

# 一种改进的自适应全双工中继系统中继策略

龙志鹏 余江 常俊

(云南大学信息学院 昆明 650091)

**摘要** 提出了一种基于源节点到中继节点(SR)信噪比门限和中继节点最小自干扰的全双工中继策略,并在此基础上与SR最大信噪比的全双工中继策略相结合,构建了一种改进的自适应全双工中继系统。在对等功率分配条件下使用DF协议转发时对自适应全双工中继系统的中断概率进行了分析,结果表明与自适应半双工中继策略相比,提出的自适应全双工中继系统的中断概率更低。与基于SR最大信噪比的全双工中继策略相比,一般情况下,当SR信噪比系数较大时,自干扰信号也较强,此时所提自适应全双工中继系统采用基于SR门限和最小自干扰的中继策略,中断概率较低;而在自干扰信号较小的情况下,该自适应全双工中继系统将采用基于最大SR信噪比的全双工中继系统的中继策略,能维持较好的中断性能。

**关键词** 全双工中继,半双工中继,中断概率,最小自干扰

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.09.022

## Improved Adaptive Relaying Strategy for Full Duplex Relay System

LONG Zhi-peng YU Jiang CHANG Jun

(School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming 650091, China)

**Abstract** This paper proposed a full duplex relay strategy based on threshold of the signal to noise ratio from source node to relay nodes (SR) and the minimum self-interference of relay nodes, and constructed an improved adaptive full duplex relay system through combining with the full duplex relaying strategy based on the maximum of signal to noise ratio from source node to relay nodes. Under the condition of equal power allocation and using DF protocol forwarding, the outage probability of the proposed full duplex relay system was analyzed. The results show that the outage probability of the proposed full duplex relay strategy is lower than that of an adaptive half duplex relay strategy. It is also lower than that of a full duplex relay strategy based on the maximum of signal to noise ratio from source node to relay nodes when the self-interference signal is strong and the signal to noise ratio of SR is large. The proposed adaptive full duplex relay system will use relay strategy of the full duplex relay system based on the maximum of signal to noise ratio from source node to relay nodes to maintain good outage performance when the self-interference signal is weak.

**Keywords** Full duplex relay, Half duplex relay, Outage probability, Minimum self-interference

## 1 引言

近年来,协作通信越来越受到人们的关注,中继技术可以提高系统容量并且增加小区覆盖范围,还可以与其他先进的无线通信技术结合以大大提升系统性能。在实际通信应用中,由于受到尺寸大小、功率等方面的限制,很难在同一个移动设备上安装多根天线,协作通信技术的出现为解决这些问题提供了思路,成为了下一代无线通信的研究热点。

最早的协作通信系统模型可以追溯到1971年E. C. van der Meulen提出的三节点通信系统,它只有发送节点、中继节点和目的节点,是一种单中继辅助通信系统。近年来,协作通信的中继选择策略、功率分配、中继转发协议纷纷成为研究的

热点<sup>[1-3]</sup>。文献[4-6]讨论并研究了中继在半双工工作方式下各种中继转发协议的性能,如固定中继转发协议(包括固定译码转发协议DF和固定放大转发协议AF)和选择性中继转发协议,并对各转发协议在瑞利衰落信道下的容量及增益性能进行了比较分析。文献[7]提出了单源多中继系统下自适应门限中继选择策略,将源到中继的信道质量与直传链路的信道质量进行比较,得出自适应门限值,用门限判别的方法选择中继节点。但由文献[8-9]可以得出,在半双工中继(Half-Duplex Relay, HDR)工作模型中,中继在两个不同的正交信道中分别接收和重发信号,一个时隙被分成两个甚至更多时隙,致使系统的频谱效率将会降低50%甚至更多。全双工中继(Full-Duplex Relay, FDR)则在同一个信道中接收和重发信

到稿日期:2016-08-22 返修日期:2016-11-14 本文受国家自然科学基金(61162004)资助。

龙志鹏(1990—),男,硕士生,主要研究方向为无线通信、信号处理, E-mail: 384334569@qq.com; 余江(1961—),男,教授,主要研究方向为网络通信理论、无线通信技术、图像处理, E-mail: yujiang@ynu.edu.cn(通信作者); 常俊(1970—),男,副教授,主要研究方向为网络通信理论、光纤通信技术、移动通信技术, E-mail: chuangujun@ynu.edu.cn。

号,弥补了 HDR 带来的频谱损失,从而成为了新的研究热点。

近年来,人们对于全双工中继的研究主要集中在自干扰抑制和全双工中继转发协议及功率分配几个方面。文献[10]介绍了全双工中继转发协议的基础知识,基于信道容量与半双工中继转发协议进行了比较,得出各自的优缺点。文献[11]提出了一种在使用 AF 协议的全双工中继网络下的中继选择策略,并分析了该模型的中断性能。文献[12-13]研究了在 DF 协议下全双工中继网络的中继选择和系统中断概率问题,以及在功率最优化的情况下最佳中继选择模型的中断性能。本文主要研究在 DF 协议下全双工多中继网络的中继选择策略,提出一种自适应中继选择策略,并将其分别与半双工中继最佳中继选择策略和文献[13]中的基于 SR 最大信噪比的全双工中继策略进行对比,分析各系统模型的中断性能。

## 2 系统模型及算法

建立一个协作通信网络,其包含一个源端(S)、一个目的端(D)和  $M$  个潜在在中继。中继工作方式均为全双工,采用 DF 转发协议。其系统模型如图 1 所示。

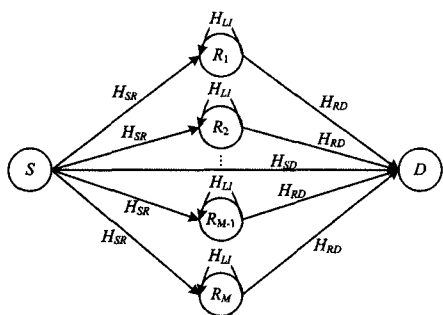


图 1 协作通信全双工中继系统模型

在该系统模型中,  $S$  和  $D$  进行通信的过程分为两个阶段:1)  $S$  发送信息,  $D$  端和  $M$  个中继节点同时进行监听, 所选中继节点和目的节点接收来自源节点  $S$  的信息;2) 选中的中继节点  $L$  向  $D$  发送信息, 在目的节点处, 对两个阶段接收到的信息进行合并, 得到分集增益。

上述系统模型中,  $S$  到  $R$ ,  $R$  到  $D$ ,  $S$  到  $D$  和中继节点自干扰信道的瞬时信道系数为  $H_{SR}, H_{RD}, H_{SD}, H_{LI}$ , 全双工中继下的信道的信噪比为  $\lambda_{SR}, \lambda_{RD}, \lambda_{SD}, \lambda_{LI}$ 。假设信道为平坦瑞利快衰落信道,  $\lambda_{SR} = \lambda_0 |H_{SR}|^2, \lambda_{RD} = \lambda_0 |H_{RD}|^2, \lambda_{SD} = \lambda_0 |H_{SD}|^2, \lambda_{LI} = \lambda_0 |H_{LI}|^2$ , 其中  $\lambda_0 = \text{SNR}$  为所有信道的平均信噪比。 $\lambda_{SR}, \lambda_{RD}, \lambda_{SD}, \lambda_{LI}$  均服从独立的指数分布, 其概率密度函数(PDF)分别为:  $f_{\lambda_{SR}}(\lambda) = \alpha e^{-\alpha\lambda}$ , 其中  $\alpha = \frac{1}{\lambda_0 \pi_{SR}}$ ;  $f_{\lambda_{RD}}(\lambda) = \beta e^{-\beta\lambda}$ , 其中  $\beta = \frac{1}{\lambda_0 \pi_{RD}}$ ;  $f_{\lambda_{SD}}(\lambda) = \mu e^{-\mu\lambda}$ , 其中  $\mu = \frac{1}{\lambda_0 \pi_{SD}}$ ;  $f_{\lambda_{LI}}(\lambda) = \theta e^{-\theta\lambda}$ , 其中  $\theta = \frac{1}{\lambda_0 \pi_{LI}}$ ;  $\alpha, \beta, \mu, \theta$  为信道参数,  $\pi$  代表各信道衰落系数。

在该全双工中继系统中,  $x_s(t), x_R(t)$  分别为源端和中继端的发送信号;  $y_D(t)$  为目的端的接收信号;  $n_R(t), n_D(t)$  分别为中继端和目的端接收到的高斯白噪声信号, 均服从均值为 0、方差为  $\sigma^2$  的正态分布, 则中继端和目的端在时刻  $t$  接收到的信号可以分别表示为:

$$y_R(t) = H_{SR}x_s(t) + H_{LI}x_R(t) + n_R(t) \quad (1)$$

$$x_R(t) = y_R(t - \tau) \quad (2)$$

$$y_D(t) = H_{SD}(t)x_S(t) + H_{RD}(t)x_R(t) + n_D(t) \quad (3)$$

由上述公式可以看出, 在全双工中继系统中,  $x_R(t)$  信号在向接收端发送信号的同时还给中继从源端的接收信号  $y_R(t)$  带来了干扰, SR 信噪比系数越大,  $x_R(t)$  信号越强, 干扰信号也将变强, 因此最大 SR 信噪比对应的中继节点处的自干扰通常也比较强。

基于源节点到中继节点信噪比门限和最小自干扰的全双工中继选择算法的过程如下( $M$  为中继节点总个数):

- 1) 初始化  $j=0$ ;
- 2) 设  $j=j+1$ , 如果  $j=M+1$ , 转至步骤 5);
- 3) 源节点  $S$  到第  $j$  个中继节点的信噪比为  $\lambda_{SR_j}$ , 将其与门限值  $\lambda_{th}$  进行比较,  $\lambda_{th}$  为源节点  $S$  到中继节点的平均信噪比, 即  $\lambda_{th} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \lambda_{SR_i}$ ;

4) 若  $\lambda_{SR_j} \geq \lambda_{th}$ , 记录符合条件的此中继节点  $j$ , 此时若  $j=M$ , 则进入下一个步骤, 反之返回步骤 2); 若  $\lambda_{SR_j} < \lambda_{th}$ , 淘汰该中继节点, 直接返回步骤 2);

5) 根据步骤 4) 所记录的一批符合条件的中继节点, 比较各自所在中继信道的自干扰系数, 选择最小的中继信道自干扰系数所对应的中继节点作为最优全双工中继节点  $i$ , 即  $i \rightarrow \min\{\pi_{LI_j}\}$ ,  $\pi_{LI_i}$  为第  $i$  个中继节点所在中继信道的自干扰系数。算法结束。

在该选择算法中, 源节点  $S$  到第  $j$  个中继节点的信噪比  $\lambda_{SR_j}$  大于信噪比门限  $\lambda_{th}$  时, 筛选出一批信道质量好的中继节点; 然后基于最小准则, 比较符合条件的中继节点所在中继信道的自干扰系数  $\pi_{LI_j}$ , 取最小值, 选择出最优的全双工中继节点  $i$ , 对应的 SR 信噪比系数为  $\pi_{SR_i}$ , 自干扰系数为  $\pi_{LI_{min}}$ 。若  $M=1$ , 则  $\lambda_{th} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \lambda_{SR_i} = \lambda_{SR_M}$ , 此种情况下只有一个中继节点, 且与筛选的门限相等, 这个中继节点便被选中。而根据最大 SR 信噪比的全双工中继策略选出的中继节点为  $k$ , 即  $k \rightarrow \max\{\lambda_{SR_j}\}$ , 对应的 SR 信噪比系数为  $\pi_{SR_{max}}$ , 自干扰系数为  $\pi_{LI_k}$ 。

本文的自适应全双工策略如下: 一般情况下, 由于 SR 信噪比越大, 中继自干扰信号越强, 通常满足  $\frac{\pi_{SR_{max}}}{\pi_{LI_k}} < \frac{\pi_{SR_i}}{\pi_{LI_{min}}}$ , 此时本文的自适应全双工中继系统根据基于源节点到中继节点信噪比门限和最小自干扰的全双工中继选择策略选出最佳中继节点  $i$ ; 而当出现  $\frac{\pi_{SR_{max}}}{\pi_{LI_k}} \geq \frac{\pi_{SR_i}}{\pi_{LI_{min}}}$  情况时, 本文的自适应全双工中继系统采用基于源节点到中继节点 SR 最大信噪比的全双工中继选择策略所选出的最佳中继节点  $k$ 。

## 3 系统中断概率分析

系统中断概率  $P_{out}$  一般是指任意两节点之间的互信量  $I$  小于要求的信道容量  $C$  的概率, 即  $P_{out} = P(I \leq C)$ , 则全双工中继系统中断概率为:

$$P_{out} = P(I \leq C) = P\{\max\{I_{FD}, I_{SD}\} \leq C\} = P\{I_{FD} \leq C\} \cdot P\{I_{SD} \leq C\} \quad (4)$$

其中,  $I_{FD}$  为  $S$  经中继节点  $R$  再到  $D$  的中继协作信道的互信息量,  $I_{SD}$  为  $S$  到  $D$  直传链路的互信息量。

在本文构建的全双工系统中,  $M$  个中继节点均可以同时接收和转发信号, 系统的频谱效率不会损失, 即  $I_{FD} = \log(1 + \lambda)$ 。假设在  $M$  个 FDR 中继节点中, 一般情况下, 当  $\frac{\pi_{SR_{\max}}}{\pi_{LI_k}} <$

$\frac{\pi_{SR_i}}{\pi_{LI_{\min}}}$  时, 满足在 SR 信噪比门限之上和最小自干扰的中继节点  $i$  被选中, 则  $\lambda_i$  的累积分布函数 CDF 为:

$$F_{\lambda_i}(\lambda) = F_{\lambda_{S_i}}(\lambda) \quad (5)$$

$F_{\lambda_{S_i}}$  为中继节点  $i$  的接收信噪比  $\lambda_{S_i} = \frac{\lambda_{SR_i}}{\lambda_{LI_i} + 1}$  的概率分布函数:

$$F_{\lambda_{S_i}}(\lambda) = 1 - \frac{\theta_i}{\theta_i + \alpha_i \lambda} e^{-\alpha_i \lambda} \quad (6)$$

由于中继采用 DF 协议, 因此目的端的端到端信噪比可以表示为  $\lambda_{eq} = \min\{\lambda_{S_i}, \lambda_{iD}\}$ , 而  $F_{\lambda_{iD}}(\lambda) = 1 - e^{-\beta \lambda}$ , 则  $\lambda_{eq}$  的概率累积分布函数 CDF 的表达式为:

$$\begin{aligned} F_{\lambda_{eq}}(\lambda) &= P\{\lambda_{eq} < \lambda\} \\ &= P\{\min\{\lambda_{S_i}, \lambda_{iD}\} < \lambda\} \\ &= 1 - [1 - F_{\lambda_{S_i}}(\lambda)][1 - F_{\lambda_{iD}}(\lambda)] \\ &= 1 - [1 - (1 - \frac{\theta_i}{\theta_i + \alpha_i \lambda} e^{-\alpha_i \lambda})] \cdot e^{-\beta \lambda} \end{aligned} \quad (7)$$

由此可以得出:

$$\begin{aligned} P\{I_{FD} \leq C\} &= P\{\lambda_{eq} \leq 2^C - 1\} \\ &= F_{\lambda_{eq}}(2^C - 1) \\ &= 1 - [1 - (1 - \frac{\theta_i}{\theta_i + \alpha_i \lambda} e^{-\alpha_i (2^C - 1)})] \cdot e^{-\beta (2^C - 1)} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} P\{I_{SD} \leq C\} &= P\{\lambda_{SD} \leq 2^C - 1\} \\ &= F_{\lambda_{SD}}(2^C - 1) \\ &= [1 - e^{-\mu (2^C - 1)}] \end{aligned} \quad (9)$$

因此可以得出当  $\frac{\pi_{SR_{\max}}}{\pi_{LI_k}} < \frac{\pi_{SR_i}}{\pi_{LI_{\min}}}$  时, 本文的自适应全双工中继系统的中断概率为:

$$\begin{aligned} P_F &= P\{I_{FD} \leq C\} \cdot P\{I_{SD} \leq C\} \\ &= \{1 - [1 - (1 - \frac{\theta_i}{\theta_i + (2^C - 1)\alpha_i} e^{-\alpha_i (2^C - 1)})] \cdot e^{-\beta (2^C - 1)}\} \cdot [1 - e^{-\mu (2^C - 1)}] \\ &= \{1 - [1 - (1 - \frac{1}{(1 + (2^C - 1)\pi_{LI_{\min}}/\pi_{SR_i})} e^{-\alpha_i (2^C - 1)})] \cdot e^{-\beta (2^C - 1)}\} \cdot [1 - e^{-\mu (2^C - 1)}] \end{aligned} \quad (10)$$

基于最大 SR 信噪比的全双工中继系统的中断概率为:

$$\begin{aligned} P_f &= P\{I_{FD} \leq C\} \cdot P\{I_{SD} \leq C\} \\ &= \{1 - [1 - (1 - \frac{\theta_k}{\theta_k + (2^C - 1)\alpha_k} e^{-\alpha_k (2^C - 1)})] \cdot e^{-\beta (2^C - 1)}\} \cdot [1 - e^{-\mu (2^C - 1)}] \\ &= \{1 - [1 - (1 - \frac{1}{1 + (2^C - 1)\pi_{LI_k}/\pi_{SR_{\max}}} e^{-\alpha_k (2^C - 1)})] \cdot e^{-\beta (2^C - 1)}\} \cdot [1 - e^{-\mu (2^C - 1)}] \end{aligned} \quad (11)$$

综上, 本文的自适应全双工中继系统的中断概率为:

$$P = \begin{cases} P_F, & \frac{\pi_{SR_{\max}}}{\pi_{LI_k}} < \frac{\pi_{SR_i}}{\pi_{LI_{\min}}} \\ P_f, & \frac{\pi_{SR_{\max}}}{\pi_{LI_k}} \geq \frac{\pi_{SR_i}}{\pi_{LI_{\min}}} \end{cases} \quad (12)$$

从上述  $P_F$  和  $P_f$  两个中断概率公式的对比可以得出, 一般情况下, 当  $\frac{\pi_{SR_{\max}}}{\pi_{LI_k}} < \frac{\pi_{SR_i}}{\pi_{LI_{\min}}}$  时, 又因  $\alpha = \frac{1}{(\lambda_0 \pi_{SR})}$ ,  $e^{-\alpha_k (2^C - 1)}$  和  $e^{-\alpha_i (2^C - 1)}$  的取值均是接近于 1 且几乎相等,  $P_F < P_f$ , 所以本文的自适应全双工中继系统的中断性能要优于基于最大 SR 信噪比的自适应全双工中继系统; 但是当出现  $\frac{\pi_{SR_{\max}}}{\pi_{LI_k}} \geq \frac{\pi_{SR_i}}{\pi_{LI_{\min}}}$  的情况时, 本文的自适应全双工中继系统采用基于最大 SR 信噪比的全双工中继策略, 本文自适应全双工中继系统与基于最大 SR 信噪比的自适应全双工中继系统的中断性能相同。

采用同样的方法可以得出自适应半双工中继系统的中断概率为:

$$\begin{aligned} P_H &= P\{I_{HD} \leq C\} \cdot P\{I_{SD} \leq C\} \\ &= \{1 - [1 - (1 - e^{-\alpha_i (2^C - 1)})] \cdot e^{-\beta (2^C - 1)}\} \cdot [1 - e^{-\mu (2^C - 1)}] \end{aligned} \quad (13)$$

## 4 仿真结果及分析

通过计算机仿真, 可以很直观地看出本文提出的自适应全双工中继策略与自适应半双工中继策略以及基于 SR 最大信噪比的全双工中继策略的中断性能的好坏。仿真环境设置如下: 构建如图 2 所示的单源多中继协作通信系统, 令源节点  $S$  与目的节点  $D$  之间的距离  $d_{SD}$  为 1,  $M$  个中继节点位于源节点与目的节点之间且相对于目的节点呈环形分布, 与源节点  $S$  之间的距离归一化后的距离为  $d_{SR_j}$ , 所有中继节点与目的节点  $D$  之间的距离均相同且归一化后的距离为  $d_{RD}$ 。由图 2 可得  $0 < d_{SR_j}, d_{RD} < 1$ 。各信道(包括中继节点处的自干扰信道)均为瑞利衰落信道, 且信道参数设置为  $\pi_{RD} = 2.5$  dB,  $\pi_{SD} = 1$  dB(在图 2 所示的系统拓扑结构中, 目的节点  $D$  处于源节点信号  $S$  覆盖的边缘区域,  $d_{SR_j}$  和  $d_{RD}$  均小于  $d_{SD}$ , 根据无线通信的路径损耗特性,  $\pi_{RD}$  和  $\pi_{SR}$  均大于  $\pi_{SD}$ )。中继节点的工作方式为 DF 协作方式, 潜在中继个数  $M=8$ (本文研究的协作通信系统只选择其中一个最佳中继进行协作传输), 系统采用等功率分配的方式发射(即  $P_S = P_R = P$ ), 各接收节点(含中继接收端)处的噪声功率相同, 即  $\sigma_R = \sigma_D = \sigma^2$ , 信道要求的频谱利用率  $C$  为 0.5 bit/s/Hz。在图 2 所示的单源多中继协作通信系统中, 中继节点  $R_3, R_4, R_5, R_6$  的信噪比系数在平均值门限之上, 其中中继节点  $R_4$  对应的 SR 信噪比系数最大, 中继节点  $R_3$  对应的自干扰系数最小。

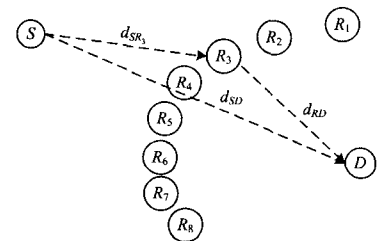


图 2 单源多中继协作通信系统拓扑结构图

仿真结果如图 3 所示,  $P_F$  代表本文提出的自适应全双工中继系统的中断概率,  $P_H$  代表自适应半双工中继系统中断概率, 可以看到, 当源节点到中继节点  $R_3$  的信噪比系数  $\pi_{SR} = 3\text{dB}$  和最小自干扰系数  $\pi_{LI_{\min}} = 0.5\text{dB}$  时, 本文提出的自适应全双工中继系统的中断性能明显优于自适应半双工中继系统, 在低信噪比区域内本文的自适应全双工中继系统明显更优。由图 4 可以看出, 源节点到中继节点  $R_3$  的信噪比不变, 最小自干扰得到很大程度的抑制后, 自干扰系数  $\pi_{LI_{\min}} = 0.1\text{dB}$ , 此时本文提出的自适应全双工中继系统的中断性能的优化效果更好。

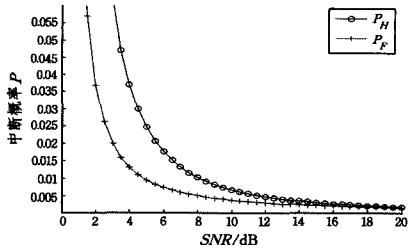


图 3 最小自干扰系数  $\pi_{LI_{\min}} = 0.5\text{dB}$  时全双工和半双工自适应算法中断概率比较

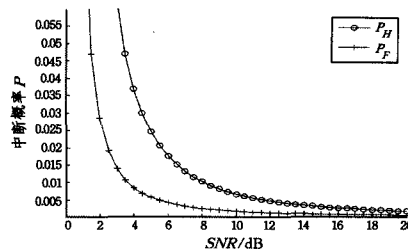


图 4  $\pi_{LI_{\min}} = 0.1\text{dB}$  时全双工和半双工自适应算法中断概率比较

表 1 为不同传输策略下的中断概率数据统计。从表中的数据对比来看, 在系统平均信噪比小于  $20\text{dB}$  时, 本文自适应全双工中继系统的中断性能明显优于自适应半双工中继系统, 且在  $0\sim 10\text{dB}$  的低信噪比区域内优化效果更加明显。最小自干扰系数  $\pi_{LI_{\min}}$  越小, 本文提出的自适应全双工中继系统的中断性能优化效果越好。

表 1 不同传输策略下的中断概率

SNR/dB	4	8	12	16	20
半双工中继策略	0.03710	0.010290	0.004740	0.002714	0.001613
基于 SR 最大信噪比全双工中继策略	0.01503	0.006248	0.003866	0.002785	0.002172
本文自适应全双工中继策略 ( $\pi_{LI_{\min}} = 0.5\text{dB}$ )	0.01308	0.005017	0.002984	0.002101	0.001613
本文自适应全双工中继策略 ( $\pi_{LI_{\min}} = 0.1\text{dB}$ )	0.008435	0.002542	0.001299	0.000822	0.000583

本文系统与基于最大信噪比的全双工中继系统的比较如图 5 和表 1 所示,  $P_f$  代表文献[13]提出的基于 SR 最大信噪比的全双工中继系统的中断概率,  $P_F$  代表本文提出的基于 SR 门限和最小自干扰的全双工中继系统的中断概率。可以看出, 基于 SR 最大信噪比准则选出的中继节点  $R_4$  的信噪比系数  $\pi_{SR_{\max}} = 4\text{dB}$ , 自干扰系数  $\pi_{LI_k} = 1\text{dB}$ ; 而本文根据 SR 门限

和最小自干扰系数所选出的中继节点  $R_3$  的信噪比系数  $\pi_{SR_i} = 3\text{dB}$ , 自干扰系数  $\pi_{LI_{\min}} = 0.5\text{dB}$ , 此时满足  $\frac{\pi_{SR_{\max}}}{\pi_{LI_k}} < \frac{\pi_{SR_i}}{\pi_{LI_{\min}}}$ 。由于本文所提出的自适应全双工中继系统采用基于 SR 门限和最小自干扰的中继策略, 因此本文的自适应全双工中继系统的中断性能明显优于基于 SR 最大信噪比的全双工中继系统。

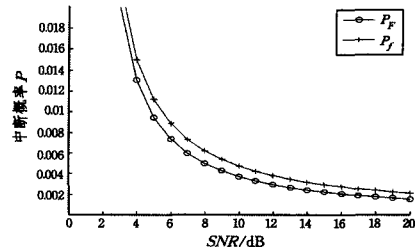


图 5 基于 SR 门限和最小自干扰的全双工算法与基于 SR 最大信噪比的全双工算法的比较

当  $\frac{\pi_{SR_{\max}}}{\pi_{LI_k}} \geq \frac{\pi_{SR_i}}{\pi_{LI_{\min}}}$  时, 基于 SR 最大信噪比准则选出的中

继节点  $R_4$  的信噪比系数  $\pi_{SR_{\max}} = 5\text{dB}$ , 自干扰系数为  $\pi_{LI_k} = 0.8\text{dB}$ ; 而根据 SR 门限和最小自干扰系数所选出的中继节点  $R_3$  的信噪比系数  $\pi_{SR_i} = 3\text{dB}$ , 自干扰系数  $\pi_{LI_{\min}} = 0.5\text{dB}$ , 此时基于 SR 最大信噪比的全双工中继系统的中断性能略优于基于 SR 门限和最小自干扰的全双工中继系统, 但此时本文提出的自适应全双工中继系统将采用基于最大 SR 信噪比的全双工中继系统的中继策略, 从而获得较好的中断性能。

**结束语** 相比自适应半双工中继策略, 本文提出的自适应全双工中继系统的中断概率更低, 具有更好的系统性能; 最小自干扰越小, 优化程度越大, 在低信噪比区域的优化效果更加明显; 与基于 SR 最大信噪比的全双工中继策略相比, 一般情况下, SR 信噪比系数越大, 干扰信号越强, 通常满足  $\frac{\pi_{SR_{\max}}}{\pi_{LI_k}} <$

$\frac{\pi_{SR_i}}{\pi_{LI_{\min}}}$ , 此时本文的自适应全双工中继系统采用基于 SR 门限和最小自干扰的中继策略, 得到的中断性能明显更优。而当出现  $\frac{\pi_{SR_{\max}}}{\pi_{LI_k}} \geq \frac{\pi_{SR_i}}{\pi_{LI_{\min}}}$  的情况时, 本文的自适应全双工中继系统将采用基于最大 SR 信噪比的全双工中继系统的中继策略, 从而获得较好的中断性能。

### 参 考 文 献

[1] ZHAO Y C, LI E Y. Performance Analysis of Relay Selection Schemes for Cooperative Communications [J]. Computer Science, 2012, 39(10): 69-72. (in Chinese)  
赵永驰, 李恩玉. 协作通信的中继选择策略性能研究[J]. 计算机科学, 2012, 39(10): 69-72.

[2] RUN L H, WANG Y, CHEN C. Research on Relay Selection Strategy in Cooperation Communication [J]. Computer Science, 2011, 38(s1): 380-384. (in Chinese)  
闰力缓, 王玥, 陈晨. 协同通信中继选择技术的研究[J]. 计算机科学, 2011, 38(s1): 380-384.

- [3] LIAN Z X, YU J, XU L M. Improved LMMSE Channel Estimation Algorithm[J]. Computer Science, 2014, 41(4): 53-56. (in Chinese)  
练柱先, 余江, 徐丽敏. 一种改进的 LMMSE 信道估计算法[J]. 计算机科学, 2014, 41(4): 53-56.
- [4] COVER T M, GAMAL A E. Capacity theorems for the relay channel [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 1979, 25(5): 572-584.
- [5] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [6] ADINOY A, FAN Y, YANIKOMEROGU H, et al. Performance of selection relaying and cooperative diversity[J]. IEEE Trans. on Wireless Commun., 2009, 8(12): 5790-5795.
- [7] ZOU Y L, ZHENG B Y. Adaptive Cooperative Transmission Scheme Based on Distributed Relay Selection [J]. ACTA Electronica Sinica, 2009, 37(1): 13-20. (in Chinese)  
邹玉龙, 郑宝玉. 基于分布式中继选择的自适应协作传输方案[J]. 电子学报, 2009, 37(1): 13-20.
- [8] RIIHONEN T, WERNER S, WICHMAN R. On the feasibility of full-duplex relaying in the presence of loop interference[C]// 10th IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, 2009: 275-278.
- [9] LUO X Y. Study on key technology for front-end of receiver and transmitter in full duplex communication system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)  
罗馨逸. 全双工通信系统收发前端关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [10] KRIKIDIS I, SURAWEERA H A, SMITH P J, et al. Full-duplex relay selection for amplify-and-forward cooperative networks[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2012, 11(12): 4381-4393.
- [11] YANG K. Efficient full-duplex relaying with joint antenna relay selection and self-interference suppression [J]. IEEE Trans. on Wireless Commun., 2015, 14(7): 3991-4005.
- [12] CHEN L. Optimal power allocation for dual-hop full-duplex decode-and-forward relay [J]. IEEE Commun. Lett., 2015, 19(3): 471-474.
- [13] KWON T, LIM S, CHOI S, et al. Optimal duplex mode for DF relay in terms of the outage probability[J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 2010, 59(7): 3628-3634.
- [14] ZHONG F J, ZHAO Y C. Study on performance of full-duplex relay selection strategy [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(5): 912-917. (in Chinese)  
钟福建, 赵永驰. 全双工中继选择策略的性能研究[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(5): 912-917.

(上接第 77 页)

## 参 考 文 献

- [1] Internet Society of China. China anti-spam survey report in the first quarter of 2014 [J]. China Internet, 2014(7): 59-67. (in Chinese)  
中国互联网协会. 2014 年第一季度反垃圾邮件调查报告[J]. 互联网天地, 2014(7): 59-67.
- [2] CHEN Z X. Review of spam filtering technology[J]. Application Research of Computers, 2009, 26(5): 1612-1615 (in Chinese)  
陈志贤. 垃圾邮件过滤技术研究综述[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(5): 1612-1615.
- [3] YAO Y Y. Three-Way Decision: An Interpretation of Rules in Rough Set Theory[M]// Rough Sets and Knowledge Technology. Springer Berlin Heidelberg, 2009: 642-649.
- [4] YAO Y Y. Three-way decisions with probabilistic rough sets [J]. Information Sciences, 2010, 180(3): 341-353.
- [5] YAO Y Y. An Outline of a Theory of Three-Way Decisions[M]// Rough Sets and Current Trends in Computing. Springer Berlin Heidelberg, 2012: 1-17.
- [6] LI J L, DENG X F, YAO Y Y. Multistage Email Spam Filtering Based on Three-Way Decisions[M]// Rough Sets and Knowledge Technology. Springer Berlin Heidelberg, 2013: 313-324.
- [7] ZHOU B, YAO Y Y, LUO J G. Cost-sensitive three-way email spam filtering [J]. Journal of Intelligent Information Systems, 2014, 42(1): 19-45.
- [8] JIA Y X, SHANG L. Three-Way Decision Versus Two-Way Decisions on Filtering Spam Email[M]// Transactions on Rough Sets XVIII. Springer Berlin Heidelberg, 2014: 69-91.
- [9] DENG W B, HONG Z Y. Two stage email filtering method based on rough set[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(8): 2006-2009, 2048.
- [10] PAWLAK Z. Rough sets [J]. International Journal of Computer and Information Sciences, 1982, 11(5): 341-356.
- [11] YAO Y Y. Decision-Theoretic Rough Set Models[C]// International Conference on Rough Sets and Knowledge Technology. New York: Springer-Verlag, 2007: 1-12.
- [12] MARINOFF L. The Middle Way: Finding Happiness in a World of Extremes[M]. New York: Sterling, 2007.
- [13] 贾修一, 等. 三支决策理论与应用[M]. 南京: 南京大学出版社, 2012.
- [14] 于洪等. 三支决策: 复杂问题求解方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [15] PAWLAK Z. Rough sets: Theoretical aspects of reasoning about data[M]. London: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [16] LIANG J Y, QIAN Y H. Information granules and entropy theory in information systems [J]. Science in China-Series, 2008, 51(3): 1427-1444.
- [17] YE J, ZHU H S, LI M. Kind of attribute importance defined method and its application in attribute reduction [J]. Application Research of Computers, 2016, 33(7): 2075-2078. (in Chinese)  
叶军, 朱华生, 黎敏. 一种属性重要性定义方法及其在约简中的应用[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(7): 2075-2078.
- [18] Text Retrieval Conference, 2006 TREC Public Spam Corpora [EB/OL]. [2016-04-21]. <http://plg.uwaterloo.ca/cgi-bin/cgi-wrap/gvcormac/foo06>.