

过时信道状态下译码转发中继选择的优化^①

徐 菲^② 芮贤义^③

(苏州大学电子信息学院 苏州 215006)

摘 要 针对实际通信系统中反馈延迟这一非理想因素,进行了译码转发方式下的中继选择优化研究。针对机会中继选择(ORS)通过选择合适的协作节点参与协作来减少系统功耗和降低成本,但反馈延迟会影响最佳协作中继的选择从而导致协作通信系统性能变差的情况,提出了一种在过时信道下优化机会中继选择方法,以选出最佳中继节点参与协作过程。仿真结果表明,优化机会中继选择降低了译码转发方式下协作通信系统的平均误码率,改善了系统的信道容量,提高整个通信系统性能。

关键词 过时信道状态信息,反馈延迟,译码转发,中继选择,误码率

0 引 言

中继传输无需增加发送功率,通过节点协作就可获得显著的性能增益和扩展覆盖范围^[1,2]。在多重中继协作系统中,机会中继选择(opportunistic relay selection, ORS)被认为是提高协作通信系统性能的一种有效方法^[3]。大多数的中继选择策略是基于瞬时信道状态信息的。事实上,在中继选择时刻和数据发送时刻之间是存在一定的时间间隔的,并且信道是随时间变化的。也就是说,在选择中继时不再是基于当前时刻而是基于过时信道状态信息的。因此,在过时信道下按以往的机会中继选择策略选出的协作节点往往并不是最佳的,从而影响协作通信系统的性能。

研究过时信道状态下如何提高协作通信系统的性能具有实际意义。由于在选择时刻的信道状态信息实质上会与真实的信道不同,文献[4]针对放大转发研究了过时信道对中断概率的影响。文献[5]分析了双向放大转发中继选择网络的遍历容量并且研究了过时信道和估计信道误差对系统容量的影

响。文献[6]推导了放大转发中断概率的闭式表达式,研究了过时信道对固定增益放大转发的影响。文献[7]针对译码转发协作通信系统,研究了在过时信道下的中继策略。但是,上述文献仅仅考虑了过时信道这一非理想因素对中继选择的影响,而没有考虑优化中继选择方法能够提高系统性能。本文基于最小均方误差提出了一种优化了的中继选择方法。优化机会中继选择下的系统平均误码率越低,系统的信道容量越高,系统性能越好。

1 系统模型

考虑多重中继系统的场景,由一个源节点 S 、一个目的节点 D 和 L 个中继节点 $R_k (k \in \{1, 2, \dots, L\})$ 组成。假设每个节点配置单根天线并且所有节点工作在半双工模式,源节点 S 和目的节点 D 之间没有直传链路。整个协作过程分为 3 个阶段,即中继选择阶段、数据传输阶段 1 和数据传输阶段 2。考虑到半双工传输约束,数据传输分成两个时隙,在第一时隙中源节点 S 发送信息到 L 个中继,在第二时隙,选出的“最佳”中继 R^* 译码转发信息到目的节点

① 国家自然科学基金(61201213, 61271360)资助项目。

② 女,1991年生,硕士;研究方向:协作通信;E-mail: xucathy@foxmail.com

③ 通讯作者,E-mail: xyruis@suda.edu.cn

(收稿日期:2015-04-14)

D。

在第一个时隙,中继节点接收到的第 n 个发送符号可以表示为

$$y_{sr_k}(n) = \sqrt{P_s}h_{sr_k}(n)x(n) + n_{sr_k}(n) \quad (1)$$

其中, P_s 是源节点的发送功率, h_{sr_k} 代表源节点到中继节点链路 $S - R$ 之间的信道增益, $x(n)$ 是源节点第 n 个发送符号。 n_{sr_k} 是均值为 0, 方差为 1 的加性白高斯噪声。

在第二个时隙,中继节点采用译码转发协议转发接收到的信号。这样,目的节点 D 接收来自中继节点的信号可以表示为

$$y_{rkd}(n) = \sqrt{P_r}h_{rkd}(n)q(y_{sr_k}(n)) + n_{rkd}(n) \quad (2)$$

其中, P_r 是中继节点的发送功率, h_{rkd} 代表中继节点到目的节点链路 $R - D$ 之间的信道增益, $q(\cdot)$ 取决于中继节点对接收到的信号处理方式,这里是译码转发方式。 n_{rkd} 是均值为 0, 方差为 1 的加性白高斯噪声。

为了尽可能地降低系统平均误码率,选择的最佳中继应具有 $S - R - D$ 链路最大端到端信噪比。然而,信号沿着信道传输需要一定的时间,本文假设用于中继选择时链路 $S - R$ 的状态信息是过时的。根据 Jake 的衰落相关性模型(见文献[8]),本文把具有反馈延迟的信道响应建模为

$$\bar{h}_{sr_k} = \rho h_{sr_k} + \sqrt{1 - \rho^2} \omega_{sr_k} \quad (3)$$

式中, \bar{h}_{sr_k} 代表在中继选择时刻源节点到中继节点之间的信道估计, ρ 代表第一时隙实际信道和估计信道之间的相关系数, ω_{sr_k} 是具有和 h_{sr_k} 同分布的复高斯随机变量。

相应地,在第一时隙中继选择时刻,链路 $S - R$ 的信噪比 $\tilde{\gamma}_{sr_k}$ 和最佳中继转发信息时刻的瞬时信噪比 γ_{sr_k} 有着本质上的区别,可以表示为

$$\tilde{\gamma}_{sr_k} = |\bar{h}_{sr_k}|^2 P_s / N_0 \quad (4)$$

式中, P_s 是源节点的发射功率, N_0 代表噪声功率谱密度。

2 中继选择策略

中继选择策略一般分为部分中继选择(part re-

lay selection, PRS)和机会中继选择(ORS),部分中继选择旨在选择链路 $S - R$ 或者链路 $R - D$ 最大信噪比。在机会中继选择第一步,在过时信道状态信息存在时,本文采用机会中继选择策略并假设链路 $S - R$ 过时,分别估计每个候选中继,比较 $S - R_k$ 和从 $R_k - D$ 的信噪比并选出较小值:

$$\tilde{\gamma}_K = \min(\tilde{\gamma}_{sr_k}, \gamma_{rkd}) \quad (5)$$

端到端瞬时信噪比是用链路 $S - R_k$ 和 $R_k - D$ 的瞬时信噪比的最小值描述,最后,机会中继选择的协作节点的选择准则可描述为

$$K_{ORS}^* = \arg \max_{K \in \{1, 2, \dots, L\}} \{\tilde{\gamma}_K\} \quad (6)$$

正如前面所说,知道过时信道会给协作通信系统性能带来一定损失,恶化系统性能。为了能在过时信道下提高译码转发协作通信系统平均误码率和信道容量性能,本研究提出了一种新的中继选择方法,采用了基于最小均方误差贝叶斯估计准则来估计真正的信噪比 γ_{sr} , 根据文献[9],本研究估计得到优化的中继选择策略的链路 $S - R_k$ 信噪比:

$$\hat{\gamma}_{sr_k} = E(\gamma_{sr_k} | \tilde{\gamma}_{sr_k}, \bar{\gamma}_{sr_k}) \quad (7)$$

这是考虑到信道状态信息不确定性,以过时信道状态信息下的链路 $S - R_k$ 信噪比 $\tilde{\gamma}_{sr_k}$ 和平均信噪比 $\bar{\gamma}_{sr_k}$ 为条件来表述链路 $S - R_k$ 真实信噪比。最终,由文献[10]知道,式(7)可以进一步被表示为

$$E(\gamma_{sr_k} | \tilde{\gamma}_{sr_k}, \bar{\gamma}_{sr_k}) = \rho^2 \tilde{\gamma}_{sr_k} + (1 - \rho^2) \bar{\gamma}_{sr_k} \quad (8)$$

式中 $\bar{\gamma}_{sr_k} = E(|h_{sr_k}|^2) P_s / N_0$ 。

理论上,提出的优化中继选择策略采用竞争中继选择估计得到的最大信噪比,也就是说,选出的中继满足

$$\hat{\gamma}_K = \min(\hat{\gamma}_{sr_k}, \gamma_{rkd}) \quad (9)$$

$$K_{opt}^* = \arg \max_{K \in \{1, 2, \dots, L\}} \{\hat{\gamma}_K\} \quad (10)$$

由式(8)和式(10)得到的结论,提出的优化中继选择策略如下表示:

$$\hat{\gamma}_K = \min(\rho^2 \tilde{\gamma}_{sr_k} + (1 - \rho^2) \bar{\gamma}_{sr_k}, \gamma_{rkd}) \quad (11)$$

$$K_{opt}^* = \arg \max_{K \in \{1, 2, \dots, L\}} \{\hat{\gamma}_K\} \quad (12)$$

3 仿真结果

在这节中,本研究将对以上分析结果在计算机上进行仿真,通过仿真结果可以直观形象地表现出

在过时信道下采用优化机会中继选择方案的协作通信系统性能。仿真环境的设置如下:任意两节点之间的信道为平坦瑞利衰落信道,且各信道均为独立不相关;源节点与中继节点的发射功率相等,即 $P_s = P_r$;假设发送端到各个中继间的信道参数一致,中继端到目的端的信道参数一致,设为 $\Omega_{sr_k} = \Omega_{r_kd} = 1$;不考虑直传链路;源信号是 BPSK 调制,基于译码转发协作协议,候选中继数 $K = 5$,发送数据数目 $N = 10000$ 。

图 1 和图 2 显示出了在采用不同中继选择方案的情况下误码率 (BER) 随信噪比 (SNR) 的变化。星线代表信道不存在过时情况下的误码率;圆圈线

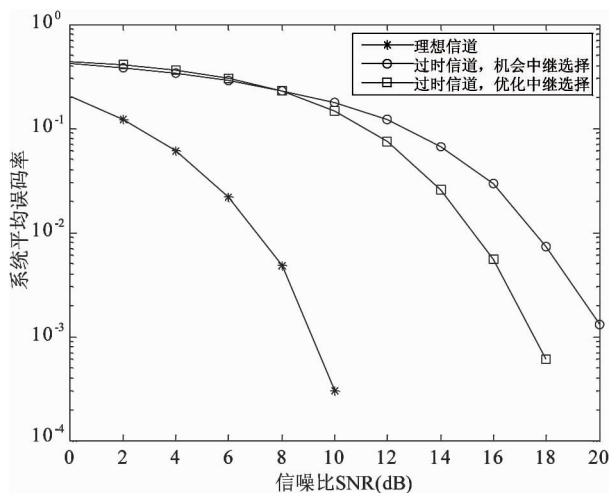


图 1 采用不同中继选择方案下误码率 BER 随信噪比的变化图 ($\rho = 0.2$)

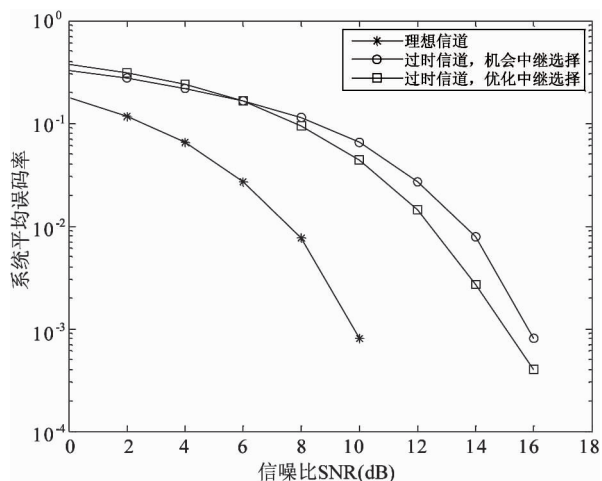


图 2 采用不同中继选择方案下误码率 BER 随信噪比的变化图 ($\rho = 0.5$)

和方格线分别代表过时信道下采用优化竞争中继选择和过时信道下采用机会中继方案的误码率。图 1 设定相关系数 $\rho = 0.2$, 图 2 设定相关系数 $\rho = 0.5$ 。可以看出,在信噪比较小时,改善并无明显效果,但随着信噪比的增大,优化机会中继方案下的误码率取得了明显优化。

如图 3 示出了在采用不同中继选择方案的情况下,系统信道容量随信噪比的变化。星线代表信道不存在过时情况下的系统信道容量;圆圈线和方格线分别代表过时信道下采用优化竞争中继选择和过时信道下采用机会中继方案的系统信道容量。可以发现,随着信噪比的增大,本文提出的优化机会中继选择方案信道容量得到一定的提升。

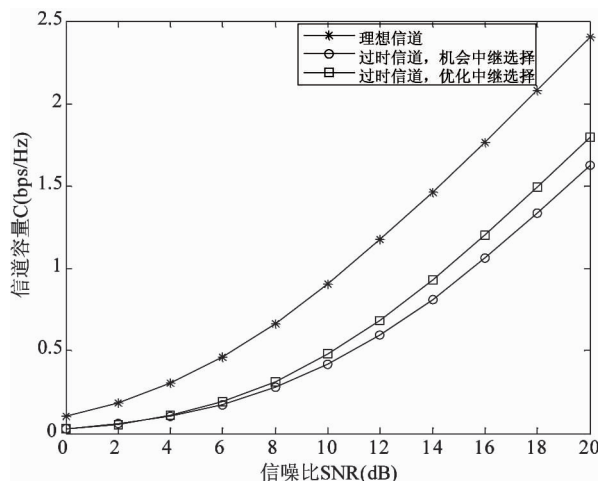


图 3 采用不同中继选择方案下系统的信道容量随信噪比的变化

图 4 曲线示出了两种中继选择方案系统平均误码率随相关系数 ρ 的变化趋势。本研究假定系统平均信噪比 SNR 定为 10。可以得出结论,本文提出的优化中继选择方案系统平均误码率明显低于过时信道状态下机会中继选择方案,协作通信系统性能越好。

图 5 示出了完美信道和过时信道下误码率随候选中继数目的变化趋势。图 5 设定相关系数 $\rho = 0.5$ 。由图看出,系统平均误码率随着候选中继数的增大而减小,并且可以发现过时信道会提高误码率从而降低协作通信系统性能。

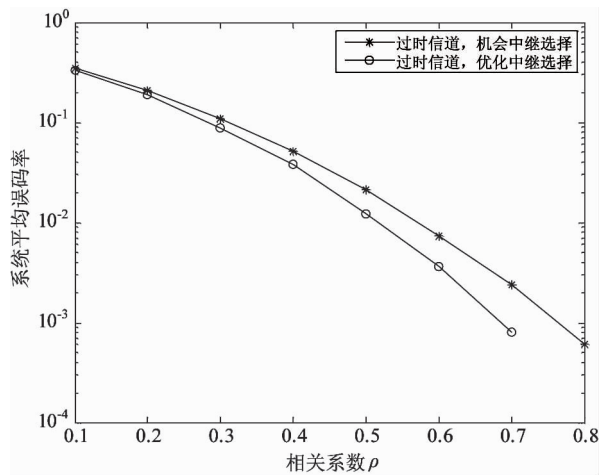


图4 两种中继选择方案系统平均误码率随 ρ 变化曲线图

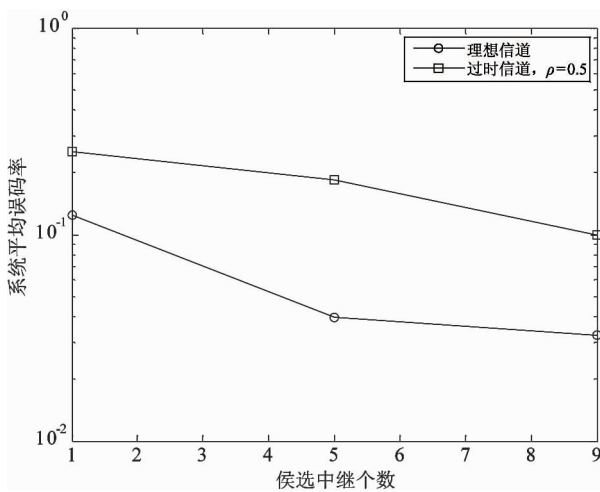


图5 系统平均误码率随候选中继数 K 的变化趋势

4 结论

本文提出了一种优化的中继选择方案:当信道存在反馈延迟时,采用基于最小均方误差贝叶斯估计准则来估计准确的信噪比,然后通过竞争中继选择选出最优中继协作节点。仿真结果表明,和过时信道下简单采用机会中继选择方法比,优化机会中继选择下的系统平均误码率明显降低,系统的信道容量明显提高,整个协作通信系统性能得到优化。

参考文献

- [1] Zijian M, Weifeng S, Batalama S, et al. Cooperative communication protocol designs based on optimum power and time allocation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(8): 4283-4296
- [2] 杜伟华,刘紫燕. 两跳中继协作通信技术的研究与仿真. *通信技术*, 2013, 46(2): 70-72
- [3] Eltayeb M E, Elkhalil K, Bahrami H R. Opportunistic relay selection with limited feedback. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(8): 2885-2898
- [4] Moya Osorio D P, Benitez Olivo E E. Impact of outdated channel estimates on a distributed link-selection scheme for AF relaying networks, *IEEE Wireless Communications Letters*, 2015, 4(2): 185-188
- [5] Cui H Y, Song L Y, Jiao B L. Weighted bidirectional relay selection for outdated channel state information. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(2): 500-509
- [6] Khan F A, Tourki K, Alouini M S, et al. Opportunistic fixed gain bidirectional relaying with outdated CSI. In: *Proceedings of the 2015 IEEE 81th on Vehicular Technology Conference*, Glasgow, UK, 2015. 1-5
- [7] Li F, Jun Z, Qiang G, et al. Outage-optimal relay strategy under outdated channel state information in decode-and-forward cooperative communication systems. *IET Communications*, 2015, 9(4): 441-450
- [8] Vicario J L, Bel A. Lopez-Salcedo J A. Opportunistic relay selection with outdated CSI: outage probability and diversity analysis. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(6): 2872-2876
- [9] Kay S M. *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*. New Jersey: Prentice Hall, 1993
- [10] Proakis J G. *Digital Communications*. New York: McGraw Hill, 2011

Optimization of decode-and-forward relay selection under outdated channel state

Xu Fei, Rui Xianyi

(College of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006)

Abstract

Aiming at the feedback delay factor in a practical communication system, the relay selection optimization under decode-and-forward was studied. In view of the fact that opportunistic relay selection (ORS) can lower the system's power consumption and cost by selecting suitable nodes for their participation, while feedback delay deteriorates the performance of the cooperative communication system due to its influence on the selection of optimal cooperative relay, a method for optimal opportunistic relay selection under the outdated channel state was proposed to choose optimal relay nodes to cooperate in the communication system. The simulation results showed that the optimal relay selection reduced the average bit error rate of a cooperative communication system under the mode of decode-and-forward, increased the channel capacity of the system, and improved the performance of the whole system.

Key words: outdated channel state information, feedback delay, decode-and-forward, relay selection, bit error rate