



基于门限决策的 SDF 中继选择策略性能分析

章坚武¹, 蒋静¹, 包建荣^{1,2}, 姜斌¹

(1. 杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018;

2. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 中继协作传输能有效克服信道衰落影响, 提高分集效果。为了提高全天候协作系统的频谱效率, 在选择解码转发协议的前提下, 研究了基于门限决策的中继选择策略, 分析了其性能, 并推导了高信噪比下的中断概率和频谱效率的近似表达式。仿真表明, 在低信噪比和较少中继的场景中, 不同门限下的中断概率十分接近, 如果协作门限增加 0.09, 系统频谱效率可提高 0.12; 在高信噪比和较多中继的场景中, 不同门限下的频谱效率较为接近, 当系统中断概率为 10^{-2} 时, 如果协作门限减少 0.9, 可获得约 1.1 dB 的信噪比增益。

关键词: 选择解码转发; 中继选择; 门限决策; 中断概率; 频谱效率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016003

Performance analysis of relay selection strategy with selective decode-and-forward protocol based on threshold decision

ZHANG Jianwu¹, JIANG Jing¹, BAO Jianrong^{1,2}, JIANG Bin¹

1. College of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

2. National Key Laboratory of Mobile Communication, Southeast University, Nanjing 210096, China

Abstract: Cooperative transmission can effectively overcome performance degradation caused by channel fading and thus improve diversity effect. In order to improve the spectral efficiency of all-time cooperative, relay selection strategy with selective decode-and-forward protocol based on threshold decision was mainly investigated. The performance was also analysed and the approximate expression of the outage probability and the spectrum efficiency with high signal-to-noise(SNR) were derived. Simulation results show that under low-SNR and few relays circulations, the outage probability under different thresholds are very close. If the collaboration threshold increases by 0.09, the spectral efficiency improves by 0.12. Under high-SNR and many relays circulations, the spectral efficiency under different thresholds are similar. When the system outage probability is 10^{-2} , the collaboration threshold decreases by 0.9 and 1.1 dB SNR gain can be obtained.

Key words: selective decode-and-forward, relay selection, threshold decision, outage probability, spectrum efficiency

收稿日期: 2015-03-20; 修回日期: 2015-11-16

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(No. LZ14F010003); 国家自然科学基金资助项目(No. 61471152); 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金资助项目(No. 2014D02)

Foundation Items: The Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (No. LZ14F010003), The National Natural Science Foundation of China (No. 61471152), The Open Research Fund of National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University (No. 2014D02)

1 引言

协作通信通过中继节点参与协作而获得分集增益。选择的中继越多,用户传输速率越大,但功耗和成本随之增加。其中,信道情况差的中继还会使系统性能下降,并消耗额外能量。故如何合理选择中继已成为协作通信领域的关键问题之一^[1]。目前,对中继选择算法的研究有很多。参考文献[2]提出了协同中继选择技术的评价标准,并分类分析和比较了各类算法的原理和效果。如在基于解码转发(decode-and-forward, DF)的多中继两跳协作场景中,中继选择方案提出了基于负载均衡的中继选择方案,利用该方案可同时满足中继负载均衡和系统传输速率的需求^[3]。参考文献[4]提出了一种解码转发协同通信网络下的自适应中继选择算法,在获取最优中断性能的同时能降低系统功率开销。另外,利用译码集合所有中继^[5]参与协同传输,能获得最优中断性能,但会导致频谱效率降低。为了弥补“全中继”协同的不足,也可采用机会中继(opportunistic relaying, OR)提高频谱效率,且通过选择最佳中继转发信息,可获得与“全中继”协同等效的分集增益,并降低了系统复杂度^[6,7]。参考文献[8]在保证频谱效率的前提下,导出了MIMO系统中源和中继的最优功率分配系数,可获得最大的能量效率。为了减少功耗,最佳中继预编码方案可最小化中继总功率,以满足绿色通信^[9]。对于绿色双跳单天线中继系统,参考文献[10]从能效角度研究了联合信源和中继的功率分配优化问题,证明了最佳中继和信源的功率比能够自适应于两跳信道的瞬时增益比。参考文献[11]和参考文献[12]分别分析了多单元小区环境下存在小区干扰时的DF机会中继选择策略的性能。而选择解码转发(selective decode-and-forward, SDF)协议的出现,克服了DF中继解码错误但仍参与协同的缺陷^[13]。参考文献[14]分析了基于SDF协议的不同中继选择策略的性能,并给出了高信噪比时的中断概率的近似表达式和分集复用折中。

然而,以上研究均假定了任何时候都依靠中继节点协作传输,而不管中继链路质量,也未考虑频谱效率。故均属于全天候中继协作方案,且协作传输频谱效率仅为1/2。Ray K J等人^[15]提出了单中继场景下的“何时协作”思想:仅当中继链路性能较好时才协作。本文主要借鉴该思想,提出了一种在SDF协议下的基于门限决策的中继选择策略,并推导了其在高信噪比下系统中断概率和频谱效率的近似

表达式。此外,通过仿真与分析,得出了该策略可根据不同协作场景而选择合适的协作门限,从而提高系统整体性能。

2 系统模型

该策略研究的经典多中继两跳协作通信系统模型如图1所示,包括一个源节点S、一个目的节点D和N个中继节点 $R_i(i=1,2,\dots,N)$ 。设每节点都只有一根全向天线,并采用半双工模式传输。当需要源节点重传和中继协作时,完成每次传输则分为两个时隙。另外,假设各信道链路都经历准静态瑞利平坦衰落,信道增益在一次传输中保持不变,且在各次传输中相互独立。假定每节点可通过接收数据获得理想信道状态信息(channel state information, CSI)估计,数据在传输中受到独立同分布的加性高斯白噪声(additive white gaussian noise, AWGN)影响。

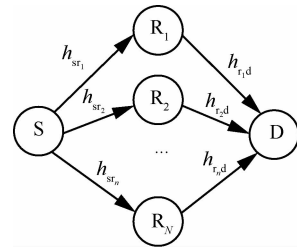


图1 多中继两跳协作系统模型

根据上述假设,在第一时隙,源节点将信号 x_s 同时广播给中继节点和目的节点。目的节点D和中继节点 $R_i(i=1,2,\dots,N)$ 收到的信号分别为:

$$y_{sd} = \sqrt{P_s h_{sd}} x_s + n_{sd} \quad (1)$$

$$y_{si} = \sqrt{P_s h_{si}} x_s + n_{si} \quad (2)$$

其中, P_s 为源节点S的发送功率, h_{sd} 和 h_{si} 分别是S-D和S- R_i 链路的信道系数,且服从均值为0、方差分别为 δ_{sd}^2 和 δ_{si}^2 的复高斯随机分布,且包络服从瑞利分布,而 n_{sd} 和 n_{si} 表示S-D和S- R_i 链路的加性白高斯噪声,都服从均值为0、方差为 N_0 的复高斯随机分布。

在第二时隙,能正确解码源节点信息的中继,构成了候选中继集合 Ω_k ,目的节点选出候选集中到其瞬时信道质量最好的中继为最佳中继,最佳中继 R_b 向目的节点转发源节点信息。此时,目的节点接收信号为:

$$y_{bd} = \sqrt{P_{R_b}} h_{bd} x_{R_b} + n_{bd} \quad (3)$$

其中, P_{R_b} 为最佳中继节点 R_b 的发送功率, x_{R_b} 是最佳中继 R_b 对 x_s 译码后得到的信号。 h_{bd} 是 R_b -D链路的信道



系数,服从均值为0、方差为 δ_{sd}^2 的复高斯随机分布。 n_{sd} 表示 R_i -D链路的加性白高斯噪声,服从均值为0、方差为 N_0 的复高斯随机分布。

最后,目的节点采用最大比合并(maximal ratio combining, MRC)将两时隙收到的信号合并,得到:

$$y = a_1 y_{\text{sd}} + a_2 y_{\text{rd}} \quad (4)$$

其中, a_1 和 a_2 为合并因子,需根据不同的协作传输方式选择相应的合并因子。当最佳中继参与协作传输时,采用DF协议转发信号,此时选择 $a_1 = \sqrt{P_s} h_{\text{sd}}^*/N_0$, $a_2 = \sqrt{P_R} h_{\text{rd}}^*/N_0$ 。

若所有中继均无法正确解码源节点信息,则通知源节点重传信息至目的节点。此时,选择 $a_1=2$, $a_2=0$ 。

3 基于门限决策的SDF中继选择策略

在DF协议中,若中继译码不正确,就可能把错误信号转发给目的节点,从而降低系统性能。而SDF协议为了避免DF中继的错误传播问题,只在中继正确译码时才转发源节点信号。否则,源节点重传信息。在多中继情况下,若任何一个中继都不能正确解码,就采用源节点重传模式。

中继选择的目的是在保持与传统协作通信方案相同分集增益的同时,提高系统频谱效率。对于全天候协作,不管中继链路和S-D链路质量的好坏都保持协作,虽能获得较好分集效果,但整个协作系统频谱效率仅为1/2,降低了系统容量。若S-D直传链路性能非常好,中继就无需参与协作。故为了折中分集效果和频谱效率,定义最佳中继协作能力的度量 β_n ,目的节点计算 β_n 与源-目的节点瞬时信道增益 β_{sd} 的比值,并将该比值与协作门限 α 比较,再决定是否需要中继协作。

设源节点和中继节点发送功率分别为 P_s 和 P_R ($i=1,2,\dots,N$),信息传输速率为 V ,源节点的发送信噪比为: $\text{SNR} = P_s/N_0$ 。中继在第一时间隙收到源节点信息后,若要正确解码,需S- R_i 链路的瞬时信噪比 γ_{sr} 不小于信噪比门限 γ_{th} 。因此,候选中继集合可表示为:

$$\Omega_k = \{R_i: \gamma_{\text{sr}} \geq \gamma_{\text{th}}\} \quad (5)$$

其中, $\gamma_{\text{sr}} = P_s |h_{\text{sr}}|^2 / N_0 = \text{SNR} |h_{\text{sr}}|^2$,表示中继 R_i 接收源节点信号的瞬时信噪比,服从参数为 $\overline{\gamma_{\text{sr}}} = 1/(\text{SNR} \cdot \delta_{\text{sr}}^2)$ 的指数分布, $\gamma_{\text{th}} = 2^{2R} - 1$ 。

若所有中继均无法正确译码,即候选中继集合 Ω_k 为空集,则采用源节点重传模式。源节点重传事件可定义为:

$$\phi^{\text{DRT}} = \{\Omega_k = \emptyset\} \quad (6)$$

此时,系统传输的互信息量为:

$$I_{\text{DRT}} = 1/2 \cdot \log(1 + 2\gamma_{\text{sd}}) \quad (7)$$

其中, $\gamma_{\text{sd}} = \text{SNR} |h_{\text{sd}}|^2$,表示目的节点接收源节点信号的瞬时信噪比,服从参数为 $\overline{\gamma_{\text{sd}}} = 1/(\text{SNR} \cdot \delta_{\text{sd}}^2)$ 的指数分布。

若候选集合 Ω_k 非空,则在第二时隙,正确解码中继 $R_i \in \Omega_k$ 向目的节点发送训练序列。在所有能正确解码的中继节点中,选择 R_i -D链路的瞬时信噪比最大的一个作为最优中继,即可表示为:

$$R_b = \arg \max_{R_i \in \Omega_k} \{\gamma_{\text{rd}}\} \quad (8)$$

其中, $\gamma_{\text{rd}} = P_R |h_{\text{rd}}|^2 / N_0$,表示目的节点接收中继转发信号的瞬时信噪比,服从参数为 $\overline{\gamma_{\text{rd}}} = 1/(P_R \delta_{\text{rd}}^2 / N_0)$ 的指数分布。

由式(8)可知, γ_{rd} 的大小主要与 P_R 和 $|h_{\text{rd}}|^2$ 有关。令 $P_R = \beta_i P_0$,其中 P_0 为系统发送总功率, β_i 为中继功率分配系数,通过对所有中继分配不同的功率可达到中继选择的目的。但该方法不能即时地考虑信道增益 $|h_{\text{rd}}|^2$ 对接收端瞬时信噪比 γ_{rd} 的影响,信道质量差的中继不能给整个系统性能带来改善,反而会浪费系统资源。若想系统获得更好性能,则需综合考虑瞬时信道增益 $|h_{\text{rd}}|^2$ 和中继发送功率 P_R 对中继选择的影响。当 $|h_{\text{rd}}|^2$ 发生改变时,需及时地调整功率分配系数 β_i ,以使中继选择效果更佳,从而实现自适应调整。然而,根据瞬时信道增益 $|h_{\text{rd}}|^2$ 对中继节点进行功率分配,虽能使系统性能提升,但要实时获取所有中继的瞬时信道增益 $|h_{\text{rd}}|^2$,这将导致系统开销较大,且相应的中继功率分配算法的复杂度也较高。

因此,为了降低系统开销及算法复杂度,本文假定在等功率分配条件下,即 $P_s = P_R$ 时,根据瞬时信道增益 $|h_{\text{rd}}|^2$ 进行中继节点的选择,即有:

$$R_b = \arg \max_{R_i \in \Omega_k} \{h_{\text{rd}}\} \quad (9)$$

此时,目的节点计算 R_b 协作能力度量 $\beta_n = |h_{\text{rd}}|^2$,通过在第一时间隙估计的其到源节点的信道系数 h_{sd} ,又可得源-目的节点之间的瞬时信道增益 $\beta_{\text{sd}} = |h_{\text{sd}}|^2$,且 $|h_{\text{rd}}|^2$ 和 $|h_{\text{sd}}|^2$ 分别服从参数为 $1/\delta_{\text{rd}}^2$ 和 $1/\delta_{\text{sd}}^2$ 的指数分布。最后,目的节点计算比值 $\beta_n/\beta_{\text{sd}}$,并将其与协作门限 α 比较。若 $\beta_n/\beta_{\text{sd}} < \alpha$,说明最佳中继传输信道不理想,若采用中继协作传输将降低系统性能。因此,仅直接传输,无需中继协作传输。故直接传输事件可定义为:

$$\phi^{\text{DT}} = \{\beta_n/\beta_{\text{sd}} < \alpha\} \quad (10)$$

直传模式下,系统互信息量为:

$$I_{\text{DT}} = 1/2 \cdot \log(1 + \gamma_{\text{sd}}) \quad (11)$$

若 $\beta_n/\beta_{\text{sd}} > \alpha$,则说明最佳中继信道特性理想,此时,目的

节点可发出一个控制指令来通知该最佳中继协作传输。故协作传输事件可定义为:

$$\phi^c = \{\beta_{ri}/\beta_{sd} \geq \alpha\} \quad (12)$$

可得中继协作传输的系统互信息量为:

$$I_{DT} = 1/2 \cdot \ln(1 + \gamma_{sd} + \gamma_{rd}) \quad (13)$$

其中, $\gamma_{rd} = P_s |h_{rd}|^2 / N_0 = SNR |h_{rd}|^2$, 服从参数为 $\overline{\gamma_{rd}} = 1/(SNR \cdot \delta_{rd}^2)$ 的指数分布, 表示最佳中继到目的节点的瞬时信噪比。

综上所述, 基于门限决策的 SDF 中继选择策略流程如下。

(1) 源节点 S 广播信息, 目的节点和 N 个中继分别估计 h_{sd} 和 h_{si} , 从而获得 β_{sd} 和 γ_{si} 。

(2) 中继处设置信噪比门限 γ_{th} , 分别与其瞬时信噪比 γ_{si} 相比较, 若 $\gamma_{si} \geq \gamma_{th}$, 将 R_i 放入中继候选集合。

(3) 若 $\Omega_k = \emptyset$, 则采用源节点重传。

(4) 若 $\Omega_k \neq \emptyset$, 取 $R_b = \arg \max_{R_i \in \Omega_k} \{h_{rd}\}$, 得到 β_{rd} 。

(5) 计算 β_{ri}/β_{sd} , 若 $\beta_{ri}/\beta_{sd} \geq \alpha$, 则采用最佳中继 R_b 实现协作传输; 否则, 中继不参与协作。

4 性能分析

4.1 中断概率

中断概率是衡量无线通信中断事件发生频率的参数, 是系统可靠传输的一项重要指标。当系统传输的互信息量小于实际信息传输速率 V 时, 就会发生中断。从之前描述的中继选择策略流程可知, 中断事件主要发生在以下 3 种情况: 一是第一时隙所有中继均不能正确译码, 根据 SDF 协议将采用源节点重复发送方式; 二是从正确译码中继候选集中选出的最佳中继协作能力较弱, 则中继不参与协作传输, 仅采用直接传输; 三是最佳中继协作能力较好, 则该中继转发源节点信息。因此, 该中继选择策略的系统中断概率可表示为:

$$P_{int} = P_1^{int} + P_2^{int} + P_3^{int} \quad (14)$$

其中, P_1^{int} 表示采用源节点重传方式的中断概率, P_2^{int} 表示仅采用直接传输的中断概率, P_3^{int} 表示采用最佳中继协作传输的中断概率。

若中继候选集合 Ω_k 为空集, 即所有中继均不能正确解码源节点信息 (所有中继满足 $\gamma_{si} < \gamma_{th}$), 则可采用源节点重传方式。当系统传输的互信息量小于信息传输速率 V , 即 $I_{DRT} < V$ 时, 发生中断, 此时有:

$$1/2 \cdot \ln(1 + 2\gamma_{sd}) < V \quad (15)$$

可得 $\gamma_{sd} < \gamma_{th}/2$, 结合前面定义的源节点重传事件, P_1^{int} 可表示为:

$$\begin{aligned} P_1^{int} &= \Pr(\phi^{DRT}) \times P_{DRT}^{out} \\ &= \prod_{i=1}^N \Pr(\gamma_{si} < \gamma_{th}) \Pr(\gamma_{sd} < \gamma_{th}/2) \\ &= \left(1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{th}}{\gamma_{sr}}\right)\right)^N \left(1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{th}}{2\gamma_{sd}}\right)\right) \end{aligned} \quad (16)$$

其中, 为了降低复杂度, 取 $\overline{\gamma_{sr}} = \overline{\gamma_{si}} = 1/(SNR \cdot \delta_{sr}^2)$ 。在高信噪比时, 根据 $x \rightarrow 0$, 满足 $e^x \approx 1 + x$, 式 (16) 可重新表示为:

$$P_1^{int} \approx \left(\frac{\gamma_{th}}{\gamma_{sr}}\right)^N \frac{\gamma_{th}}{2\gamma_{sd}} \quad (17)$$

当候选集合 Ω_k 不为空集时, 需选出最佳中继, 若其协作能力较弱, 仅进行直传传输。当 $I_{DT} < V$, 产生中断, 即有 $\gamma_{sd} < \gamma_{th}$, 于是可得:

$$P_{DT}^{out} = \Pr(\gamma_{sd} < \gamma_{th}) \quad (18)$$

根据直传事件定义, 可知为:

$$P_2^{int} = \Pr(\Omega_k) \times \Pr(\phi^{DT}) \times P_{DT}^{out} \quad (19)$$

设 N 个中继节点中有 K 个能正确解码, 则中继候选集 Ω_k 发生的概率为:

$$\begin{aligned} \Pr(\Omega_k) &= C_N^K \prod_{i \in \Omega_k} \Pr(\gamma_{si} \geq \gamma_{th}) \prod_{i \notin \Omega_k} \Pr(\gamma_{si} < \gamma_{th}) \\ &= C_N^K \exp\left(-\frac{K\gamma_{th}}{\gamma_{sr}}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{th}}{\gamma_{sr}}\right)\right)^{N-K} \end{aligned} \quad (20)$$

其中, $C_N^K = N!/K!(N-K)!$ 。

当最佳中继协作能力度量与源—目的节点瞬时信道增益的比值小于协作门限时, 说明中继信道情况较差, 此时仅采用直接传输。因此, 直传事件 ϕ^{DT} 发生的概率为:

$$\begin{aligned} \Pr(\phi^{DT}) &= \Pr(\beta_{ri}/\beta_{sd} < \alpha) \\ &= \Pr(SNR|h_{rd}|^2 < \alpha SNR|h_{sd}|^2) \\ &= \Pr(\gamma_{rd} < \alpha\gamma_{sd}) \end{aligned} \quad (21)$$

其中, $\gamma_{rd} = \max_{R_i \in \Omega_k} \gamma_{rd}$ 。若最佳中继到目的节点的瞬时信噪比 $\gamma_{rd} < \alpha\gamma_{sd}$, 则对所有中继均有 $\gamma_{rd} < \alpha\gamma_{sd}$, 可得:

$$\begin{aligned} \Pr(\phi^{DT}) &= \prod_{i=1}^k \Pr(\gamma_{rd} < \alpha\gamma_{sd}) \\ &= \left(1 - \exp\left(-\frac{\alpha\gamma_{sd}}{\gamma_{rd}}\right)\right)^K \end{aligned} \quad (22)$$

其中, 为了降低复杂度, 可取 $\overline{\gamma_{rd}} = \overline{\gamma_{rd}} = 1/(SNR \cdot \delta_{rd}^2)$ 。将式 (18)、式 (20) 和式 (22) 代入式 (19) 可得:

$$P_2^{int} = C_N^K \exp\left(-\frac{K\gamma_{th}}{\gamma_{sr}}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{th}}{\gamma_{sr}}\right)\right)^{N-K} \times$$



$$\left(1 - \exp\left(-\frac{\alpha\gamma_{sd}}{\gamma_{nl}}\right)\right)^K \times \left(1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{th}}{\gamma_{sl}}\right)\right) \quad (23)$$

在高信噪比情况下,同理可得:

$$P_2^{\text{out}} \approx C_N^K \left(\frac{\gamma_{th}}{\gamma_{sr}}\right)^{N-K} \left(\frac{\alpha\gamma_{sd}}{\gamma_{nl}}\right)^K \frac{\gamma_{th}}{\gamma_{sl}} \quad (24)$$

当最佳中继协作能力较强时,中继才参与协作传输。

若 $I_{\text{DF}} < \gamma$, 就产生中断, 此时可得 $\gamma_{sl} + \gamma_{nl} < \gamma_{th}$, 即有:

$$P_{\text{DF}}^{\text{out}} = \Pr(\gamma_{sl} + \gamma_{nl} < \gamma_{th}) \quad (25)$$

由协作传输事件定义可知 $\Pr(\phi^c) = 1 - \Pr(\phi^{\text{DT}})$ 。因此 P_3^{out} 可表示为:

$$\begin{aligned} P_3^{\text{out}} &= \Pr(\Omega_k) \Pr(\phi^c) \times P_{\text{DF}}^{\text{out}} \\ &= C_N^K \exp\left(-\frac{K\gamma_{th}}{\gamma_{sr}}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{th}}{\gamma_{sr}}\right)\right)^{N-K} \times \\ &\quad \left(1 - \left(1 - \exp\left(-\frac{\alpha\gamma_{sd}}{\gamma_{nl}}\right)\right)^K \times \left(1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{th} - \gamma_{nl}}{\gamma_{sl}}\right)\right)\right) \end{aligned} \quad (26)$$

同理, 高信噪比下的 P_3^{out} 可表示为:

$$P_3^{\text{out}} \approx C_N^K \left(\frac{\gamma_{th}}{\gamma_{sr}}\right)^{N-K} \left(1 - \left(\frac{\alpha\gamma_{sd}}{\gamma_{nl}}\right)^K\right) \left(\frac{\gamma_{th} - \gamma_{nl}}{\gamma_{sl}}\right) \quad (27)$$

因此, 根据式(17)、式(24)和式(27), 合并 3 种中断情况, 可得高信噪比条件下, 该中继选择策略的系统中断概率近似为:

$$P^{\text{out}} \approx \left(\frac{\gamma_{th}}{\gamma_{sr}}\right)^N \frac{\gamma_{th}}{2\gamma_{sl}} + C_N^K \left(\frac{\gamma_{th}}{\gamma_{sr}}\right)^{N-K} \left(\frac{\gamma_{th} - \gamma_{nl}}{\gamma_{sl}} + \left(\frac{\alpha\gamma_{sd}}{\gamma_{nl}}\right)^K \frac{\gamma_{nl}}{\gamma_{sl}}\right) \quad (28)$$

由式(28)可知: 当信噪比门限 γ_{th} , S-D 信道链路和 N 个中继信道情况都给定时, 即 γ_{th} , $\overline{\gamma_{sr}}$, $\overline{\gamma_{sl}}$, $\overline{\gamma_{nl}}$, γ_{nl} 都固定时, 该中继选择策略的中断概率与协作门限 α 成正比。随着 α 增大, 最佳中继协作能力度量与 S-D 瞬时信道增益的比值大于 α 的概率越低, 中继协作传输机会越小。故此时对应的中断概率将有所提高。

4.2 频谱效率

频谱效率也称单位频带的吞吐量, 表示单位频带、单位时间里能正确传输的信息。可令带宽 $B=1$ Hz, 则频谱效率 $\bar{R} = V/B = V$ bit/(Hz·s)。假定直接传输的频谱效率为 1 bit/(Hz·s), 则本文所提基于门限决策的 SDF 中继选择策略的频谱效率包含两部分: 直传模式、源节点重传和中继协作传输, 直接传输的频谱效率为 1, 源节点重传和中继协作传输的频谱效率均为 1/2。因此, 该策略的频谱效率可表示为:

$$\bar{R} = \Pr(\phi^{\text{DT}}) + \frac{1}{2} \times (\Pr(\phi^c) + \Pr(\phi^{\text{DRF}}))$$

$$= \frac{1}{2} \times (1 + \Pr(\phi^{\text{DT}}) + \Pr(\phi^{\text{DRF}}))$$

$$= \frac{1}{2} \times \left(1 + \left(1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{th}}{\gamma_{sr}}\right)\right)^N + \left(1 - \exp\left(-\frac{\alpha\gamma_{sd}}{\gamma_{nl}}\right)\right)^K\right) \quad (29)$$

在高信噪比条件下, 系统的频谱效率近似为:

$$\bar{R} \approx \frac{1}{2} \times \left(1 + \left(\frac{\gamma_{th}}{\gamma_{sr}}\right)^N + \left(\frac{\alpha\gamma_{sd}}{\gamma_{nl}}\right)^K\right) \quad (30)$$

由式(30)可知: 当信噪比门限 γ_{th} , N 个中继信道状况都给定时, 即 γ_{th} , $\overline{\gamma_{sr}}$, $\overline{\gamma_{sl}}$, $\overline{\gamma_{nl}}$ 均一定时, 该中继选择策略的频谱效率会随着协作门限 α 的增大而提高。 α 越大, 协作传输越难, 采用直接传输可能性越大, 且直传的频谱效率较高。因此, 频谱效率得到提高。

5 数值仿真

本节主要针对经典的多中继两跳协作通信场景进行蒙特卡洛仿真。仿真中设置各中继的信道系数方差分别为: $\delta_{sl}^2 = \delta_{sr}^2 = \delta_{nl}^2 = 1$, 信息传输速率 $V=1$ bit/s。假设源节点和中继节点发送功率相等, 均为 0.5 W, 即有 $P_s = P_r = 0.5$ W。各信道为独立 Rayleigh 信道, 其加性高斯白噪声功率均相等, 采用未编码信道, 调制方式为 BPSK。

图 2 给出了无协作门限的 SDF 中继选择策略在不同中继节点数目 N 条件下的中断概率曲线。由图 2 可得: 随着中继数目 N 的增加, 中继选择系统的中断概率将明显降低。原因是中继数目越多, 中继正确解码源节点信号的可能性越大, 且选出的最佳中继信道情况 $|h_{nl}|^2$ 也越好, 故中断概率会随着中继数目 N 的增加而降低。同时, 随着发送信噪比 SNR 不断升高, 目的节点接收信号的瞬时信噪比 $\gamma_{sl} + \gamma_{nl}$ 越高, 且由式(25)可知协作传输的中断概率也相应越低, 因此中断概率也会随着信噪比的升高而不断降低。

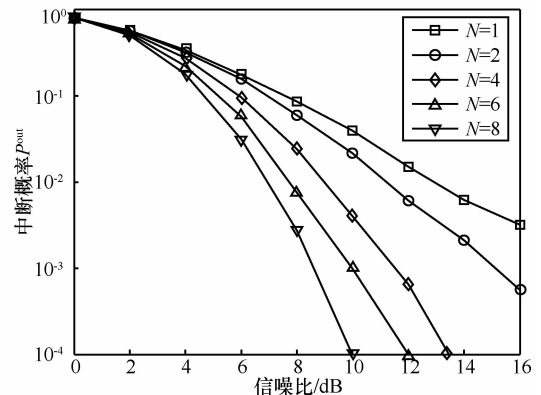


图 2 无门限 SDF 中继选择策略在不同中继数目 N 下的中断概率曲线

图3显示了无门限及不同门限约束条件下4中继选1的中断概率曲线。该仿真结果显示:协作门限较低时,系统中断概率接近于无门限SDF中继选择策略。但较高的协作门限,会使中断概率有所升高。随着协作门限 α 的提高,根据式(10)可知,直传事件 ϕ^D 发生概率将增大,即直接传输的机会大于中继协作传输,而由式(18)和式(25)的比较可知,直传的中断概率 P_{DF}^{out} 高于协作传输中断概率 P_{DF}^{out} 。因此,系统中断概率将随着协作门限的提高而升高。同时,当协作门限 α 一定时,中断概率还会随着发送信噪比的升高而不断降低。信噪比 SNR 升高将导致所有中继接收信号的瞬时信噪比 γ_{se} 增大,故中继正确解码源节点信号的概率越大,从中选出的最佳中继协作能力度量 β_n 越大,则由协作传输事件的计算式(12)可知 ϕ^C 发生概率就越高,且协作传输的中断概率也低于直接传输。因此,同一协作门限条件下,系统中断概率随信噪比升高而降低。

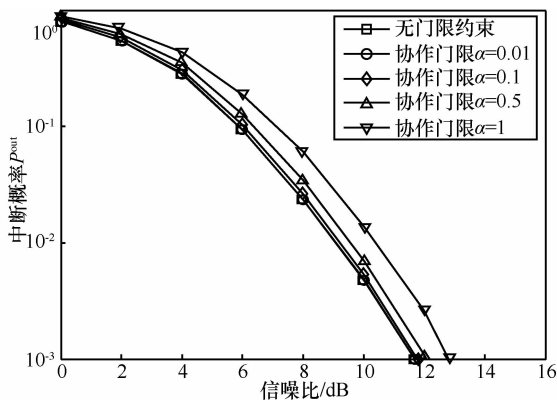


图3 无门限及不同门限约束下4中继选1的中断概率曲线

图4显示了无门限及不同门限约束条件下4中继选1的频谱效率曲线。由该仿真结果可得:协作门限较低时,系统频谱效率与无门限SDF中继选择策略接近,随着协作门限的提高,系统频谱效率不断提高。协作门限 α 越高,由直传事件计算式(10)可知, ϕ^D 发生的概率越高,且直传的频谱效率为1。故该中继选择策略的频谱效率会随着协作门限的增加而提高。同时,对同一协作门限条件下,随着发送信噪比 SNR 不断升高,中继正确译码概率越大,采用最佳中继协作传输的机会大于直接传输,即 $\Pr(\phi^D)$ 越小,则由式(29)可知,频谱效率也相应越低。因此,频谱效率会随着信噪比的升高而不断降低。

图5给出了无门限及不同门限约束下频谱效率与中继数目 N 的曲线关系。由图5可得:较高协作门限将使系统的频谱效率明显提高,但随着中继节点数目的增加,系

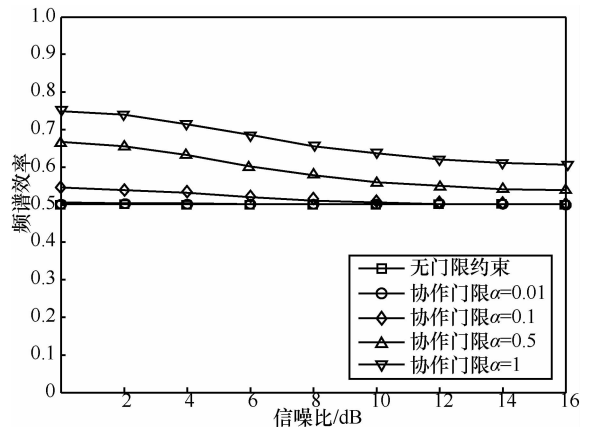


图4 无门限及不同门限约束下4中继选1的频谱效率曲线

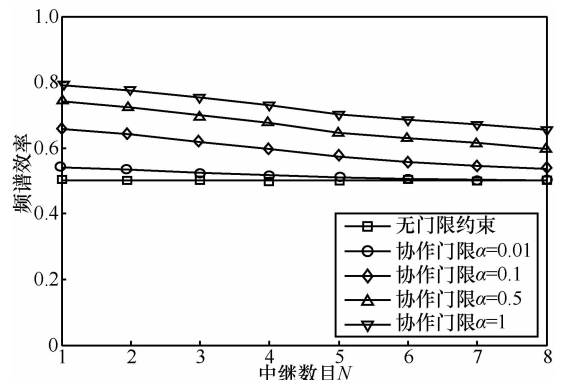


图5 无门限及不同门限约束下频谱效率与中继数目 N 的曲线关系

统频谱效率略有下降。中继数目 N 越多,从中选出的最佳中继协作能力度量 β_n 越大,根据式(12)可知,协作传输事件 ϕ^C 发生的概率就越大,且协作传输频谱效率仅为1/2,所以频谱效率有所下降。

结合图3和图5,可发现在信噪比较低和中继节点较少时,不同协作门限下系统中断概率十分接近,但频谱效率差别较明显。此时,可适当提高协作门限 α ,使直传事件 ϕ^D 发生的概率越高,即 $\Pr(\phi^D)$ 增大,则由式(29)可知系统频谱效率 $\bar{R}$ 将有所提高。当协作门限从0.01增加到0.1时,系统频谱效率大约可提高0.12;而在高信噪比和较多中继节点条件下,不同协作门限下系统频谱效率较接近,但中断概率差别明显。此时,适度降低协作门限 α ,将导致协作传输事件 ϕ^C 发生的概率越高,且协作传输的中断概率低于直接传输,从而能降低系统中断概率。当系统中断概率同为 10^{-2} 时,协作门限从1减少到0.1,可获得约1.1 dB的信噪比增益。

6 结束语

为了权衡中继选择系统的分集效果和频谱效率,本文



在 SDF 协议下,结合门限决策思想,提出了一种基于门限决策的 SDF 中继选择策略,并分析了其性能。同时,还推导了高信噪比环境下,系统中断概率和频谱效率的近似表达式。从仿真结果可得:该策略在低门限条件下,系统中断概率和频谱效率均接近于全天候中继协作场景。在信噪比较低和中继节点较少条件下,通过适度提高协作门限,可提高系统频谱效率。而在信噪比较高和候选中继节点较少条件下,可适当降低协作门限,以降低系统中断概率。因此,该策略可根据不同的信噪比环境和中继节点数目来选取适当的协作门限,从而提高系统的整体性能。以上研究均为在等功率条件下系统的性能分析,若综合考虑源和中继的功率优化分配,可有效减少系统功耗,并较好地实现绿色通信。如何在满足一定系统性能要求下,对源节点和最佳中继进行最优功率分配,以最小化系统的发送总功率,将是后续研究的重点。

参考文献:

- [1] ZHANG W S, DUAN D L, YANG L Q. Relay selection from a battery energy efficiency perspective [J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(6): 1525-1529.
- [2] 闫力璠,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(10A): 380-384
YAN L Y, WANG Y, CHEN C. Research on relay selection strategy in cooperation communication [J]. Computer Science, 2011, 38(10A): 380-384.
- [3] 范斌,王文博,林懿诚,等. 译码转发中继系统中继节点选择及性能分析[J]. 北京邮电大学学报, 2009, 32(4): 99-103.
FAN B, WANG W B, LIN Y C, et al. Relay selection and performance analysis in systems with decode-and-forward relays[J]. Journal of Beijing University of Posts and Communications, 2009, 32(4): 99-103.
- [4] 康虹,冯文江,贾年龙,等. 译码转发协同通信网络自适应中继选择算法[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(2): 109-114.
KANG H, FENG W J, JIA N L, et al. Adaptive relay selection algorithm in decode-and-forward cooperative communication networks [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2013, 36(2): 109-114.
- [5] CHEN S P, WANG W B, ZHANG X. Performance analysis of multiuser diversity in cooperative multi-relay networks under rayleigh-fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(7): 3415-3419.
- [6] WANG H, YANG S Z, LIN J Z, et al. Single relay selection with feedback and power allocation in multisource multidestination cooperative networks [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(12): 997-1000.
- [7] 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.
- [8] LI C G, SUN F, CIOFFI J M, et al. Energy efficient MIMO relay transmissions via joint power allocations [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-II, 2014, 61(7): 531-535.
- [9] LI C G, ZHANG S L, LIU P, et al. Overhearing protocol design exploiting inter-cell interference in cooperative green networks[J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2015(9): 1-7
- [10] LI C G, CIOFFI J M, YANG L. Optimal energy efficient joint power allocation for two-hop single-antenna relaying systems[J]. European Transactions on Telecommunications, 2014 (25): 745-751.
- [11] LEE D, LEE J H. Outage probability of decode-and-forward opportunistic relaying in a multicell environment [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(4): 1925-1930.
- [12] 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.
SI L B, LI Z, LIU Z J, et al. Performance analysis of opportunistic relaying in Rayleigh fading channels with interference [J]. Journal of Beijing University of posts and communications, 2010, 33(4): 106-109.
- [13] ALVES H, DEMO S R. Selective decode-and-forward using fixed relays and packet accumulation[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(7): 707-709.
- [14] 何绍华. SDF 协议下的中继选择策略性能分析. 计算机工程与设计, 2013, 34(4): 1186-1191.
HE S H. Performance analysis of relay selection scheme based on SDF protocol [J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(4): 1186-1191.
- [15] RAY K J, SADEK A K, SU W F, et al. Cooperative Communications and Networking [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009: 127-130.

作者简介



章坚武(1961-),男,博士,杭州电子科技大学教授、博士生导师,主要研究方向为空间通信、通信信号处理、认知无线电、现代信道编码及空间无线通信系统的认知软件无线电 FPGA 实现等。

蒋静(1990-),女,杭州电子科技大学硕士生,主要研究方向为协同信号处理等。

包建荣(1978-),男,博士,杭州电子科技大学副教授,主要研究方向为空间无线通信与编码等。

姜斌(1980-),男,杭州电子科技大学高级实验师,主要研究方向为无线通信信号处理等。