

文章编号:2095-0411(2017)06-0069-07

基于 Outdated CSI 固定增益放大转发协作通信系统性能分析

钟 斌, 逯 迅, 欧阳方恒, 席在芳, 唐志军

(湖南科技大学 信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要:通过考虑过时的信道状态信息对固定增益放大转发协作通信系统的性能影响展开研究。在假设所有信道服从独立同分布瑞利衰落条件下, 率先推导出中继选择协作通信系统的接收信噪比的概率分布。由此, 推导出中断概率、比特错误概率和平均信道容量的闭式表达式。数值分析表明, 固定增益放大中继选择方案的性能受到中继节点数目、信道相关系数和端对端信噪比的影响。此外, 所提方案比传统的机会选择方案反馈负载减少 50%, 能很好地实现复杂度与系统性能的折衷。

关键词:协作通信; 固定增益放大转发; 过时的信道状态信息; 中继选择

中图分类号: TN 929.5

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-0411.2017.06.010

Performance Analysis for Fixed-Gain Amplify-and-Forward Cooperative Communication Systems Based on Outdated CSI

ZHONG Bin, LU Xun, OUYANG Fangheng, XI Zaifang, TANG Zhijun

(School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The impact of outdated Channel State Information (CSI) on the performance of fixed-gain Amplify-and-forward (AF) cooperative communication systems considering the partial relay selection schemes is studied. The closed-form expressions for the distribution of received Signal-to-Noise Ratio (SNR) in a relay-selection-assisted cooperative communications system are first derived, in which independent and identically distributed (i. i. d.) Rayleigh fading channels are assumed in each wireless link. After that, the theoretical closed-form expressions for outage probability, symbol error ratio, and average channel capacity are derived. Numerical analysis shows that the performance of fix-gain AF relay-selection scheme can be substantially influenced by parameters such as the number of relays,

收稿日期: 2017-03-27。

基金项目:国家自然科学基金资助项目 (61501182, U1501253, 61377024); 深圳大学广东省普及性高性能计算机重点实验室开放课题 (SZU-GDPHPC12015); 湖南省教育厅科研一般项目 (15C0558); 湖南科技大学博士启动基金 (E51539)。

作者简介:钟斌(1982—), 男, 湖南新邵人, 博士, 副教授, 主要从事协作通信与认知无线电技术研究。

the channel correlation coefficient, and the end-to-end SNR. Furthermore, compared with the traditional opportunistic-selection scheme, the feedback burden of the proposed scheme will be reduced by 50%, which provides an excellent compromise between complexity and performances of the system.

Key words: cooperative communication; fixed-gain Amplify-and-Forward (AF); outdated Channel State Information (CSI); relay selection

协作通信技术具有可有效对抗阴影衰落、增加通信系统容量、扩展无线通信系统的传输范围等优点,且被 802.16j 标准和 5G 移动通信系统所采纳^[1-2]。协作通信系统中增加中继节点数量能起到增加空间分集度的作用。然而,节点数的增加却可能产生中继节点之间的相互干扰。为了避免相互干扰的产生,多个中继节点之间必须利用彼此相互正交的信道(时间、空间、或频率正交)来发送数据。因此,多中继协作通信系统以牺牲频谱效率换取系统空间分集度增益^[3]。

近年来,在协作通信系统中应用中继选择技术,中继选择控制中心根据所获取的信道状态信息采取机会中继选择策略,只需利用两个正交信道便可以进行一次信息传输,提高了频谱效率,同时获得了与多中继系统同样的空间分集度^[4]。现有文献报道主要是基于实时信道状态信息的中继选择方法^[5-6]。然而,在移动通信场景中,存在多普勒频率偏移与信道状态信息反馈延时,并且信道估计不可避免存在误差,造成中继选择控制中心只能获得过时的信道状态信息(outdated Channel State Information, Outdated CSI)^[7]。为了解决这一问题,学术界开始对基于非实时信道状态信息的中继选择问题进行广泛关注^[8-11]。文献[8]对基于非实时信道状态信息的两种中继选择模式(部分中继选择与机会中继选择)进行对比分析,表明在信道相关系数较小的场景,部分中继选择方式相比机会中继选择方式具有优越性;文献[9]提出了运用速率和功率调节的方式能够增加部分中继选择协作通信系统的平均信道容量;文献[10]对基于部分过时的信道状态信道的可变增益放大转发协作中继选择系统进行了性能分析,并推导出了中断概率及比特错误概率的闭式解表达式;此外,文献[11-12]分别对协作通信网络与认知网络中的中继选择问题进行阐述,研究表明部分中继选择模式能够减少信道状态信息的反馈量;此外,文献[13]研究表明协作能在网络协议异常检测方面起到提高作用。然而,国内却缺少过时的信道状态信息固定增益中继选择问题的相关报道。

本文针对移动通信场景,考虑过时的信道状态信息进行固定增益放大转发(Amplify-and-Forward, AF)中继选择。在当前已有研究基础上,工作的主要贡献如下:①利用固定增益部分中继选择模式相比传统的可变增益机会中继选择模式,由于只需获取部分链路(信源→中继)的信道状态信息,相比机会中继选择算法需要获取整个传输链路(信源→中继→信宿)的信道状态信息,信道反馈信息量减少为 50%,是一种能很好地实现复杂度与性能折衷的中继选择策略;②理论上率先推导出中断概率、符号错误概率及平均信道容量的近似理论闭式表达式;③对反映信道状态信息过时的性的特征要素(即信道状态信息相关系数)对系统性能的影响进行分析,得出结论:当获取更加精准的信道状态信息(即信道相关系数愈加接近 1)时,协作通信网络系统所能得到的中断概率、符号错误概率及遍历信道容量等性能更优,但随着信道相关系数的增加其性能改善空间越来越小,并通过蒙特卡罗仿真分析方法对所提理论的有效性进行了验证。

1 系统模型

系统模型如图 1 所示。本文考虑一个双跳的中继协作网络,该系统包括一个信源 S , N 个固定增益为 G 的 AF 中继集合 $\Phi = \{R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_N\}$ 和一个信宿 D 。所有节点都使用单天线,以半双工时分复用模式通信。一般地,中继进行远距离协作通信过程中,可以假设 S 到 D 的链路处于深度衰落状态。通信模型中,每条数据链路服从独立同分布的瑞利衰落特性,且叠加有均值为零,方差为 σ_0 的加

性高斯白噪声,信源与中继发送信息的功率均为单位 1。

本文利用部分中继选择方式选择最优中继进行数据转发,中继选择规则为^[11]

函数。

由于 $K_1(x) \approx 1/x$ [16], 可以得出 γ_{eq} 的累积概率分布函数的近似值为

$$F_{\gamma_{\text{eq}}}(x) \approx N \sum_{n=0}^{N-1} \frac{(-1)^n \binom{N-1}{n}}{n+1} [1 - e^{-\theta_n x}] \quad (7)$$

对式(7)求导, 求得 γ_{eq} 概率密度函数的近似值为

$$f_{\gamma_{\text{eq}}}(x) = N \sum_{n=0}^{N-1} \frac{(-1)^n \binom{N-1}{n}}{n+1} \theta_n e^{-\theta_n x} \quad (8)$$

2 系统性能分析

为了对所提出的中继选择算法的性能指标进行分析, 本文分别推导出中断概率、比特错误概率和平均遍历信道容量的闭式表达式, 从而进行衡量固定增益 AF 中继选择协作通信系统的可靠性与频谱效率。

2.1 中断性能分析

在两跳半双工中继协作通信系统中, 数据发送速率为 r 时, 所对应数据中断的门限信噪比为 $\gamma_{\text{th}} = 2^{2r} - 1$ 。

将 γ_{th} 替换式(7)中的 x , 得到中断概率的闭式表达式为

$$P_{\text{out}}(\gamma_{\text{th}}) = F_{\gamma_{\text{eq}}}(\gamma_{\text{th}}) \quad (9)$$

2.2 符号错误性能分析

从文献[15]可知, 符号错误概率的近似闭式表达式为

$$P_e = \frac{\mu}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty F_{\gamma_{\text{eq}}} \left(\frac{x^2}{\eta} \right) e^{-\frac{x^2}{2}} dx \approx N \sum_{n=0}^{N-1} \frac{(-1)^n \binom{N-1}{n} \mu}{2(n+1)} \left[1 - \sqrt{\frac{\eta}{2\theta_n + \eta}} \right] \quad (10)$$

式中 μ 和 η 为调制常数, 由特定的调制格式所决定。

2.3 平均信道容量性能分析

信宿接收到的等价信噪比概率分布密度函数, 可以推导出平均信道容量 C 的近似闭式表达式为

$$C = \frac{B}{2} \int_0^\infty \log_2(1+x) f_{\gamma_{\text{eq}}}(x) dx \approx \frac{B}{2 \ln 2} N \sum_{n=0}^{N-1} \frac{(-1)^n \binom{N-1}{n}}{n+1} e^{\theta_n} E_1(\theta_n) \quad (11)$$

式中: B 表示所占用的信道带宽; $E_1(x) = \int_x^\infty e^{-t}/t dt = -\text{Ei}(-x)$ 为第一类指数积分函数[15]。

3 数值仿真及分析

利用 Matlab 软件, 通过蒙特卡罗方法对分析结果的正确性进行验证。假设中继增益 G 为单位 1; 信道服从独立同分布瑞利衰落特性; 中继两端数据传输信道对称, 即对于所有的信源→中继之间的链路平均信噪比与中继→信宿的链路平均信噪比相等 ($\bar{\gamma}_{\text{SR}} = \bar{\gamma}_{\text{RD}}$); 信道具有单位功率的加性高斯白噪声; 发送数据速率 r 为 1bps; 数据符号采取二进制相移键控调制方式(因此, 有 $\mu = 1$ 和 $\eta = 2$); 节点以单位

功率发送数据,且单位带宽条件下进行系统性能仿真分析。

图2表示 $\rho=0.707$ 时,不同中继节点数目下中断概率与平均信噪比的关系。如图2所示,在中断概率为 10^{-3} 时,中继节点从1增加到3时可以获得13dB的增益,而从3增加到5时却只能获得4dB的增益,从5增加到7时仅仅只能获得1dB的增益。从图2可知,中断概率性能随着中继节点数目的增加而改善,但中继节点数目越多,系统中断概率性能随中继节点数目增加而获得改善的空间越小。

图3表示不同信道系数下中断概率与平均信噪比的关系。如图3所示,当 $N=3$,在中断概率为 10^{-3} 时, ρ 从0变换到0.500大约能获得4dB的性能增益; ρ 及从0.500变换到0.707大约能获得6dB的性能增益; ρ 及从0.707变换到1大约能获得7dB的性能增益。在 $\rho < 1$ 时,由于多普勒频率偏移与信道状态信息反馈延时造成的 Outdated CSI,会导致牺牲中断概率性能。当 $\rho=1$ 时,为实时信道状态信息情况,在高信噪比区域中断概率性能增益改善愈加明显。

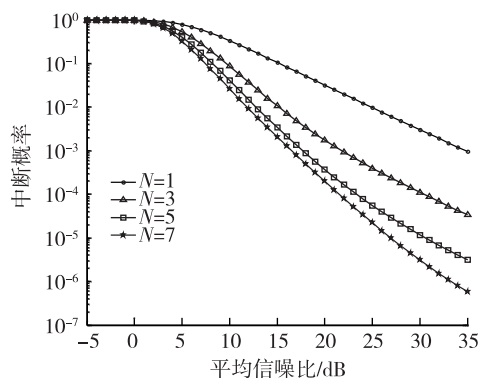


图2 不同中继节点数目下系统的中断概率与平均信噪比的关系

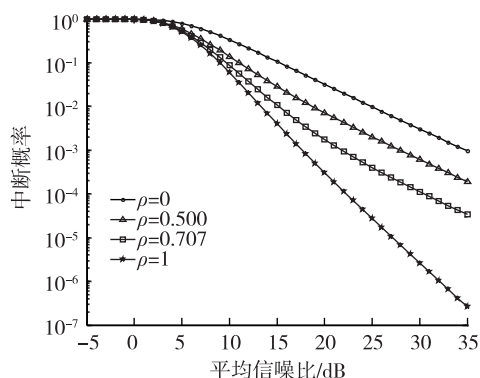


图3 不同信道相关系数下系统的中断概率与平均信噪比的关系

图4表示 $\rho=0.707$ 时,不同中继数时符号错误概率与平均信噪比的关系。与图2结果类似,通过增加中继节点数目和提高链路平均信噪比可以改善系统的中断概率性能。

图5表示 $N=3$ 时,不同信道相关系数时符号错误概率与平均信噪比的关系。与图3结果类似,分析得出信道状态信息的过时特性,对符号概率性能的影响特性,获取到实时的信道状态信息在固定增益放大转发协作通信系统当中,更有利于降低符号错误概率。

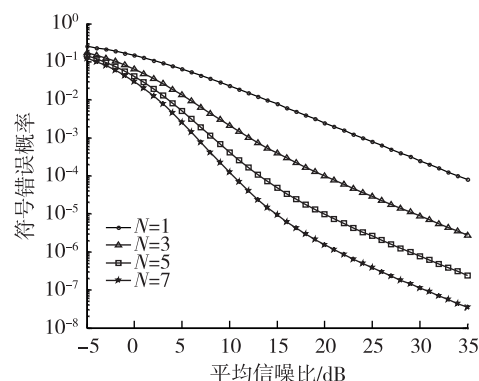


图4 不同中继节点数目下系统的符号错误概率与平均信噪比关系

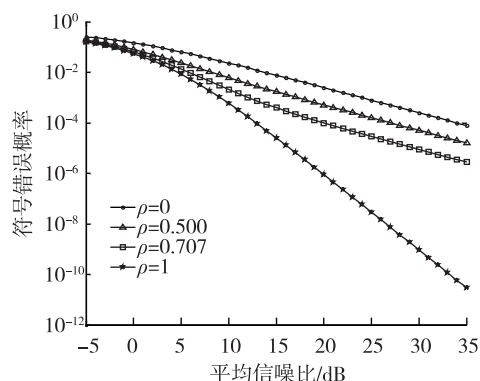


图5 不同信道相关系数下系统的符号错误概率与平均信噪比关系

图 6 表示 $\rho=0.707$ 时,不同中继数时单位带宽平均信道容量与平均信噪比的关系。由图 6 可以得出,在 20dB 平均信噪比时,中继数量从 1 变化到 3,频谱效率提高 0.615Bits/(s/Hz);从 3 变化到 5 时,频谱效率只提高了 0.203Bits/(s/Hz);然而从 5 变化到 7 时,频谱效率仅仅只提高了 0.111Bits/(s/Hz)。因此,增加中继数量能够明显提高频谱效率,且随着中继数量的增加能够提高频谱效率,但频率效率提升空间越来越小。

图 7 表示 $N=3$ 时,不同信道相关系数时平均信道容量与信噪比的关系。如图 7 所示,当平均信噪比为 20dB 时, ρ 从 0 变换到 0.500 频谱效率提高 0.494Bits/(s/Hz),然而, ρ 从 0.500 变换到 0.707 频谱效率仅仅提高 0.121Bits/(s/Hz), ρ 从 0.707 变换到 1 频谱效率仅仅提高 0.062Bits/(s/Hz)。因此,提高信道相关系数可以改善频谱效率,且信道相关系数越接近 1,频谱效率越高,但是随着信道相关系数的提高性能改善的空间越来越小。

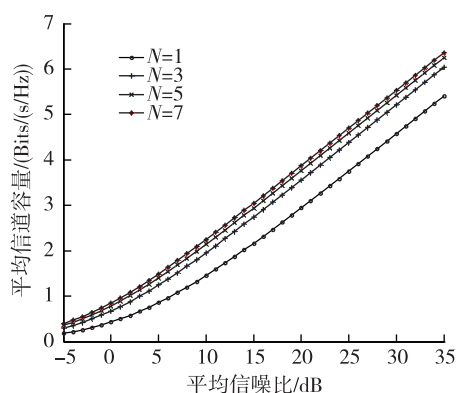


图 6 不同中继节点数目下系统的平均信道容量与平均信噪比关系

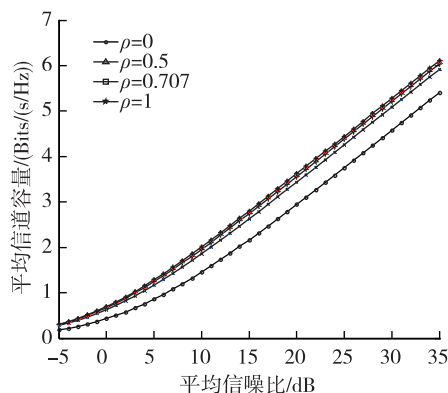


图 7 不同信道相关系数下系统的平均信道容量与平均信噪比关系

4 结 论

在分析固定增益放大转发协作通信系统性能的基础上,研究了在过时的信道状态下,影响中继选择协作通信系统性能指标(即中断概率、符号错误概率及平均信道容量)的重要因素,包括:信道相关系数、中继节点数目及链路平均信噪比。并在理论上得出了中断概率、符号错误概率及平均信道容量的闭式表达式,且通过蒙特卡罗方法对公式的有效性进行了验证。数据仿真结果表明,利用部分信道状态信息选择固定增益中继进行协作通信,能够在较低信道状态信息负载开销量的情况下改善系统空间分集增益性能,提高系统的频谱效率。

参考文献:

- [1]SENDONARIS A, ERKIP E, AAZHANG B. Increasing uplink capacity via user cooperation diversity[C]//Proc IEEE Int Symp on Infor Theory (ISIT). Cambridge: MA, 1998.
- [2]SENDONARIS A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversity. Part I: System description[J]. IEEE Trans Commun, 2003, 51(11): 1927-1938.
- [3]ZHUANG W, ISMAIL M. Cooperation in wireless communication networks[J]. IEEE Wireless Commun, 2012, 19(2): 10-20.

- [4]LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Trans Inform Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [5]ZHONG B, ZHANG Z, CHAI X, et al. Performance analysis for opportunistic full-duplex relay selection in underlay cognitive networks[J]. IEEE Trans Veh Technol, 2015, 64(10): 4905-4910.
- [6]ZHONG B, ZHANG Z, ZHANG D, et al. Partial relay selection in decode and forward cooperative cognitive radio networks over Rayleigh fading channels[J]. KSII T Internet Inf, 2014, 8(11): 3967-3983.
- [7]NISAR M D, ALOUINI M S. Minimax robust relay selection based on uncertain long-term CSI[J]. IEEE Trans Veh Technol, 2014, 63(2): 975-982.
- [8]ZHONG B, ZHANG Z, HUANGFU W, et al. Performance analysis for amplify-and-forward relay selection with outdated channel state information[J]. China Commun, 2013, 10(6): 100-110.
- [9]ZHONG B, ZHANG Z, ZHANG X, et al. Impact of partial relay selection on the capacity of communications systems with outdated CSI and adaptive transmission techniques[J]. EURASIP J Wirel Comm, 2013(1): 1-13.
- [10]SURAWEEERA H A, SOYSA M, TELLAMBURA C, et al. Performance analysis of partial relay selection with feedback delay[J]. IEEE Signal Process Lett, 2010, 17(6): 531-534.
- [11]ZHONG B, ZHANG Z, ZHANG X, et al. Partial relay selection with fixed-gain relays and outdated CSI in underlay cognitive networks[J]. IEEE Trans Veh Technol, 2013, 62(9): 4696-4701.
- [12]MICHALOPOULOS D S, SURAWEEERA H A, KARAGIANNIDIS K L, et al. Amplify-and-forward relay selection with outdated channel estimates[J]. IEEE Trans Commun, 2012, 60(5): 1278-1290.
- [13]邓军, 薛辉. 基于协作的网络协议异常检测算法[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2015, 38(1): 58-63.
- [14]HASNAM O, ALOUINI M S. A performance study of dual-hop transmissions with fixed gain relays[J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2004, 3(6): 1963-1968.
- [15]GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of Integrals, Series, and Products[M]. 7th ed. New York: Academic, 2007: 336-883.
- [16]ABRAMOWITZ M, STEGUN I. Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables[M]. 9th ed. Washington: Dover, 2007: 375.

(责任编辑:李艳)