

多中继混合转发协作传输策略研究

杨 波 于宏毅 冯 强

(解放军信息工程大学信息工程学院通信工程系 郑州 450002)

摘 要 为了优化多中继协作通信系统的性能,提出了一种多中继混合转发协作传输策略(Multiple-Relay Hybrid-Forwarding Cooperative Transmission Scheme, MRHF-CTS)。该策略考虑多中继协作通信系统中的译码转发与放大转发以及两种转发方式带来的性能缺陷,根据协作中继节点接收信号的译码结果选择转发方式,同时引入协作中继节点之间数据来传输对系统性能的增益。对系统中断概率性能进行了推导与分析,结果表明,该策略在消除放大转发策略噪声累积的基础上,能够有效抑制协作中继节点错误检测译码转发给系统带来的不利影响,明显提升系统性能;在大信噪比情况下,可获得多中继译码转发协作通信系统的最佳性能。

关键词 无线网络,协作通信,分集增益,译码转发,放大转发

中图分类号 TN919.3 **文献标识码** A

Performance Research of Multi-relay Hybrid-forwarding Cooperative Transmission Scheme

YANG Bo YU Hong-yi FENG Qiang

(Department of Communication Engineering, Institute of Information Engineering, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract In order to overcome the shortcomings of decode-and-forward and amplify-and-forward transmission, a multi-relay hybrid-forwarding cooperative transmission scheme (MRHF-CTS) was proposed to optimize the performance of cooperative communication system, which selects the style of forwarding according to the result of decoding at relay nodes and uses the broadcast channels among relay nodes to improve the transmission reliability of multi-relay wireless networks. The performance characterizations in terms of outage probabilities are developed. The results show that in contrast to decode-and-forward and amplify-and-forward scheme, MRHF-CTS offers a superior performance. And in the high signal-to-noise ratio (SNR) regime, the optimal performance of decode-and-forward transmission is gained.

Keywords Wireless network, Cooperative communication, Diversity gain, Decode-and-forward, Amplify-and-forward

无线通信系统利用协作传输技术,在接收节点通过合并来自多条独立衰落信道的数据样本,可以有效地抵抗信道衰落的影响,获取分集增益,提高系统的传输可靠性。

目前,提出许多协作传输协议^[1,2],其中从协作中继节点的转发方式上区分,主要有两大类:放大转发(Amplify-and-Forward, AF)和译码转发(Decode-and-Forward, DF)。在此基础上,对这两类协作传输协议进行优化,提出了具有协作中继节点选择能力的协作传输协议^[3-7]、采用有效编码技术(空时编码、协作编码等)的协作传输协议^[8-10]以及增加有限反馈(增量中继等)的协作传输协议^[11]。

针对多中继协作通信系统,比较现有的协作传输协议,协作中继节点单纯地采用 AF 方式,易于实现,并且最小化了系统的信令开销及设计复杂度,但是协作中继节点处的噪声累积必然会降低系统性能;而单纯采用 DF 方式,协作中继节点错误检测译码转发,不仅不能获得分集增益,反而会严重降低系统性能^[1,9,10];而引入协作中继节点选择、有效编码技术以及有限反馈的协作传输改进策略,虽然可以改善系统性能,但

改进策略的实施是以额外考虑同步机制、增加信令开销和系统复杂度为代价的。综上所述,在参与协作中继节点数目适中并且对于传输时间要求不十分苛刻的协作通信系统中,考虑到系统设计的低复杂度及单纯采用 AF 或 DF 方式的系统性能缺陷,本文提出了一种多中继混合转发协作传输策略,并对其中断概率性能进行了研究。本文第 1 节给出了多中继混合转发协作传输策略技术细节;第 2 节分析了 MRHF-CTS 的中断概率性能,并给出了分析结果;最后总结全文。

1 多中继混合转发协作传输技术

考虑无线网络中相隔两跳的节点间的信息传递,其中源节点与目的节点间的数据传递由多个协作中继节点协作完成,并且源节点与目的节点之间存在直达链路,如图 1 所示。所有节点均工作在半双工模式。目的节点通过源节点与协作中继节点的协作传输获取分集增益。假设所有链路,包括源节点到目的节点、源节点到中继节点、中继节点到目的节点以及中继节点之间均为慢衰落信道。

到稿日期:2009-04-30 返修日期:2009-07-09 本文受国家自然科学基金(60872043)资助。

杨 波(1979—),男,博士生,主要研究领域为协作通信技术和网络编码技术,E-mail: yb_79@163.com;于宏毅(1963—),男,博士,教授,主要研究领域为信号处理、自组织网络及无线传感器网络技术等;冯 强(1980—),男,博士生,主要研究领域为协作网络编码技术。

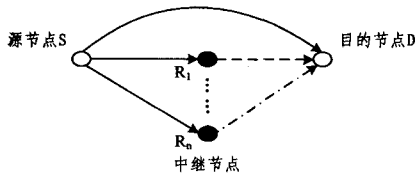


图1 多中继协作通信系统模型

考虑最大限度简化全局网络规划及信令开销,事先对每个均已分配特定时隙的协作中继节点进行转发,即数据传输采用时分信道。在信息传递过程中,每个时隙仅有一个节点处于发射状态,一次信息传递所用最大时隙数取决于协作中继节点的个数。多中继混合转发协作传输策略如表1所列,第一个时隙,源节点将待发数据进行广播,所有协作中继节点均进行译码操作(数据传输的编码及译码方式不在本文讨论内容之中,均假设所有协作中继节点可实现检测译码操作,例如可采用循环冗余码校验(Cyclic Redundancy Check, CRC)机制);随后时隙,协作中继节点依次根据译码检测的结果选择转发方式向目的节点转发,即译码检测错误时采用 AF 方式,反之采用 DF 方式。并且每个协作中继节点在转发数据的同时,其后转发的所有协作中继节点如果错误接收,均可利用其重新译码检测(这里考虑协作中继节点处多个独立样本的联合检测,即得到多个样本的协作中继节点均采用最大比合并(Maximal Ratio Combining, MRC)的方式进行联合检测)。最后,在目的节点采用 MRC 进行联合检测,所有链路的信道状态信息均假设收端已知。为提高无线通信系统资源的有效利用率,可以在目的节点引入自动重传请求(Auto-matic-Repeat-Request, ARQ)机制,即在目的节点,根据信道状态及实时性要求事先确定从某个时隙开始采用 ARQ 机制。如果正确接收,即刻释放系统资源。

表1 多中继混合转发协作传输策略流程

时隙	1	2	3		n+1
节点					
S	发送	无操作	无操作	无操作	无操作
R ₁	接收	正确译码 DF 传输/错误译码 AF 传输	无操作	无操作	无操作
R ₂	接收	正确译码无 操作/错误 译码时接收	正确译码 DF 传输/错误译码 AF 传输	无操作	无操作
.....	接收	正确译码无 操作/错误 译码时接收	正确译码无 操作/错误 译码时接收	正确译码 DF 传输/错误 译码时接收	无操作
R _n	接收	正确译码无 操作/错误 译码时接收	正确译码无 操作/错误 译码时接收	正确译码无 操作/错误 译码时接收	正确译码 DF 传输/错误译码 AF 传输
D	接收	接收	接收	接收	接收

2 性能分析及数值结果

中断概率^[1]是衡量无线通信系统性能的重要度量指标之一。当满足即时信道状态支持的数据传输速率 C 小于某期望速率 C_0 时,系统处于中断状态,中断状态出现的概率称之为中断概率 $P\{C < C_0\}$ 。本节从中断概率性能入手,分析 MRHF-CTS 的性能优势。为简化分析过程,但又不失一般性,假设协作中继节点群由两个协作中继节点组成。

2.1 中断概率性能分析

非协作模式下,直接传输信道模型由下式给出:

$$y_{SD} = h_{SD}x_{SD} + n_{SD} \quad (1)$$

其中, x_{SD} 和 y_{SD} 分别为信道的输入和输出,衰落系数 h_{SD} 服从均值为 0、方差为 σ_{SD}^2 的复高斯分布。目的节点可以获得理想的信道状态信息,受均值为 0、方差为 $N_0/2$ 的加性高斯噪声 n_{SD} 的影响,即时接收信噪比 $\gamma_{SD} = |h_{SD}|^2 E_b / N_0$, E_b 为单位比特发射能量。

即时信道状态支持的数据传输速率可表示为信噪比的函数:

$$C_{SD} = \log(1 + \gamma_{SD}) = \log(1 + |h_{SD}|^2 \bar{\gamma}_{SD}) \quad (2)$$

其中, $\bar{\gamma}_{SD}$ 为源节点 S 到目的节点 D 间信道的平均信噪比。

考虑瑞利衰落信道, $|h_{SD}|^2$ 服从指数分布,直接传输的中断概率^[1]如下式所示,同时给出大信噪比时的近似结果,有:

$$\begin{aligned} P_{out}(\gamma_{SD}, C_0) &= P\{C_{SD} < C_0\} = P\{|h_{SD}|^2 < \frac{2^{C_0} - 1}{\bar{\gamma}_{SD}}\} \\ &= 1 - \exp\left(-\frac{2^{C_0} - 1}{\bar{\gamma}_{SD} \sigma_{SD}^2}\right) \rightarrow \frac{1}{\sigma_{SD}^2} \frac{2^{C_0} - 1}{\bar{\gamma}_{SD}} \end{aligned} \quad (3)$$

如图1所示,在多中继协作通信系统中,假设各链路平均信噪比相同。采用多中继混合转发协作传输策略(以两个协作中继节点为例)时,根据协作中继节点译码正确与否,其中断概率分别为:

1) R_1 和 R_2 均正确译码,即 $P_1 = \Pr[|h_{SR_1}|^2 \geq (2^{C_0} - 1)\sqrt{\gamma}] \Pr[|h_{SR_2}|^2 \geq (2^{C_0} - 1)\sqrt{\gamma}]$ 时,

$$\begin{aligned} \Pr[C_{MRHF-CTS} < C_0] &= \Pr[|h_{SD}|^2 + |h_{R_1D}|^2 + |h_{R_2D}|^2 < \\ & (2^{C_0} - 1)\sqrt{\gamma}] \rightarrow \left(\frac{1}{6\sigma_{SD}^2\sigma_{R_1D}^2\sigma_{R_2D}^2}\right) \left(\frac{2^{3C_0} - 1}{\bar{\gamma}}\right)^3 \end{aligned} \quad (4)$$

2) R_1 错误译码, R_2 正确译码,即 $P_2 = \Pr[|h_{SR_1}|^2 < (2^{C_0} - 1)\sqrt{\gamma}] \Pr[|h_{SR_2}|^2 \geq (2^{C_0} - 1)\sqrt{\gamma}]$ 时,

$$\begin{aligned} \Pr[C_{MRHF-CTS} < C_0] &= \Pr[|h_{SD}|^2 + |h_{R_2D}|^2 + \frac{1}{\bar{\gamma}} f(\bar{\gamma} \\ & |h_{SR_1}|^2, \bar{\gamma} |h_{R_1D}|^2) < \frac{2^{3C_0} - 1}{\bar{\gamma}}] \rightarrow \left(\frac{1}{6\sigma_{SD}^2\sigma_{R_2D}^2}\right) \\ & \left(\frac{\sigma_{SR_1}^2 + \sigma_{R_1D}^2}{\sigma_{SR_1}^2\sigma_{R_1D}^2}\right) \left(\frac{2^{3C_0} - 1}{\bar{\gamma}}\right)^3 \end{aligned} \quad (5)$$

3) R_1 正确译码, R_2 错误译码,即 $P_3 = \Pr[|h_{SR_1}|^2 \geq (2^{C_0} - 1)\sqrt{\gamma}] \Pr[|h_{SR_2}|^2 < (2^{C_0} - 1)\sqrt{\gamma}]$ 时有,

3.1) R_1 转发时隙、 R_2 接收并正确译码,即 $P_{31} = \Pr[|h_{SR_1}|^2 + |h_{R_1R_2}|^2 \geq (2^{C_0} - 1)\sqrt{\gamma}]$ 时,此时

$$\begin{aligned} \Pr[C_{MRHF-CTS} < C_0] &= \Pr[|h_{SD}|^2 + |h_{R_1D}|^2 + |h_{R_2D}|^2 < \\ & \frac{2^{3C_0} - 1}{\bar{\gamma}}] \rightarrow \left(\frac{1}{6\sigma_{SD}^2\sigma_{R_1D}^2\sigma_{R_2D}^2}\right) \left(\frac{2^{3C_0} - 1}{\bar{\gamma}}\right)^3 \end{aligned} \quad (6)$$

3.2) R_1 转发时隙、 R_2 接收并错误译码,即 $P_{32} = \Pr[|h_{SR_1}|^2 + |h_{R_1R_2}|^2 < (2^{C_0} - 1)\sqrt{\gamma}]$ 时,此时

$$\begin{aligned} \Pr[C_{MRHF-CTS} < C_0] &= \Pr[|h_{SD}|^2 + |h_{R_1D}|^2 + \frac{1}{\bar{\gamma}} f(\bar{\gamma} \\ & |h_{SR_2}|^2, \bar{\gamma} |h_{R_2D}|^2) < \frac{2^{3C_0} - 1}{\bar{\gamma}}] \rightarrow \left(\frac{1}{6\sigma_{SD}^2\sigma_{R_1D}^2}\right) \\ & \left(\frac{\sigma_{SR_2}^2 + \sigma_{R_2D}^2}{\sigma_{SR_2}^2\sigma_{R_2D}^2}\right) \left(\frac{2^{3C_0} - 1}{\bar{\gamma}}\right)^3 \end{aligned} \quad (7)$$

4) R_1 错误译码、 R_2 错误译码,即 $P_4 = \Pr[|h_{SR_1}|^2 < (2^{C_0} - 1)\sqrt{\gamma}] \Pr[|h_{SR_2}|^2 < (2^{C_0} - 1)\sqrt{\gamma}]$ 时有,

4.1) R_1 转发时隙、 R_2 接收并正确译码,即 $P_{41} = \Pr[|h_{SR_2}|^2 + (1/\bar{\gamma}) f(\bar{\gamma} |h_{SR_1}|^2, \bar{\gamma} |h_{R_1R_2}|^2) \geq (2^{C_0} - 1)\sqrt{\gamma}]$ 时,此时

$$\Pr[C_{\text{MRHF-CTS}}^{\text{M}} < C_0] = \Pr[|h_{\text{SD}}|^2 + |h_{\text{R}_2\text{D}}|^2 + \frac{1}{\gamma} f(\bar{\gamma}) (|h_{\text{SR}_1}|^2, \bar{\gamma} |h_{\text{R}_1\text{D}}|^2) < \frac{2^{3C_0}-1}{\gamma}] \rightarrow (\frac{1}{6\sigma_{\text{SD}}^2\sigma_{\text{R}_2\text{D}}^2} \frac{\sigma_{\text{SR}_1}^2 + \sigma_{\text{R}_1\text{D}}^2}{\sigma_{\text{SR}_1}^2\sigma_{\text{R}_1\text{D}}^2})(\frac{2^{3C_0}-1}{\gamma})^3 \quad (8)$$

4.2) R_1 转发时隙, R_2 接收并错误译码, 即 $P_{42} = \Pr[|h_{\text{SR}_2}|^2 + (1/\gamma)f(\bar{\gamma})|h_{\text{SR}_1}|^2, \bar{\gamma}|h_{\text{R}_1\text{R}_2}|^2 < (2^{3C_0}-1)\sqrt{\gamma}]$, 此时

$$\Pr[C_{\text{MRHF-CTS}}^{\text{M}} < C_0] = \Pr[|h_{\text{SD}}|^2 + \frac{1}{\gamma} f(\bar{\gamma}) |h_{\text{SR}_1}|^2, \bar{\gamma} |h_{\text{R}_1\text{D}}|^2 + \frac{1}{\gamma} f(\bar{\gamma}) |h_{\text{SR}_2}|^2, \bar{\gamma} |h_{\text{R}_2\text{D}}|^2 < \frac{2^{3C_0}-1}{\gamma}] \rightarrow (\frac{\sigma_{\text{R}_1\text{D}}^2\sigma_{\text{R}_2\text{D}}^2 + \sigma_{\text{SR}_1}^2\sigma_{\text{R}_2\text{D}}^2 + \sigma_{\text{SR}_2}^2\sigma_{\text{R}_1\text{D}}^2 + \sigma_{\text{SR}_1}^2\sigma_{\text{R}_2\text{D}}^2}{6\sigma_{\text{SD}}^2\sigma_{\text{SR}_1}^2\sigma_{\text{SR}_2}^2\sigma_{\text{R}_1\text{D}}^2\sigma_{\text{R}_2\text{D}}^2})(\frac{2^{3C_0}-1}{\gamma})^3 \quad (9)$$

综合式(4)至式(9), 即可得到双中继混合转发协作传输策略的中断概率为

$$\Pr[C_{\text{MRHF-CTS}} < C_0] = P_1 \times \Pr[C_{\text{MRHF-CTS}}^{\text{M}} < C_0] + P_2 \times \Pr[C_{\text{MRHF-CTS}}^{\text{M}} < C_0] + P_3 \times (P_{31} \times \Pr[C_{\text{MRHF-CTS}}^{\text{M}} < C_0] + P_{32} \times \Pr[C_{\text{MRHF-CTS}}^{\text{M}} < C_0]) + P_4 \times (P_{41} \times \Pr[C_{\text{MRHF-CTS}}^{\text{M}} < C_0] + P_{42} \times \Pr[C_{\text{MRHF-CTS}}^{\text{M}} < C_0]) \quad (10)$$

2.2 性能评估与数值结果

仿真环境为瑞利衰落、加性高斯白噪声信道。为简化分析过程, 假设各链路平均信噪比相等, 期望传输速率 $C_0 = 1\text{bits}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ 。图2给出了多中继混合转发协作传输策略协作中继节点数分别为1和2时的大信噪比情况下近似的中断概率性能。为了体现 MRHF-CTS 的性能增益, 同时给出了直接传输、AF 协作传输策略、DF 协作传输策略以及多中继完全译码 DF 协作传输策略相同条件下的大信噪比近似中断概率性能曲线。可以看到, 多中继混合转发协作传输策略在有效抑制因错误检测 DF 协作传输而严重降低系统性能的前提下, 获得了与 AF 协作传输相同的分集增益(大信噪比时中断概率曲线的斜率^[12]), 并趋近多中继 DF 协作通信系统的最好性能, 即协作中继节点均正确接收, DF 协作传输(多点协作传输)时的系统性能。

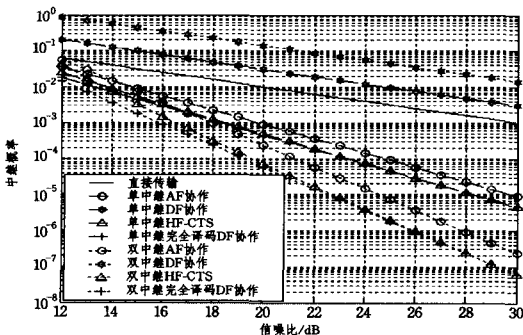


图2 不同策略的中断概率性能对比(大信噪比)

结束语 本文从有效简化全局网络规划及信令开销入手, 考虑优化多中继协作通信系统性能, 提出了一种多中继混合转发协作传输策略。在不同协作中继节点选择性地采用 DF 或 AF 传输方式的基础上, 充分利用无线网络的广播特性, 在数据中继转发的过程中, 考虑协作中继节点间的交互信息。研究表明, 本策略在以较低的系统设计复杂度获取分集增益的同时, 显著地提高了多中继协作通信系统的传输性能。

参考文献

- [1] 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
- [2] Su Wei-Feng, Sadek A K, Liu K J R. Cooperative Communication Protocols in Wireless Networks; Performance Analysis and Optimum Power Allocation [J]. Wireless Personal Communication, 2008, 44: 181-217
- [3] Zhao Yi, Adve R, Lim T J. Symbol Error Rate of Selection Amplify-and-Forward Relay Systems [J]. IEEE Communications Letters, 2006, 10(11): 757-759
- [4] Ibrahim A S, Sadek A K, Su Wei-Feng, et al. Cooperative Communications with Relay Selection; When to Cooperate and Whom to Cooperate with? [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(7): 2814-2827
- [5] 刘丹潜, 郝建军, 乐光新. 用于机会中继的一种最佳中继选择算法 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2008, 3(5): 483-487
- [6] 高伟东, 王文博, 袁广翔, 等. 协作通信中的中继节点选取和功率分配联合优化 [J]. 北京邮电大学学报, 2008, 31(2): 68-71
- [7] 惠懿, 朱世华, 李国兵. 一种基于放大转发的中继选择策略 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(4): 450-453
- [8] Laneman J N, Wornell G W. Distributed Space Time Coded Protocols for Exploiting Cooperative Diversity in Wireless Networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(10): 2415-2425
- [9] Zhang Jun, Lok T M. Performance Analysis of Multiple-relay Decode-and-Forward Cooperation System [C] // IEEE Tencon 2005, Melbourne, 2005
- [10] Zhang Jun, Lok T M. Multiple Source Multiple Relay Cooperation System [C] // IEEE International Conference on Communications (ICC). Istanbul, Turkey, 2006: 3735-3740
- [11] Stanojev I, Simeone O, Bar-Ness Y. Performance Analysis of Collaborative Hybrid-ARQ Protocols over Fading Channels [C] // Sarnoff Symposium, 2006: 1-4
- [12] Laneman J N. Limiting Analysis of Outage Probabilities for Diversity Schemes in Fading Channels [C] // Proc. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), San Francisco, CA, 2003

(上接第 66 页)

- [7] Wagner D, Sotl P. Mimicry attacks on host-based intrusion detection systems [C] // Proc. of the 2002 ACM Conference on Computer and Communications Security. New York: ACM Press, 2002: 255-264

- [8] Yan Ye. Text Image Compression Based on Pattern Matching [D]. University of California, 2002
- [9] 饶鲜, 董春曦, 杨绍全. 基于支持向量机的入侵检测系统 [J]. 软件学报, 2003, 14(4): 798-803
- [10] 李闻, 戴英侠, 连一峰, 等. 基于混杂模型的上下文相关主机入侵检测系统 [J]. 软件学报, 2009, 20(1): 138-151