,i} z_A}} \quad (15)$$

$$\beta_i^{\text{FSC}} = \frac{\sqrt{\lambda_{1,i} z_B}}{\sqrt{\lambda_{1,i} z_B} + \sqrt{\lambda_{2,i} z_A}} \quad (16)$$

根据以上讨论对 MMM 准则进行修正, 可得 MMM-FSC 准则。首先通过式(12)选出最佳中继 $n^* = k$, 然后通过式(15)和式(16)计算得出“最佳”功率分配因子 α_k^{FSC} 和 β_k^{FSC} , 最后选择中继 $n^* = k$ 为源节点进行信息的转发。

(2)VSC 的选择 对于 VSC 的选择, 可等同为利用瞬时 CSI 信息使得式(11)中的 $\min\left\{\frac{\text{SNR}_{A,i}^{\text{DF-SC}}}{z_B}, \frac{\text{SNR}_{B,i}^{\text{DF-SC}}}{z_A}\right\}$ 最大化。因此, VSC 的选择可等价为题式(17)。

$$\left. \begin{aligned} (\alpha_i, \beta_i) &= \arg \max_{\alpha, \beta} \left\{ \min \left[\frac{\text{SNR}_{A,i}^{\text{DF-SC}}}{z_B}, \frac{\text{SNR}_{B,i}^{\text{DF-SC}}}{z_A} \right] \right\} \\ \text{s.t. } & -\alpha_i < 0, -\beta_i < 0 \\ & \alpha_i + \beta_i = 1 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

问题式(17)可利用平衡技术^[8](balance technique)解出, 得最佳 VSC, 如式(18)和式(19)所示。

$$\alpha_i^{\text{VSC}} = \frac{z_A |h_{AR,i}|^2}{z_A |h_{AR,i}|^2 + z_B |h_{BR,i}|^2} \quad (18)$$

$$\beta_i^{\text{VSC}} = \frac{z_B |h_{BR,i}|^2}{z_A |h_{AR,i}|^2 + z_B |h_{BR,i}|^2} \quad (19)$$

根据以上讨论对 MMM 准则式(12)进行修正, 可得采用 VSC 的 MMM 准则(MMM-VSC), 具体见式(20)。

$$m^* = \arg \max_{i \in D_i} \left(\frac{|h_{AR,i}|^2 |h_{BR,i}|^2}{z_A |h_{AR,i}|^2 + z_B |h_{BR,i}|^2} \right) \quad (20)$$

对于 MMM-VSC 准则, 首先通过式(20)选出最佳中继 $m^* = k$, 然后通过式(18)和式(19)计算 VSC 因子 α_k^{VSC} 和 β_k^{VSC} , 最后选择中继 $m^* = k$ 为源节点进行信息的转发。

4 性能分析

这一节, 分析采用 MMM 准则进行中继选择的系统中断性能。由第 2 节的讨论可知, 当条件式(21)满足时, 中继 i 将能够正确解码源节点信息, 否则解码失败。

$$\mathcal{M}_i \triangleq \left\{ z_A \leq P |h_{AR,i}|^2, z_B \leq P |h_{BR,i}|^2, z_A z_B + z_A + z_B \leq P |h_{AR,i}|^2 + P |h_{BR,i}|^2 \right\} \quad (21)$$

根据条件式(21), MMM-FSC 准则下的系统中断概率可表示为

$$\begin{aligned} p_{\text{out}}^{\text{MMM-FSC}} &= \mathbb{P}(D = \emptyset) + \mathbb{P}(\text{SNR}_{A,k}^{\text{MMM-FSC}} < z_B \text{ or } \\ &\quad \text{SNR}_{B,k}^{\text{MMM-FSC}} < z_A | n^* = k) \\ &= \prod_{i=1}^N [1 - \mathbb{P}(\mathcal{M}_i)] \\ &= \prod_{i=1}^N \left\{ \prod_{i \in D_i} \mathbb{P} \left(\min \left[\frac{\beta_i^{\text{FSC}} P |h_{AR,i}|^2}{z_B}, \frac{\alpha_i^{\text{FSC}} P |h_{BR,i}|^2}{z_A} \right] < 1, \mathcal{M}_i \right) \right. \\ &\quad \cdot \left. \prod_{j \in \{1,2,\dots,N\} - D_i} [1 - \mathbb{P}(\mathcal{M}_j)] \right\} \\ &= \prod_{i=1}^N f_{3,i} \left(\frac{z_A}{P}, \frac{z_B}{P}, \frac{z_{AB}}{P} \right) \\ &\quad + \sum_{t=1}^{2^N - 1} \left\{ \prod_{i \in D_t} \left[f_5(z_A, z_B, \alpha_i, \beta_i, \lambda_{1,i}, \lambda_{2,i}, P) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + f_5(z_B, z_A, \beta_i, \alpha_i, \lambda_{2,i}, \lambda_{1,i}, P) \right] \right. \\ &\quad \left. \cdot \prod_{j \in \{1,2,\dots,N\} - D_t} f_{3,j} \left(\frac{z_A}{P}, \frac{z_B}{P}, \frac{z_{AB}}{P} \right) \right\} \quad (22) \end{aligned}$$

其中 D ($D \in \mathcal{D}$) 表示第 1 时隙末能够正确解码源节点信息的中继集合; $\text{SNR}_{A,k}^{\text{MMM-FSC}}$ 和 $\text{SNR}_{B,k}^{\text{MMM-FSC}}$ 分别表示采用 MMM-FSC 准则后, 源节点 A 和 B 获得的瞬时接收 SNR; $f_3(a, b, c) = 1 - \mathbb{P}\{a \leq x, b \leq y, c \leq x + y\}$, 其下标 k 为第 k 个中继和源节点组成系统链路特性参数标识; $f_5(a, b, \alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2, P) = \mathbb{P}\left(y < \frac{a}{\alpha P}, x \geq \frac{a}{P}, x \geq \frac{b}{P}, x + y \geq \frac{ab + a + b}{P}, \beta a x > \alpha b y\right)$ 。

同样根据系统中断定义, MMM-VSC 准则下的系统中断概率可表示为

$$\begin{aligned} p_{\text{out}}^{\text{MMM-VSC}} &= \mathbb{P}(D = \emptyset) + \mathbb{P}(\text{SNR}_{A,k}^{\text{MMM-VSC}} \\ &\quad < z_B \text{ or } \text{SNR}_{B,k}^{\text{MMM-VSC}} < z_A | m^* = k) \\ &= \prod_{i=1}^N [1 - \mathbb{P}(\mathcal{M}_i)] \\ &= \prod_{i=1}^N \left\{ \prod_{i \in D_i} \mathbb{P} \left(\frac{P |h_{AR,i}|^2 |h_{BR,i}|^2}{z_A |h_{AR,i}|^2 + z_B |h_{BR,i}|^2} < 1, \mathcal{M}_i \right) \right. \\ &\quad \left. \cdot \prod_{j \in \{1,2,\dots,N\} - D_i} [1 - \mathbb{P}(\mathcal{M}_j)] \right\} \quad (23) \end{aligned}$$

对于式(23)的理论推导很复杂, 下一节将通过计算机仿真来验证 MMM-VSC 准则的性能。

5 数值实验及分析

这一节将给出具体的数值仿真结果, 来验证所提中继选择算法的正确性和有效性。

图2和图3给出了MMM准则下的系统中断概率与 r_B 的关系曲线, 其中 r_A 固定。这里考虑3种中继叠加信号功率分配方案, 即 $\alpha = \beta = 0.5$ (平均分配), FSC和VSC。图2中考虑对称信道($g_1 = g_2 = 1$)情况; 图3考虑不对称信道情况($g_1 = 1, g_2 = 0.1$)。图2和图3显示: 理论值接近仿真结果, 说明理论分析的正确性; MMM准则下, 系统中断性能均有提升; 无论是对称信道还是不对称信道情况, VSC均具有性能优势; 在对称信道情况下, FSC与平均分配性能接近, 只在强不对称业务情况下(图2的最左和最右两端), FSC性能略好于平均分配; 在不对称信道情况下, FSC要优于平均分配, 只在强不对称业务情况下(图3的最右边), FSC性能略差。

图4和图5给出MMM准则下系统中断概率与节点发射功率的关系曲线。图4和图5中, 横轴采用节点发射功率的对数坐标, 即 $10\lg P$ 。这里考虑了两种情况: 不对称业务、对称信道($r_A=1, r_B=0.5, g_1=g_2=1$)和对称业务、不对称信道($r_A=r_B=1, g_1=1, g_2=0.1$)。图4和图5显示: 理论值接近于仿真结果, 说明理论分析的正确性; MMM准则下, 系统中断性能均有提升; 对于中继端叠加信号的功率分配而言, VSC最优, FSC次之, 平均分配最差, 并且在不对称信道情况下三者的性能差更加明显。

图6和图7给出了在中继节点位置变动情况下的系统中断概率曲线。假设中继 R 的位置在源节点 A

和 B 的连线上变动。假设源节点 A 与 B 的距离等于1, 则中继 R 到源节点 A 和 B 的距离 d_{AR} 和 d_{BR} 满足 $0 < d_{AR}, d_{BR} < 1, d_{AR} + d_{BR} = 1$ 。进一步, 假设 $g_1 = 1/d_{AR}^\chi, g_2 = 1/d_{BR}^\chi$, 其中 $\chi = 4$ 来模拟城市环境下的路径衰落^[7]。图6考虑了对称业务情况; 图7考虑了不对称业务情况。由图6和图7可以看出: 理论值与仿真结果完全匹配, 进一步说明理论分析的正确性; MMM准则下, 系统中断性能均得到有效提升; 对于中继端叠加信号的功率分配而言, 同样VSC最优, FSC次之, 平均分配最差, 当信道强不对称时, VSC与FSC性能接近, 当信道对称时, FSC与平均分配性能相同; 在不对称业务情况下, 当中继更加靠近小目标速率源节点时, VSC, FSC和平均分配三者性能接近。

6 结论

本文研究链路不对称和业务不对称情况下的DF双向中继系统被动式再生中继选择问题。首先, 理论分析了系统可达速率域, 并给出了单中继系统的中断概率闭合表达式。在此基础上, 利用源节点目标速率的不对称性, 提出一种改进型的max-min准则。为了进一步提高系统中断性能, 研究分别利用统计和瞬时CSI信息来选择最佳叠加编码因子, 并给出了两种叠加编码因子选择方法。最后, 考虑中继选择和叠加编码因子选择的联合进行, 提出了两种再生中继选择算法。数值仿真结果表明: 在强不对称业务情况下, 系统的中断概率仅与单向链路有关, 而与另一链路无关; 所提中继选择算法能够显著提升网络中断性能, 且在信道不对称情况下, 性能优势明显。

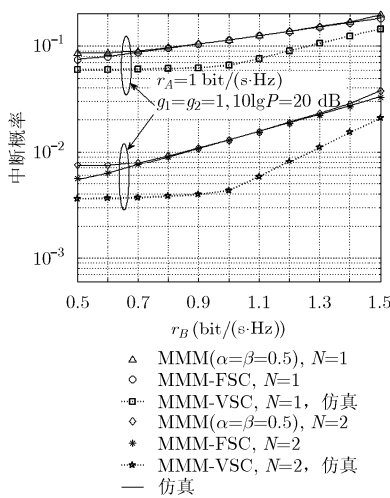


图2 对称信道情况下的中断概率与 r_B 关系曲线

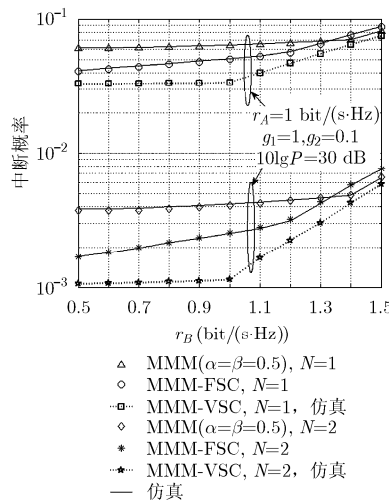


图3 不对称信道情况下的中断概率与 r_B 关系曲线

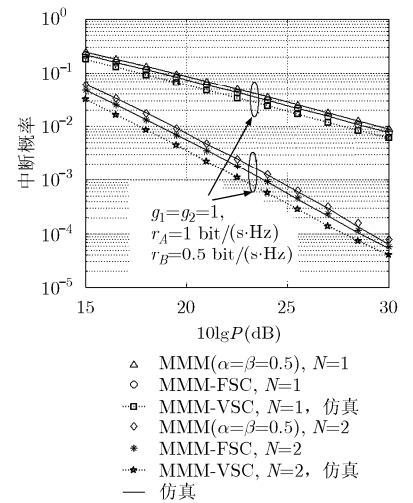


图4 对称信道情况下的系统中断概率与节点发射功率关系曲线

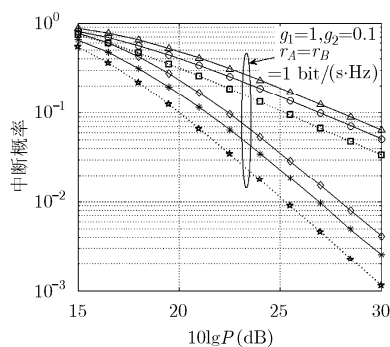


图5 不对称信道情况下的系统中断概率与节点发射功率关系曲线

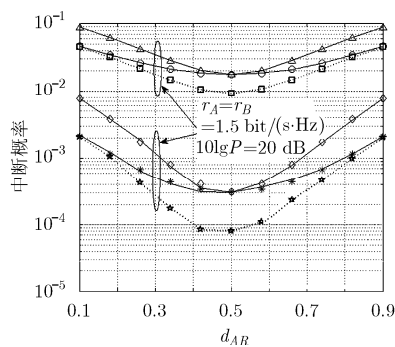


图6 对称业务情况下的系统中断概率与 d_{AR} 关系曲线

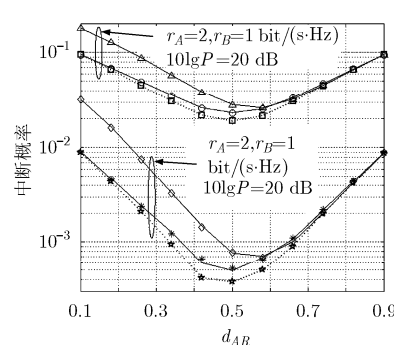


图7 不对称业务情况下的系统中断概率与 d_{AR} 关系曲线

参考文献

- [1] Rankov B and Wittneben A. Spectral efficient protocols for half-duplex fading relay channels[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, 25(2): 379-389.
- [2] Bletsas A, Khisti A, Reed D P, et al. A simple cooperative diversity method based on network path selection[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(3): 659-672.
- [3] Krikidis I. Relay Selection for two-way relay channels with MABC DF: a diversity perspective[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(9): 4620-4628.
- [4] Oechtering T J and Boche H. Bidirectional regenerative half-duplex relaying using relay selection[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(5): 1879-1888.
- [5] Woradit K, Quek T Q S, Suwansantisuk W, et al. Outage behavior of selective relaying schemes[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(8): 3890-3895.
- [6] Ji X, Zheng B, and Zou L. Opportunistic relay selection for joint decode-and-forward based two-way relaying with network coding[J]. *KSI Transactions on Internet and Information Systems*, 2011, 5(9): 1513-1527.
- [7] Ji X, Zheng B, Cai Y, et al. On the study of half-duplex asymmetric two-way relay transmission using an amplify-and-forward relay[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(4): 1649-1664.
- [8] Ji X, Zheng B, Cui J, et al. A study of half-duplex two-way decode-and-forward relay transmission with asymmetric traffic using superposition coding[C]. Proceedings of IEEE PIMRC 2012, Sydney, Australia, 2012: 1857-1861.

吉晓东: 男, 1979年生, 博士, 讲师, 研究方向为网络编码、协作中继以及认知无线电技术。

郑宝玉: 男, 1945年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线通信与信号处理、量子信息处理。

崔景伍: 女, 1955年生, 副教授, 主要研究方向为无线通信与网络信号处理。