

# 协作通信的中继选择策略性能研究

赵永驰<sup>1</sup> 李恩玉<sup>2</sup>

(绵阳师范学院计算机中心 绵阳 621000)<sup>1</sup> (重庆大学通信与测控中心 重庆 400044)<sup>2</sup>

**摘要** 在解码转发协议的基础上,研究了全选中继策略和机会中继选择策略的中断概率性能,推导了瑞利衰落下的两种策略的中断概率精确闭式结果,给出了高信噪比时的中断概率近似表达式。通过理论分析和数值仿真结果得出:在信噪比足够高或在中继-目的信道性能优于源-中继的信道性能的情况下,这两种策略具有相同的中断概率性能;源-中继的信道性能比中继-目的节点的信道性能越好,全选中继策略的性能越优于机会中继选择策略的中断概率性能。

**关键词** 协作通信,解码转发,瑞利衰落,中断概率,中继选择

**中图分类号** TN92 **文献标识码** A

## Performance Analysis of Relay Selection Schemes for Cooperative Communications

ZHAO Yong-chi<sup>1</sup> LI En-yu<sup>2</sup>

(Computer Center, Mianyang Normal University, Mianyang 621000, China)<sup>1</sup>

(Center of Communication and Tracking Telemetry & Command, Chongqing University, Chongqing 400044, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Outage probabilities of all relays selection scheme and opportunistic relaying selection scheme based on decode-and-forward (DF) protocol were analyzed. Especially, exact closed-form results of the outage probability for the two schemes over Rayleigh fading channels were derived. Further investigation of the outage performance was made and asymptotic expressions for outage probability were obtained in the high signal-to-noise ratio (SNR) regime. Theoretical analysis and numerical simulation results show that the outage results of the two methods are equal in high SNR or in the case that the performance of relay-destination channels is better than that of source-relay channels. The outage performance of all relays selection scheme is better than that of opportunistic relaying selection scheme when the performance of channels from the source to relays is better than that of the channels from relays to the destination.

**Keywords** Cooperative communications, Decode-and-forward DF, Rayleigh fading, Outage probability, Relay selection

## 1 引言

中继协作技术<sup>[1,2]</sup>的引入,使具有单天线的发射源形成了一个虚拟的天线阵,达到了空间的分集效果,显著地提高了系统的性能,但同时也带来了一些技术上所固有的问题<sup>[3-6]</sup>。其中,中继的选择就是一个中继协作首要解决的问题,也是无线协作通信中的一个研究热点<sup>[5-14]</sup>。Bletsas 等在文献[5]中提出了一种分布式的机会中继(Opportunistic Relaying, OR)选择策略方式,得出了该机会中继策略能够达到采用多个中继协作或分布式空时编码时相同的分集增益性能。文献[6]提出了一种基于最大最小准则的中继选择策略,验证了在不存在直传路径时,文中的两种机会中继都能达到中断最优。文献[7,8]研究了 Nakagami-m 信道下基于解码转发(Decode-and-Forward, DF)协议的中继选择性能,但其没有给出高信噪比的近似结果,不能进一步从理论上分析相关性能。文献[9]研究了放大解码转发(Amplify-and-Forward, AF)协议下

选择最优中继集合全参与策略的性能。文献[10]研究了 Rayleigh 信道下存在干扰时的机会中继模型分析。文献[12]给出了一个基于选择性解码转发(Selective DF, SDF)的 max-generalized-mean(MGM)中继选择准则。文献[13,14]研究了放大解码转发 AF 协议下的机会中继选择性能。但是对于 DF 协议下,全选中继(all relays, AR)策略和 OR 选择策略的性能比较缺乏专门的研究文献,因此,本文在 DF 协议的基础上,研究比较了 AR 策略和 OR 策略的性能,给出了两种策略中断性能的理论推导和精确中断概率闭式结果,首次给出了高 SNR 范围时的中断概率结果,并通过数值仿真给出了两种策略中断性能关系和主要影响因素。

## 2 系统模型

DF 协议下,全选中继策略和机会中继协作通信系统模型如图 1 所示。该模型包括 1 个源节点 S、1 个目的节点 D,以及 N 个中继节点  $R_i(i=1, 2, \dots, N)$ ,且每个节点只含有单根

到稿日期:2012-01-20 返修日期:2012-05-29 本文受绵阳师范学院科研基金(MA2011A11),国家发改委 CNGI 示范工程项目(CNGI-04-4-2D),重庆市科技攻关计划项目(CSTC2009AB2167),中央高校基本科研业务费专项资金(CDJXS11160001)资助。

赵永驰(1974-),男,硕士,讲师,主要研究方向为信息控制、网络通信安全等,E-mail:zhao0426@yahoo.com.cn;李恩玉(1981-),男,博士生,主要研究方向为 MIMO、OFDM、无线协作通信等。

天线。中继的半双工特性使目的节点对接收到的信号能够采用最大比合并技术进行解码,这样根据参与传输中继的个数  $M$  可把每次传输分为  $M+1$  个时隙:第一个时隙  $S$  采用广播模式向所有中继节点和目的节点  $D$  发送数据,此时  $R_i$  和  $D$  接收到的信号等效数学模型可以表示为

$$y_{r_i} = \sqrt{P_s} h_{s r_i} x + n_{r_i}, y_{sd} = \sqrt{P_s} h_{sd} x + n_{sd} \quad (1)$$

式中,  $x$  为源节点  $S$  发射的信号,且满足  $E\{|x|^2\} = 1$  ( $E\{\cdot\}$  表示期望)。  $P_s$  为源节点  $S$  发射信号的功率,  $h_{s r_i}$  和  $h_{sd}$  分别表示  $S \rightarrow R_i$  和  $S \rightarrow D$  之间的信道衰落系数,且满足相互独立的平坦瑞利分布,其均值均为 0,方差分别为  $\sigma_{s r_i}^2$  和  $\sigma_{sd}^2$ 。  $n_{r_i}$  和  $n_{sd}$  分别为中继节点  $R_i$  和目的节点  $D$  接收到的相互独立的加性高斯白噪声,均值均为 0,方差均为  $N_0$ 。

由模型可知,由于采用 DF 协议,假设能够正确解码的中继集合为

$$\Omega_{\xi} \triangleq \{R_i \in C_{relay} : \gamma_{s r_i} \geq \gamma_{th}\} \quad (2)$$

式中,  $\gamma_{s r_i} = P_s |h_{s r_i}|^2 / N_0$ ,  $\gamma_{th}$  为瞬时 SNR 门限,在瞬时 SNR 大于此门限时,就可以认为该中继能正确解码,反之,就不能正确解码。如果  $|\Omega_{\xi}| = \xi$ ,其中  $|\cdot|$  表示集合的势,那么,集合  $\Omega_{\xi}$  发生的概率为

$$\Pr(\Omega_{\xi}) = \prod_{i \in \Omega_{\xi}} \Pr\{\gamma_{s r_i} \geq \gamma_{th}\} \prod_{i \notin \Omega_{\xi}} \Pr\{\gamma_{s r_i} < \gamma_{th}\} \quad (3)$$

1. 在全选中继策略中,解码集合  $\Omega_{\xi}$  中的所有中继都参与数据转发,且每个时隙只能有一个解码集合中的中继发射数据给目的节点  $D$ ,如图 1(a)所示。此时目的节点  $D$  接收到  $R_i$  ( $R_i \in \Omega_{\xi}$ ) 发射数据的等效信号模型可以表示为

$$y_{r_i d} = \sqrt{P_{r_i}} \hat{h}_{r_i d} x + n_{r_i d} \quad (4)$$

式中,  $\hat{h}_{r_i d}$  表示中继  $R_i$  发射的数据,同样满足  $E\{|\hat{h}_{r_i d}|^2\} = 1$ 。  $P_{r_i}$  为中继  $R_i$  发射信号的功率,  $h_{r_i d}$  和  $n_{r_i d}$  分别表示  $R_i \rightarrow D$  的服从瑞利信道的系数和加性高斯白噪声,均值均为 0,方差分别为  $\sigma_{r_i d}^2$  和  $N_0$ 。

2. 机会中继选择策略根据某一策略选出最优的中继作为协作转发中继,而其他能够解码的中继不发射数据给  $D$ 。在本文中采用的单选中继策略为

$$R_{op} = \arg \max_{R_i \in \Omega_{\xi}} \{\gamma_{r_i d}\} \quad (5)$$

式中,  $\gamma_{r_i d} = P_{r_i} |h_{r_i d}|^2 / N_0$ 。即在能够解码的中继集合中,选择到目的点瞬时 SNR 最大的一个作为最优中继参与协作通信,如图 1(b)所示。

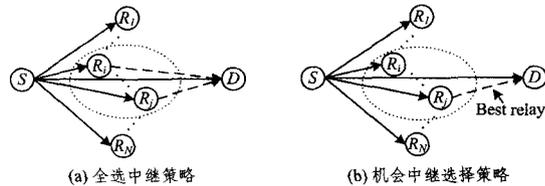


图 1 多中继选择策略协作通信网络模型

这样,目的节点  $D$  只有接收完  $M+1$  (在采用全中继选择策略时,  $M = \xi$ ; 在采用机会中继策略时,  $M = 1$ ) 个时隙发送的数据后,才能将接收到的所有信号进行合并解码。进一步可以表示  $S \rightarrow D$  的瞬时 SNR 为  $\gamma_{sd} = P_s |h_{sd}|^2 / N_0$ ,那么相应的每条信道的平均 SNR 就可以表示为  $\bar{\gamma}_{sd} = P_s \sigma_{sd}^2 / N_0$ ,  $\bar{\gamma}_{s r_i} = P_s \sigma_{s r_i}^2 / N_0$  和  $\bar{\gamma}_{r_i d} = P_{r_i} \sigma_{r_i d}^2 / N_0$ 。为了简化计算,在此令  $\bar{\gamma}_{s r_i} = \bar{\gamma}_s$  和  $\bar{\gamma}_{r_i d} = \bar{\gamma}_{rd}$ 。

### 3 性能分析

#### 3.1 全选中继策略

根据 DF 协议可知,中断事件分为两种情况:

情况 1 源和所有中继的链路中断,即

$$P_{out}^1 = \Pr(\Omega_0) = (1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}})^N \quad (6)$$

情况 2 有能够解码的中继。那么在集合  $\Omega_{\xi}$  中,系统的中断概率可以表示为

$$P_{out}^{\xi} = \Pr\{outage | \Omega_{\xi}\} \Pr\{\Omega_{\xi}\} = e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}} (1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}})^{N-\xi} \Pr\{\gamma_{sd} + \sum_{i \in \Omega_{\xi}} \gamma_{r_i d} < \gamma_{th}\} \quad (7)$$

由于  $\gamma_{r_i d}$  ( $R_i \in \Omega_{\xi}$ ) 相互独立且服从参数为  $\bar{\gamma}_{rd}$  的指数分布,因此,上式中  $\sum_{i \in \Omega_{\xi}} \gamma_{r_i d} \sim \Gamma(\xi, \frac{1}{\bar{\gamma}_{rd}})$ ,即概率密度函数(PDF)为

$$f_{\sum_{i \in \Omega_{\xi}} \gamma_{r_i d}}(x) = \frac{1}{\bar{\gamma}_{rd}^{\xi} \Gamma(\xi)} x^{\xi-1} e^{-\frac{x}{\bar{\gamma}_{rd}}}$$

$$F_{\sum_{i \in \Omega_{\xi}} \gamma_{r_i d}}(x) = \frac{1}{\bar{\gamma}_{rd}^{\xi} \Gamma(\xi)} \int_0^x t^{\xi-1} e^{-\frac{t}{\bar{\gamma}_{rd}}} dt = \frac{\Gamma(\frac{x}{\bar{\gamma}_{rd}}, \xi)}{\Gamma(\xi)}$$

$$\Pr\{\gamma_{sd} + \sum_{i \in \Omega_{\xi}} \gamma_{r_i d} < \gamma_{th}\} = \int_0^{\gamma_{th}} \frac{1}{\bar{\gamma}_{rd}^{\xi} \Gamma(\xi)} x^{\xi-1} e^{-\frac{x}{\bar{\gamma}_{rd}}} (1 - e^{-\frac{\gamma_{th}-x}{\bar{\gamma}_{sd}}}) dx = \begin{cases} \frac{\Gamma(\gamma_{th}/\bar{\gamma}_{rd}, \xi+1)}{\Gamma(\xi+1)}, & \bar{\gamma}_{sd} = \bar{\gamma}_{rd} \\ \frac{\Gamma(\gamma_{th}/\bar{\gamma}_{rd}, \xi)}{\Gamma(\xi)} - (\frac{\bar{\gamma}_{sd}}{\gamma_{sd} - \bar{\gamma}_{rd}})^{\xi} e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{sd}}}, & \bar{\gamma}_{sd} \neq \bar{\gamma}_{rd} \\ \frac{1}{\Gamma(\xi)} \Gamma(\frac{\bar{\gamma}_{sd} - \bar{\gamma}_{rd}}{\gamma_{sd} \bar{\gamma}_{rd}} \gamma_{th}, \xi), & \bar{\gamma}_{sd} \neq \bar{\gamma}_{rd} \end{cases} \quad (8)$$

因此,可得全选中继策略的中断概率为①在  $\bar{\gamma}_{sd} = \bar{\gamma}_{rd}$  时,

$$P_{out}^{AR} = (1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}})^N + \sum_{\xi=1}^N \binom{N}{\xi} e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}} (1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}})^{N-\xi} \frac{\Gamma(\gamma_{th}/\bar{\gamma}_{rd}, \xi+1)}{\Gamma(\xi+1)} \quad (9a)$$

②在  $\bar{\gamma}_{sd} \neq \bar{\gamma}_{rd}$  时,

$$P_{out}^{AR} = (1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}})^N + \sum_{\xi=1}^N \binom{N}{\xi} e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}} (1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}})^{N-\xi} \frac{1}{\Gamma(\xi)} \times [\Gamma(\gamma_{th}/\bar{\gamma}_{rd}, \xi) - (\frac{\bar{\gamma}_{sd}}{\gamma_{sd} - \bar{\gamma}_{rd}})^{\xi} \Gamma(\frac{\bar{\gamma}_{sd} - \bar{\gamma}_{rd}}{\gamma_{sd} \bar{\gamma}_{rd}} \gamma_{th}, \xi) e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{sd}}}] \quad (9b)$$

高 SNR 时,利用  $x \rightarrow 0$  时,  $\Gamma(x, \alpha) \approx \frac{x^x}{\alpha}$  和  $e^x \approx 1 + x$ ,中断概率可表示为

$$P_{out}^{AR} \approx (\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s})^N [1 + \frac{\gamma_{th}}{\gamma_{sd}} \sum_{\xi=1}^N \binom{N}{\xi} \frac{1}{\Gamma(\xi+2)} (\frac{\bar{\gamma}_s}{\bar{\gamma}_{rd}})^{\xi}] \quad (10)$$

如果在  $\bar{\gamma}_s / \bar{\gamma}_{rd} \leq 1$  时,高 SNR 的中断概率可进一步表示为

$$P_{out}^{AR} \approx (\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s})^N \quad (11)$$

由式(11)可知,在  $\bar{\gamma}_s / \bar{\gamma}_{rd} \leq 1$  和高 SNR 时,全选中继策略的中断概率只与源和所有中继的链路有关,且分集度为  $N$ 。

### 3.2 机会中继选择策略

机会中继选择策略实际上就是一种最优单中继选择策略,根据式(5)和 DF 协议可知,该系统的中断事件同样分为两种情况:

情况 1 没有能够正确解码的中继,即  $\xi=0$  时,中断概率同式(6)。

情况 2 在集合  $\Omega_\xi$  时,中断概率为

$$P_{out}^\xi = \Pr\{\Omega_\xi\} \Pr\{outage|\Omega_\xi\} \\ = e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}} (1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}})^{N-\xi} \Pr\{\gamma_{sd} + \gamma_{r_{opt,d}} < \gamma_{th}\} \quad (12)$$

因此对于该中继选择策略的总的中断概率为

$$P_{out}^{CR} = \Pr(\Omega_0) + \sum_{\xi=1}^N \Pr\{\Omega_\xi\} \Pr\{outage|\Omega_\xi\} \\ = (1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}})^N + (1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}})^N \times \sum_{\xi=1}^N \binom{N}{\xi} e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}} (1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}})^{-\xi} \Pr\{\gamma_{sd} + \gamma_{r_{opt,d}} < \gamma_{th}\} \quad (13)$$

由式(5)可知  $\gamma_{r_{opt,d}} = \max_{R_i \in \Omega_\xi} \{\gamma_{r,d}\}$ , 因此,  $\gamma_{r_{opt,d}}$  的 CDF 为

$$F_{\gamma_{r_{opt,d}}}(x) = \Pr\{\gamma_{r_{opt,d}} < x\} = \prod_{i \in \Omega_\xi} \Pr\{\gamma_{r,d} < x\} = (1 - e^{-\frac{x}{\bar{\gamma}_{rd}}})^\xi \quad (14)$$

把式(14)代入式(13),则式(13)的第二项

$$(1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}})^N \sum_{\xi=1}^N \binom{N}{\xi} e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}} (1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}})^{-\xi} \Pr\{\gamma_{sd} + \gamma_{r_{opt,d}} < \gamma_{th}\} \\ = (1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}})^N \left\{ \sum_{\xi=0}^N \left[ \binom{N}{\xi} e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}} (1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}})^{-\xi} \times \int_0^{\gamma_{th}} (1 - e^{-\frac{\gamma_{th}-x}{\bar{\gamma}_{rd}}})^\xi \frac{1}{\bar{\gamma}_{sd}} e^{-\frac{x}{\bar{\gamma}_{sd}}} dx \right] - \int_0^{\gamma_{th}} \frac{1}{\bar{\gamma}_{sd}} e^{-\frac{x}{\bar{\gamma}_{sd}}} dx \right\} \\ = (1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}})^N \left\{ \int_0^{\gamma_{th}} \frac{1}{\bar{\gamma}_{sd}} e^{-\frac{x}{\bar{\gamma}_{sd}}} \sum_{\xi=0}^N \binom{N}{\xi} \left( \frac{e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}} - e^{-\frac{\gamma_{th}-x}{\bar{\gamma}_s}}}{e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}} - e^{-\frac{\gamma_{th}-x}{\bar{\gamma}_s}}} \right)^\xi dx + e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{sd}}} - 1 \right\} \\ = \frac{1}{\bar{\gamma}_{sd}} \int_0^{\gamma_{th}} e^{-\frac{x}{\bar{\gamma}_{sd}}} (1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}} e^{\frac{x}{\bar{\gamma}_s}})^N dx + (e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{sd}}} - 1) (1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}})^N \quad (15)$$

式中,  $\bar{\gamma}_r = \bar{\gamma}_s \bar{\gamma}_{rd} / (\bar{\gamma}_s + \bar{\gamma}_{rd})$ 。

$$\text{令 } Q_i \triangleq \int_0^{\gamma_{th}} \frac{\bar{\gamma}_{sd} - \bar{\gamma}_{rd}}{\bar{\gamma}_{sd} \bar{\gamma}_{rd}} e^{-\frac{\gamma_{th}-x}{\bar{\gamma}_{sd} \bar{\gamma}_{rd}}} dx =$$

$$\begin{cases} \gamma_{th}, & i = \frac{\bar{\gamma}_{rd}}{\bar{\gamma}_{sd}} \\ \frac{\bar{\gamma}_{sd} \bar{\gamma}_{rd}}{i \bar{\gamma}_{sd} - \bar{\gamma}_{rd}} (e^{-\frac{\bar{\gamma}_{sd} - \bar{\gamma}_{rd}}{\bar{\gamma}_{sd} \bar{\gamma}_{rd}} \gamma_{th}} - 1), & i \neq \frac{\bar{\gamma}_{rd}}{\bar{\gamma}_{sd}} \end{cases}$$

最后,可得该最优单中继选择策略的中断概率为

$$P_{out}^{CR} = e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{sd}}} (1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}})^N + \frac{1}{\bar{\gamma}_{sd}} \sum_{i=0}^N \binom{N}{i} \left( e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}} \right)^i Q_i \quad (16)$$

高 SNR 时,根据  $e^x \approx 1+x$ ,式(16)可以简化为

$$P_{out}^{CR} \approx \left( \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s} \right)^N - \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s} \left( \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s} \right)^N + \frac{\bar{\gamma}_{rd}}{(N+1)\bar{\gamma}_{sd}} \left[ \left( \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s} \right)^{N+1} - \left( \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s} \right)^{N+1} \right] \quad (17)$$

如果忽略 SNR 倒数的  $N+1$  次项,那么式(17)可进一步表示为

$$P_{out}^{CR} \approx \left( \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s} \right)^N \quad (18)$$

比较式(11)和式(18)可知,高 SNR 时,全选中继策略的中断概率性能和最优的单选中继策略性能近似相等,这主要取决于源-中继链路的性能和数目,且其分集度为  $N$ 。

### 4 性能仿真分析

假设任意两节点之间的信道性能服从大尺度路径损耗模型<sup>[3,13]</sup>,即  $\sigma_{ij}^2 \propto (\frac{d_0}{d_{ij}})^{-\kappa}$ ,其中  $d_0$  为参考距离,  $d_{ij}$  表示节点  $i$  和节点  $j$  之间的距离,  $\kappa$  为路径损耗指数,在城市微小区  $\kappa \in [2.7, 3.5]$ <sup>[15]</sup>,在此取  $\kappa=3$ ,取平均路径损耗的常数  $K=1$ 。在此假设所有中继距离源节点  $S$  和目的节点  $D$  的距离远远大于任意俩中继节点之间的距离,这样就可以把每一个中继与源节点  $S$  和目的节点  $D$  之间的距离近似相等,即  $d_{SR_i} = d_{SR}$ ,  $d_{R_iD} = d_{RD}$ ,且要满足  $d_{SD} \leq d_{SR} + d_{RD}$ ,在此采用  $d_{SD} = d_{SR} + d_{RD}$ ,即  $S, R_i, D$  近似看成在同一直线上。预设固定速率  $R=2$  bps/Hz,且令每个节点的发射功率相等,令  $\eta = d_{SR} / (d_{SR} + d_{RD})$ 。

图 2 给出了  $\sigma_s^2 = \sigma_{rd}^2 = \sigma_{sd}^2 = 1$  时的全选中继和最优单选中继的中断概率随 SNR 变化的性能曲线。从图 2 可以看出,在高 SNR 时,两种策略的中断概率性能曲线基本重合,且式(11)或式(18)很好地逼近精确中断概率的性能。在低 SNR 时,全选中继策略性能优于最优的单选中继策略性能。图 3—图 6 分别给出了不同信道质量(或中继不同相对位置)时,中断概率随 SNR 变化的性能曲线。从图 3 和图 4 中可以看出,式(10)和式(17)在高 SNR 时,能很好地逼近精确中断概率性能曲线,而式(11)或式(18)在图 3 和图 4 显示的信噪比范围虽然没有能够逼近精确中断性能曲线,但实际上有逼近的趋势,如果在图中给出足够高的 SNR 范围,其近似性能曲线也会逼近精确的中断性能曲线。而从图 5 和图 6 中可以看出,式(11)或式(18)在高 SNR 时得出的近似性能曲线很好地逼近精确性能。比较图 3—图 6 的两种策略的精确性能曲线,我们可以发现:在足够高的 SNR 情况下,这两种策略的性能可以近似相同;在相同的低 SNR 情况下,随着中继节点数目的增大,全选中继策略性能越来越优于最优单中继选择策略;在源-中继链路性能越是优于中继-目的节点链路的性能(或中继越是靠近源节点)的情况下,全选中继策略的性能越是优于最优单选中继策略的性能,但是,在源-中继链路性能与中继-目的节点链路的性能相比相差不大或者较差(或中继越靠近目的节点)的情况下,两种策略的中断概率性能在高 SNR 时基本相同。

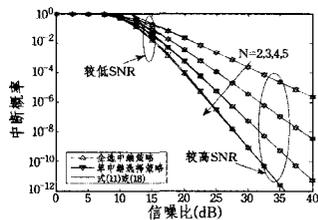


图 2  $\sigma_s^2 = \sigma_{rd}^2 = \sigma_{sd}^2$  时,中断概率随 SNR 变化的曲线

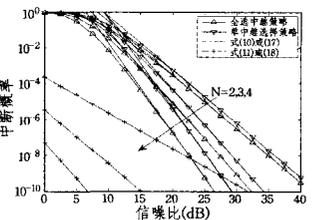


图 3  $\eta=0.1$  时,中断概率随 SNR 变化的曲线

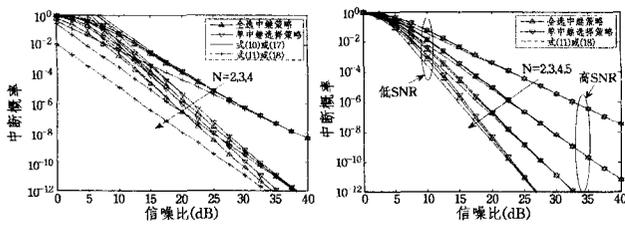


图4  $\eta=0.35$  时,中断概率随 SNR 变化的曲线

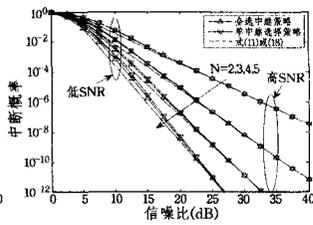


图5  $\eta=0.5$  时,中断概率随 SNR 变化的曲线

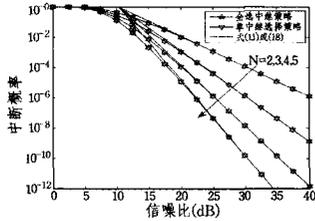


图6  $\eta=0.9$  时,中断概率随 SNR 变化的曲线

图7和图8进一步给出了低SNR(5dB)和相对较高SNR(30dB)时这两种策略中断概率随着信道性能(或中继位置)变化的性能曲线。从图中可以看出,不管是在高SNR还是低SNR时,在中继-目的节点链路性能越是优于源-中继链路的性能(或中继位置越靠近目的节点),两种策略的中断概率性能基本相同,且不管在任何SNR的情况下,最优中继位置更靠近源节点。从图7可以看出,在低SNR时,随着中继节点数目的增多,全选中继策略的最优中继位置慢慢靠近源节点,而最优单选中继策略的最优中继位置在源与目的节点的中间稍偏向源的位置变化不大。从图8可以看出,在高SNR时,两种策略的最优中继位置随着中继数目的增大而稍微移向源和目的节点的中点。

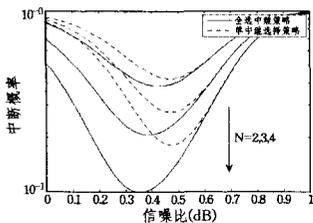


图7 SNR=5dB 时,中断概率随  $\eta$  变化的曲线

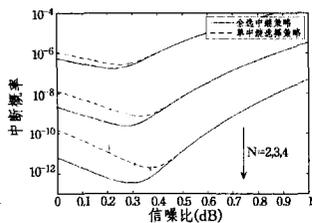


图8 SNR=30dB 时,中断概率随  $\eta$  变化的曲线

综上,根据这两种策略的中断概率性能推导和仿真分析,得出基于DF的中继选择策略具有如下性质:

- 1)在SNR足够高的情况下,中断概率主要取决于源-中继链路的性能和数目,全选中继策略和最优单选中继策略具有基本相同的中断概率性能;
- 2)在中继-目的节点的链路性能优于源-中继链路的性能(或被选中继大多更靠近目的节点)时,全选中继策略和最优单选中继策略具有相同的中断概率性能;
- 3)在SNR不是很高的情况下,源-中继链路的性能越是优于中继-目的节点的链路性能(或被选中继越是靠近源节点)时,全选中继策略的性能越是优于最优单选中继策略的中断概率性能。

**结束语** 本文对基于DF协议下的中继选择策略、全选中继策略和最优单选中继策略的中断性能进行了详细的推导,给出了两种策略的中断概率精确闭式结果和高SNR时的近似简化结果。通过理论分析和数值仿真,总结了这两种策略的几个重要性能关系,从而为中继选择提供了参考。

## 参考文献

- [1] Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. User cooperation diversity, parts I & II[J]. IEEE Transactions Communications, 2003, 15(11):1927-1948
- [2] Laneman J N, Tse D N C, Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080
- [3] Nabar R U, Bölcskei H, Kneubühler F W. Fading relay channels: Performance limits and space-time signal design[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(6): 1099-1109
- [4] Host-Madsen A, Zhang J. Capacity bounds and power allocation for wireless relay channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(6): 2020-2040
- [5] 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
- [6] Bletsas A, Shin H, Win M Z. Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(9): 3450-3460
- [7] 张南,葛建华,官奎奎. Nakagami-m 衰落信道下机会中继系统的性能研究[J]. 华南理工大学学报, 2010, 38(6): 24-28
- [8] 啜钢,刘振兴,王涛. Nakagami-m 信道下 DAF 选择中继的中断性能分析[J]. 北京邮电大学学报, 2011, 34(1): 80-84
- [9] 吴素文,吕星哉,朱近康,等. 基于信道统计特性的中继选择策略算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(5): 1077-1081
- [10] 司江勃,李赞,刘增基,等. 瑞利信道中存在干扰时的机会中继性能分析[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(4): 106-109
- [11] Rui Xian-yi. Short communication Decode-and-forward with partial relay selection[J]. International Journal of Communication Systems, 2010, 23: 1443-1448
- [12] Chen Xu, Zhou Q F, Siu Ting-Wai, et al. Asymptotic analysis of opportunistic relaying based on the max-generalized-mean selection criterion[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(4): 1050-1057
- [13] Kaneko M, Hayashi K, Popovski P, et al. Amplify-and-forward cooperative diversity schemes for multi-carrier systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(5): 1845-1850
- [14] da Costa D B, Aissa S. Amplify-and-forward relaying in channel-noise-assisted cooperative networks with relay selection [J]. IEEE Communications Letter, 2010, 14(7): 608-610
- [15] Goldsmith A. Wireless communications [M]. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2005: 39-41