

文章编号:1004-9037(2012)02-0264-04

Nakagami- m 信道环境下基于增量中继的 译码转发机会选择策略

张亚龙^{1,2} 高媛媛¹ 沈春明¹ 杨保锋¹ 李 克³

(1. 解放军理工大学通信工程学院,南京,210007; 2. 太原卫星发射中心,太原,036301;
3. 中国人民解放军96263部队,洛阳,471500)

摘要:研究了基于增量中继机会选择策略在Nakagami- m 信道下的中断概率和吞吐量性能。在目的端采用选择性合并方式的条件下,理论分析得出了该策略在进行译码转发时的中断概率与吞吐量的闭合表达式,仿真结果与该理论值相一致。仿真结果还表明,基于增量中继的DF机会选择策略的吞吐量性能与传统机会选择策略的吞吐量性能相比有了较大的提升。

关键词:译码转发;增量中继;选择性合并;中断概率;吞吐量

中图分类号:TN911.2

文献标识码:A

Incremental-Opportunistic-Relay Decoded and Forward Technique over Nakagami- m

Zhang Yalong^{1,2}, Gao Yuanyuan¹, Shen Chunming¹, Yang Baofeng¹, Li Ke³

(1. Department of Wireless Communication, PLA University of Science and Technology, Nanjing, 210007, China;
2. Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan, 036301, China;
3. Unit 96263, PLA, Luoyang, 471500, China)

Abstract: In Nakagami- m channel, the outage probability and throughput of incremental relaying using opportunistic are investigated. Using the mode of selection combining (SC), including direct link, the closed-form expressions for the outage probability and throughput is derived at an arbitrary signal to noise ratio (SNR) regime, using the decode and forward method. Computational result verifies the analysis. The incremental relaying using opportunistic is compared with the one using opportunistic without incremental relaying. Simulation result shows that the throughput of the incremental relaying using opportunistic outperforms the traditional opportunistic relaying.

Key words: decode and forward; incremental relaying; selective combining; outage probability; throughput

引 言

在无线网络中,协同通信是一种非常有潜力的技术,它能够在不增加设备复杂度的前提下提高系统的性能。协同通信的基本思想是在多用户通信环境中,使用单副天线的各邻近用户可按照一定方式共享彼此的天线协同发送,产生一种类似虚拟多天线发送的环境,从而获得空间分集增益,提高系统

性能。协同通信融合了中继技术和分集技术的优势,能够在不增加单个设备天线的基础上在传统的无线网络中获得多天线和多跳的相近性能^[1]。

Bletsas^[2]给出了协同中继节点机会选择(Opportunistic relaying, OR)策略,这种方法是每次按照一定的标准只选择一个最优中继节点来和源节点协同。该方法和全部中继节点协同^[3]相比在不降低分集的前提下降低能耗和系统的复杂度。不过Bletsas只研究了机会选择策略在瑞利衰落信道下

的中断概率性能,没有针对更为实用的 Nakagami- m 信道展开研究^[5]。Su^[5]研究了 Nakagami- m 信道条件下的机会选择策略在目的端使用选择性合并时的中断概率性能,发现虽然选择性合并(SC)的中断概率性能不如最大比值合并(MRC)的中断概率性能,但是选择性合并对接收机的要求简单,且与最大比值合并相比性能相差不大。

传统的机会选择策略不论信道环境好坏,是否需要协同,要求始终有一个中继节点参与协同。当信道条件足够好,协同对于系统性能的提升会很小,此时采用传统的机会选择策略反而会造成吞吐量的显著下降。增量中继选择策略则是在信道条件好时,系统不采用协同的方式,而当信道条件较差无法满足业务需求时,选择一个最优中继节点来进行协同。因此,增量中继选择策略与传统的机会选择相比,性能相差不大但吞吐量会有显著的提升。Wang^[6]研究了瑞利衰落信道环境下基于增量中继的分布式译码转发机会选择策略(Distributed opportunistic incremental decode-and-forward, DOIDF)在MRC合并方式下的中断概率性能,但其未考虑协同传输时的直传路径,而在实际中直传路径对于系统性能的影响很大。文献[7]研究了基于增量中继的DF机会选择策略的中断概率性能和吞吐量,但该研究结论只适用于高信噪比,在低信噪比情况下理论值与仿真值差异较大。

本文研究了基于增量中继的DF机会选择策略在 Nakagami- m 信道条件下的中断概率性能与吞吐量。首先得到了在任意信噪比情况下考虑直传路径时采用选择性合并方式的中断概率,在此基础上进一步研究了该策略的吞吐量性能,最终的仿真结果与理论分析结论完全一致。

1 系统模型

假设在某一区域内有 $M+2$ 个终端,每个终端只有1个天线,且每个终端都可以发送信息和接收信息。为了介绍的方便,这里把终端称作节点。本文研究模型如图1所示。在该系统中共有 $M+2$ 个节点,1个源节点(S),1个目的节点(D)和 M 个中继节点($R_i, i=1, \dots, M$)。 h_{SR_i} 表示链路 $S-R_i$ 的衰落系数, h_{SD} 表示链路 $S-D$ 的衰落系数, h_{R_iD} 表示链路 R_i-D 的衰落系数。 h_{SR_i}, h_{SD} 和 h_{R_iD} 相互独立且服从因子为 m_{SR_i}, m_{SD} 和 m_{R_iD} 的 Nakagami- m 衰落。各条链路中噪声均为均值为0,方差为 N_0 的加性高斯白噪声。假设源节点与中继节点的发射功率为 P ,则

$\gamma_{SR_i} = |h_{SR_i}|^2 P/N_0$, $\gamma_{SD} = |h_{SD}|^2 P/N_0$ 和 $\gamma_{R_iD} = |h_{R_iD}|^2 P/N_0$ 分别表示 $S-R_i, S-D$ 和 R_i-D 的瞬时接收信噪比。 $\overline{\gamma_{SR_i}} = E(|h_{SR_i}|^2) P/N_0$, $\overline{\gamma_{SD}} = E(|h_{SD}|^2) P/N_0$ 和 $\overline{\gamma_{R_iD}} = E(|h_{R_iD}|^2) P/N_0$ 为相应的平均接收信噪比,其中 $E(\cdot)$ 表示对括号内数值求期望。

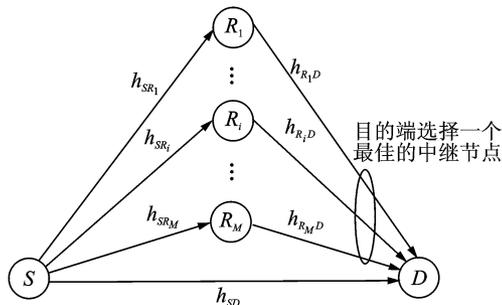


图1 系统模型

基于正交信道,这里假设为时分多通道(Time division multiple access, TDMA)系统。整个协同过程分为两个阶段或两个时隙,第1个时隙源节点 S 发送信息,中继节点 $R_i (i=1, \dots, M)$ 和目的节点 D 侦听信息。如果目的节点能够正确译码出源节点信息(亦即没有发生中断^[8]),则此时中继节点不需要参与协同,源节点在下一个时隙发送新的信息。如果目的节点不能正确译码出源信息(亦即发生了中断),则在下一个时隙中从中继节点里选择到目的节点的信噪比中最高的一路信息对所收到的源节点信息进行转发,目的节点在收到的两路信息(源节点发送的信息和中继节点转发的信息)中选择信噪比最大的一路信息进行译码接收。

假设系统所要求的频谱效率为 $C \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$,源节点和第 i 个中继节点之间的互信息可以表示为

$$I_i = \log_2(1 + \gamma_{SR_i}) \quad (1)$$

如图1,在源节点和目的节点之间可以看成共有 $M+1$ 条路径,用0表示 $S-D$ 直接传输路径,用 i 表示 $S-R_i-D$ 非直接传输路径。对于非直传路径, y_i 被引入来表示路径 i 在目的端的瞬时信噪比, y_i 是结合了两个信道($S-R_i, R_i-D$)情况的变量。根据文献[8],当 $I_i < C$ 时,即中继 R_i 不能够正确解出源信息,则在目的端,经由中继 R_i 传输的信号信噪比为0,此时,条件概率密度函数 $f_{y_i|R_i \text{ is off}}(x)$ 表示为 $\delta(x)$,其中 $\Pr(R_i \text{ is off}) = \Pr(I_i < C) = A_i$ 为中继节点 R_i 不能正确译码出源信息的概率。当 $I_i > C$ 时,在目的端,经由中继 R_i 传输的信号信噪比为

$$f_{y_i|R_i \text{ is on}}(x) = \frac{(m_{R_i,D}/\sqrt{\gamma_{R_i,D}})^{m_{R_i,D}} x^{m_{R_i,D}-1}}{\Gamma(m_{R_i,D})} \cdot \exp\left[\frac{-m_{R_i,D}x}{\gamma_{R_i,D}}\right]$$

式中 $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数^[9], $\Pr(R_i \text{ is on}) = \Pr(I_i \geq C) = 1 - A_i$ 为中继节点 R_i 能够正确译码出源信息的概率。则接收端所接收到的信号瞬时信噪比 y_i 的概率密度函数为^[10-11]

$$f_{y_i}(x) = f_{y_i|R_i \text{ is off}}(x)\Pr(R_i \text{ is off}) + f_{y_i|R_i \text{ is on}}(x)\Pr(R_i \text{ is on}) \quad (2)$$

这里, 定义 $A_i = \Pr(R_i \text{ is off})$, 所以有^[10-11]

$$A_i = \Pr(R_i \text{ is off}) = \Pr(I_i < C) = \Pr(\gamma_{SR_i} < C) = 1 - \frac{\Gamma(m_{SR_i}, (m_{SR_i}/\sqrt{\gamma_{SR_i}})x)}{\Gamma(m_{SR_i})} \quad (3)$$

式中 $\Gamma(\cdot, \cdot)$ 为不完整的 Gamma 函数^[9] (如 $\Gamma(m, x) = \int_x^\infty t^{m-1} \exp(-t) dt$)。

则 y_i 的分布函数可表示为

$$F_{y_i}(x) = 1 - (1 - A_i) \frac{\Gamma(m_{R_i,D}, (m_{R_i,D}/\sqrt{\gamma_{R_i,D}})x)}{\Gamma(m_{R_i,D})} \quad (4)$$

令 $\chi = \max_{i=1, \dots, M}(y_i)$ 表示目的端瞬时信噪比最大值, 则有

$$F_\chi(x) = \Pr(\max(y_i) < x) = \prod_{i=1}^M F_{y_i}(x) = \prod_{i=1}^M \left[1 - (1 - A_i) \frac{\Gamma(m_{R_i,D}, (m_{R_i,D}/\sqrt{\gamma_{R_i,D}})x)}{\Gamma(m_{R_i,D})} \right] \quad (5)$$

2 性能分析

2.1 中断概率性能分析

当不考虑增量中继时, 传统的机会选择策略在 SC 方式下的中断概率可以表示为

$$P_{\text{OR}} = \Pr(\max(\max(y_i), \gamma_{SD}) < 2^C - 1) \quad (6)$$

式中 γ_{SD} 表示 S - D 的瞬时信噪比, $\max(\max(y_i), \gamma_{SD})$ 表示在直接传输和最优路径中选择一个信噪比较高的信号作为接收信号。

由文献[7]可知, 在直传路径发生中断并且中继节点参与协同也发生了中断时, 基于增量中继的机会选择策略才发生中断, 因此基于增量中继的 DF 机会选择策略的中断概率可表示成

$$P_{\text{SC}} = \Pr(\max(\max(y_i), \gamma_{SD}) < 2^C - 1, \gamma_{SD} < 2^C - 1) = \Pr(\max(y_i) < 2^C - 1) \Pr(\gamma_{SD} < 2^C - 1) =$$

$$F_\chi(2^C - 1) \Pr(\gamma_{SD} < 2^C - 1) = \prod_{i=1}^M F_{y_i}(2^C - 1) \cdot$$

$$\left(1 - \frac{\Gamma(m_{SD}, (m_{SD}/\sqrt{\gamma_{SD}})(2^C - 1))}{\Gamma(m_{SD})} \right) = \prod_{i=1}^M \left(1 - (1 - A_i) \frac{\Gamma(m_{R_i,D}, (m_{R_i,D}/\sqrt{\gamma_{R_i,D}})(2^C - 1))}{\Gamma(m_{R_i,D})} \right) \left(1 - \frac{\Gamma(m_{SD}, (m_{SD}/\sqrt{\gamma_{SD}})(2^C - 1))}{\Gamma(m_{SD})} \right) \quad (7)$$

式中: $\gamma_{SD} < 2^C - 1$ 表示直传路径发生了中断, 即目的节点不能够正确解出源信息; $\Pr(\max(\max(y_i), \gamma_{SD}) < 2^C - 1)$ 表示当需要协同时目的节点使用 SC 处理信号时发生中断的概率。

2.2 平均频谱效率性能分析

分析增量中继的吞吐量需分为两部分进行, 一部分是源节点直接传输, 另一部分是源节点利用中继节点进行协同。则基于增量中继的 DF 机会选择策略的平均频谱效率^[7]可以表示为

$$C'_{\text{SC}} = \Pr(\log_2(1 + \gamma_{SD}) \geq C) \cdot C + \Pr(\log_2(1 + \gamma_{SD}) < C) (1 - P_{\text{SC}}) \cdot \frac{C}{2} = (1 - A_i) \cdot C + A_i (1 - P_{\text{SC}}) \cdot \frac{C}{2} \quad (8)$$

当目的节点能够正确接收信息时, 也即 $\log_2(1 + \gamma_{SD}) \geq C$, 此时系统传输的吞吐量为 $C \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$; 如果目的节点不能够正确解出源信息, 也即 $\log_2(1 + \gamma_{SD}) < C$, 此时系统传输的吞吐量为 $C/2 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。

3 性能仿真

图 2 给出了在中继个数 M 分别为 4~6, 衰落因子 $m_{SD} = m_{SR_i} = m_{R_i,D} = 3 (i = 1, \dots, M)$, 目标信息速率 $C = 2 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 的情况下的基于增量中继的机会选择策略的中断概率性能理论值与仿真结果。由图 2 可知, 不论在高信噪比还是在低信噪比情况下, 本文所分析得到的理论值与仿真值均能够很好地吻合。此外, 随着中继个数 M 的增加, 中断概率会逐渐变小, 中断概率性能会逐渐变好。

图 3 在 $m_{SD} = m_{SR_i} = m_{R_i,D} = 2 (i = 1, \dots, M)$, $C = 2 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 的条件下, 基于增量中继的机会选择策略与传统机会选择策略在 $M = 4, 5, 6$ 时的吞吐量性能。与传统的机会选择策略相比, 基于增量中继的机会选择策略的吞吐量有了很大的提升, 这是因为基于增量中继的机会选择策略只是在直接传输不成功时才使用协同。如式(8), 当直接传输路径信道条件比较好时, $\Pr(\log_2(1 + \gamma_{SD}) \geq C)$ 的值较大, 此时吞吐量性能会有很大的提升。相比如

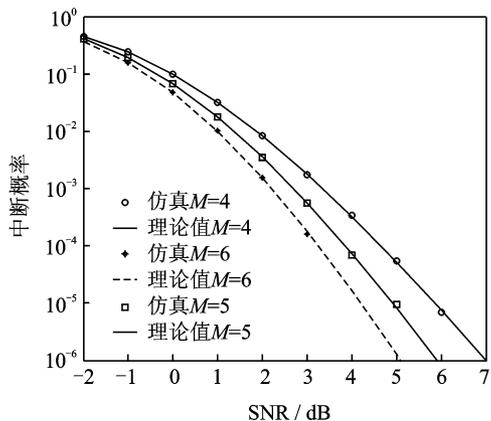


图2 基于增量中继的机会选择策略的中断概率性能

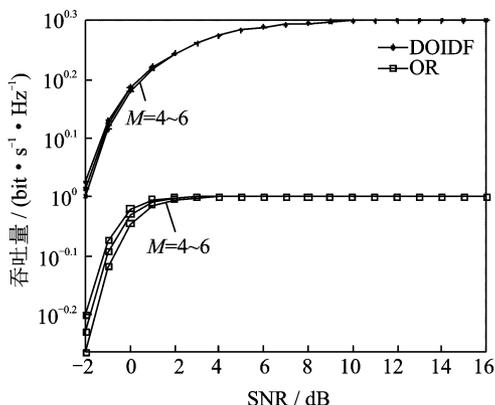


图3 基于增量中继的机会选择策略与传统机会选择策略吞吐量的对比

果直接传输路径的信道条件比较差, $\Pr(\log_2(1+\gamma_{SD}) < C)$ 的值较低, 此时吞吐量性能会下降。如果 $\Pr(\log_2(1+\gamma_{SD}) < C) = 1$, 此时基于增量中继的机会选择策略与传统的机会选择策略的吞吐量性能一样。

4 结束语

本文研究了基于增量中继的DF机会选择策略在Nakagami- m 信道条件下的中断概率性能与吞吐量, 仿真结果显示, 不论在高信噪比还是在低信噪比情况下, 本文分析得到的理论值与仿真值均能够很好地吻合。此外, 基于增量中继的DF机会选择策略的吞吐量性能与传统机会选择策略的吞吐量性能相比有了较大的提升。

参考文献:

- [1] Laneman N, Wornell G. Cooperative diversity in wireless networks; efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Trans, 2004(1):3062-3070.
- [2] Aggelos A, David P, Andrew L. A simple cooperative diversity method based on network path selection[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Commun, 2006(5):651-663.
- [3] Zhao Y, Adwe R, Teng L. Outage probability at arbitrary SNR with cooperative diversity[J]. IEEE Commun Letters, 2005(8):700-702.
- [4] Weifeng S, Xin L. On optimum selection relaying protocols in cooperative wireless networks [J]. IEEE Trans on Commun IEEE Trans, 2010(3):52-59.
- [5] Kun-Wah Y, Tung-Sang N. A simulation model for Nakagami- m fading channels, $m < 1$ [J]. IEEE Trans on Commun, 2000(5):214-221.
- [6] Chen S, Wang X. Cooperative transmission in wireless networks using incremental opportunistic relaying strategy [J]. IET Commun, 2009 (12): 1948-1957.
- [7] Ramy N, Tannious A. Spectrally-efficient relay selection with limited feedback[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Commun, 2008(10):1419-1428.
- [8] Salama S, Ikki A. Performance analysis of adaptive decode-and-forward cooperative diversity networks with best-relay selection[J]. IEEE Trans on Commun, 2010(1):68-72.
- [9] Ryzhik M. Table of integrals, series, and products [M]. California: Academic Press of Elsevier, 2007.
- [10] Norman C, Beaulieu H. A closed-form expression for the outage probability of decode-and-forward relaying in dissimilar Rayleigh fading channels [J]. IEEE Commun Letters, 2006(12):813-815.
- [11] Marvin S, Mohamed-Slim A. Digital communication over fading channels [M]. New York: A Wiley-Interscience Publication, 2000.

作者简介:张亚龙(1985-),男,硕士研究生,研究方向:无线网络、协同通信,E-mail:yalong08@gmail.com;高媛媛(1968-),女,教授,研究方向:无线网络、移动通信;沈春明(1984-),男,硕士研究生,研究方向:无线网络;杨保峰:(1978-),男,博士研究生,研究方向:无线网络;李克(1982-),男,硕士研究生,研究方向:无线网络、协同通信。