

Nakagami- m 衰落信道下固定增益中继系统性能分析

赵 睿^{1,2}, 李春国¹, 王海荣¹, 杨绿溪¹

(1. 东南大学信息科学与工程学院, 江苏南京 210096; 2. 华侨大学信息科学与工程学院, 福建泉州 362021)

摘要: 在 Nakagami- m 衰落信道下, 分析了两跳固定增益放大转发中继通信系统的性能. 首先采用基于概率密度函数(PDF)的性能分析法推导了无协作分集时系统的中断概率和平均误符号率(ASER)的闭合表达式, 然后采用基于矩生成函数(MGF)的方法推导了有协作分集时系统的中断概率和 ASER 表达式以及接收信噪比的 n 阶矩的闭合表达式. 仿真结果显示, 所推导的闭合表达式与数值仿真结果吻合良好, 协作分集和较大的 m 值可提升系统性能, 中继前后两跳的信道质量对系统性能的影响并不相同.

关键词: 放大转发中继; 协作分集; Nakagami- m 衰落信道; 中断概率; 平均误符号率

中图分类号: TN911.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 01-0162-06

Performance Analysis of Fixed Gain Relaying Systems in Nakagami- m Fading Channels

ZHAO Rui^{1,2}, LI Chun-guo¹, WANG Hai-rong¹, YANG Lü-xi¹

(1. School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China)

Abstract: The performance of dual-hop communication systems with fixed gain amplify-and-forward relay is analyzed over non-identical Nakagami- m fading channel. First, Closed-form expressions for outage probability and average symbol error rate (ASER) are derived based on probability density function (PDF) method for the system without cooperative diversity. Then, the expressions for outage probability and ASER and closed-form expression of the n -th moment of received SNR are derived based on moment generating function (MGF) method for the system with cooperative diversity. Simulation results show that, the derived expressions match well with the numerical simulations, and cooperative diversity and larger m values are both of benefit to the improvement of system performance, and the channel quality of the first hop and that of the second hop have different effects on the system performance.

Key words: amplify-and-forward relay; cooperative diversity; Nakagami- m fading channel; outage probability; average symbol error rate (ASER)

1 引言

基于中继的协作通信技术可在无需增加发送端功率的前提下增加通信可靠性、扩大覆盖面和提高系统和速率, 已获得越来越多的关注^[1,2]. 放大转发 (AF) 中继由于无需解码, 信号处理的复杂度较低, 被广泛采用^[3~5]. AF 中继又可根据信号处理方式分为两种: 可变增益中继, 中继根据第一跳的瞬时信道状态信息 (CSI) 确定放大增益; 固定增益 (半盲) 中继, 中继根据第一跳的统计 CSI 确定放大增益. 尽管采用固定增益中继的系统在总体性能上不如采用可变增益中继的系统, 但由于其无需瞬时 CSI, 所以复杂度较低, 在实际系统中较容

易实现^[6]. 在两跳三节点中继系统中, 当信源与信宿间距离较远无法建立有效通信时, 信源需借助中继与信宿联系, 当信源与信宿可取得有效通信时, 信宿可利用直接链路获得协作分集 (CD), 采用最大比合并 (MRC) 技术合并两路信号, 从而进一步提升系统性能.

当信道服从瑞利衰落时, 文献[7]和[6]分别分析了可变增益 AF 中继和固定增益 AF 中继系统的中断概率和误比特率性能. 文献[8]研究了瑞利信道下信源配置多天线的系统中断概率性能. 由于 Nakagami- m 信道模型能够较好地反映多径衰落信道的特征, 也被广泛研究. 文献[9]研究了 Nakagami- m 衰落信道下的两跳可变增益 AF 中继系统的性能. 对于 Nakagami- m 信道下的两

跳固定增益 AF 中继系统,文献[10]推导了点对点信噪比的 n 阶矩表达式.文献[11]进一步研究了该信道下多中继网络的性能,给出了平均误符号率 (ASER) 的渐近闭合表达式.

本文针对不同 m 参数 Nakagami- m 信道下的固定增益 AF 中继系统,对有/无协作分集时的系统性能进行对比研究.首先根据两跳信噪比的概率密度函数 (PDF) 推导了无协作分集时接收信噪比的 PDF 和概率分布函数 (CDF) 的闭合表达式,通过采用基于 PDF 的性能分析法给出了无协作分集时系统 ASER 闭合表达式;然后推导了有协作分集时接收端信噪比的矩生成函数 (MGF) 的闭合表达式,采用基于 MGF 的性能分析法分析了有协作分集时系统的中断概率和 ASER 性能,并给出了接收信噪比的 n 阶矩闭合表达式.当 $m=1$ 时,本文所推导的闭合表达式即退化成为瑞利信道下的表达式.最后通过数值仿真验证了所推表达式的正确性,并分析了信道不均衡性对系统性能的影响.

2 系统模型

考虑一个两跳无线通信系统,见图 1,信源 S 与 AF 中继 R 协作往信宿 D 发送信号,每个节点都配置单天线, h_0 、 h_1 和 h_2 分别为 S \rightarrow D、S \rightarrow R 和 R \rightarrow D 链路的信道衰落系数,假定每条链路均服从 Nakagami- m 分布, m_0 、 m_1 和 m_2 分别为 h_0 、 h_1 和 h_2 的 Nakagami 参数.在第一时隙,信源往中继和信宿发送信号 x ,中继和信宿的接收信号分别为:

$$y_R^1 = h_1 x + n_R \quad (1)$$

$$y_D^1 = h_0 x + n_D^1 \quad (2)$$

其中,信源发送信号 x 的平均功率为 E_S ,即 $\mathbb{E}\{|x|^2\} = E_S$; n_R 和 n_D^1 分别为中继和信宿端的加性白高斯噪声 (AWGN),方差满足 $\mathbb{E}\{|n_R|^2\} = \mathbb{E}\{|n_D^1|^2\} = N_0$.

在第二时隙,中继将接收到的信号放大后转发给信宿,信宿的接收信号为:

$$y_D^2 = G h_2 y_R^1 + n_D^2 = G h_2 h_1 x + G h_2 n_R + n_D^2 \quad (3)$$

信宿端接收到来自中继的信号的信噪比为:

$$\gamma_r = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{C + \gamma_2} \quad (4)$$

其中 γ_1 和 γ_2 分别为两跳链路的瞬时信噪比, $\gamma_1 = E_S |h_1|^2 / N_0$, $\gamma_2 = E_R |h_2|^2 / N_0$, $C = E_R / (G^2 N_0)$.

当信宿采用 MRC 技术合并来自信源和中继的接收信号时,此时信宿利用了协作分集,信宿端的等效信噪比可表达成为:

$$\gamma_{eq} = \gamma_0 + \gamma_r = \gamma_0 + \frac{\gamma_1 \gamma_2}{C + \gamma_2} \quad (5)$$

其中 γ_0 为直达链路的瞬时信噪比, $\gamma_0 = E_S |h_0|^2 / N_0$. 各跳链路平均信噪比为 $\bar{\gamma}_i = \mathbb{E}\{\gamma_i\}$, $i=0,1,2$. 由于三跳链路均为 Nakagami- m 衰落信道,所以 γ_i 均服从 Gamma 分布,即 $\gamma_i \sim \mathcal{A}(m_i, \bar{\gamma}_i / m_i)$, $i=0,1,2$, $\mathcal{A}(\alpha, \beta)$ 是参数为 α 和 β 的 Gamma 分布,则 γ_i 的 PDF 和 MGF 分别为^[12]:

$$p_{\gamma_i}(\gamma_i) = \frac{m_i^m \gamma_i^{m-1}}{\bar{\gamma}_i^m \Gamma(m_i)} \cdot \exp\left(-\frac{m_i \gamma_i}{\bar{\gamma}_i}\right) \quad (6)$$

$$M_{\gamma_i}(s) = \left(1 + \frac{s \bar{\gamma}_i}{m_i}\right)^{-m_i} \quad (7)$$

其中 $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数,定义为 $\Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt$.

通过运用文献[13]中式(3.383.10), G^2 可表示为:

$$\begin{aligned} G^2 &= \mathbb{E}_{\gamma_1} \left\{ \frac{E_R}{N_0 (\gamma_1 + 1)} \right\} \\ &= \frac{E_R}{N_0} \left(\frac{m_1}{\gamma_1} \right)^{m_1} \Gamma(1 - m_1, m_1 / \bar{\gamma}_1) \exp(m_1 / \bar{\gamma}_1) \end{aligned}$$

其中, $\Gamma(\cdot, \cdot)$ 为不完全 Gamma 函数,定义见文献[11, eq. 8.350.2]. 由 $C = E_R / (G^2 N_0)$ 可知:

$$C = \frac{\bar{\gamma}_1^{m_1} \exp(-m_1 / \bar{\gamma}_1)}{m_1^{m_1} \Gamma(1 - m_1, m_1 / \bar{\gamma}_1)} \quad (8)$$

3 性能分析

本节分析两跳固定增益 AF 中继系统的性能.首先利用 γ_i ($i=1,2$) 的 PDF 求得 γ_r 的 CDF,通过对其求导获得 γ_r 的 PDF,然后进一步利用基于 PDF 和 MGF 的分析法来分析无协作分集和有协作分集时的系统中断概率、ASER 和接收信噪比的 n 阶矩性能.

定理 1 当 m_1 为自然数时,无协作分集时接收端信噪比 γ_r 的 CDF 的闭合表达式为:

$$\begin{aligned} P_{\gamma_r}(\gamma_{th}) &= 1 - \frac{2m_2^{m_2}}{\bar{\gamma}_2^{m_2} \Gamma(m_2)} \sum_{k=0}^{m_1-1} \frac{m_1^k}{k!} \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \\ &\quad \cdot C^i \left(\frac{C m_1 \bar{\gamma}_2}{m_2 \bar{\gamma}_1} \right)^{\frac{m_2-i}{2}} \gamma_{th}^{k+\frac{m_2-i}{2}} \exp\left(-\frac{m_1 \gamma_{th}}{\bar{\gamma}_1}\right) \\ &\quad \cdot K_{m_2-i} \left(2\sqrt{\frac{C m_1 m_2 \gamma_{th}}{\bar{\gamma}_1 \bar{\gamma}_2}} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

其中, γ_{th} 为给定信噪比门限, $K_v(\cdot)$ 为第二类 v 阶修正贝塞尔函数,其定义见文献[12, eq. 9.6.22],是计算软件 Matlab 中的内置函数.

证明 由文献[13]中式(3.351.1)、式(3.381.4)和式(3.471.9)推得,等式成立的条件是 m_1 为自然数.

引理 1 无协作分集时接收端信噪比 γ_r 的 PDF 的闭合表达式为:

$$p_{\gamma_r}(x) = \frac{2m_1^{m_1} m_2^{m_2} x^{m_1-1} \exp\left(-\frac{m_1 x}{\bar{\gamma}_1}\right)}{\bar{\gamma}_1^{m_1} \bar{\gamma}_2^{m_2} \Gamma(m_1) \Gamma(m_2)}$$

$$\begin{aligned} & \cdot \sum_{k=0}^{m_1} \binom{m_1}{k} C^k \left(\frac{m_1 \bar{C} \gamma_2 x}{\gamma_1 m_2} \right)^{\frac{m_2-k}{2}} \\ & \cdot K_{m_2-k} \left(2\sqrt{\frac{m_1 m_2 \bar{C} x}{\gamma_1 \gamma_2}} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

证明 通过对 γ_r 的 CDF 表达式关于 γ_{th} 求导,再运用二项式定理和文献[13]中式(3.471.9)可推得上式.

3.1 无协作分集时系统的中断概率和平均误符号率性能

(1) 中断概率性能

中断概率在此定义为信宿端接收信噪比小于给定信噪比门限的概率. γ_r 的 CDF 式(9)就是无协作分集时的系统中中断概率的闭合表达式,即: $P_{out}^1 = P_{\gamma_r}(\gamma_{th})$.

(2) 平均误符号率性能

对于常用的调制模式,某一信噪比 γ 下的平均误符号率可表示为:

$$P_e = \mathbb{E}_{\gamma} \{ \beta_1 Q(\sqrt{2\beta_2 \gamma}) \} \quad (11)$$

其中, $Q(\cdot)$ 为高斯 Q 函数,定义为 $Q(\alpha) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_{\alpha}^{\infty} \exp(-x^2/2) dx$. β_1 和 β_2 为调制常数,调制模式包括 BPSK ($\beta_1 = 1, \beta_2 = 1$)、正交信号 BFSK ($\beta_1 = 1, \beta_2 = 0.5$)、最小相关 BFSK ($\beta_1 = 1, \beta_2 = 0.715$) 和 M 元 PAM ($\beta_1 = 2(M-1)/M, \beta_2 = 3/(M^2-1)$)^[15]. 对于其他一些调制模式该表达式为近似 ASER 表达式,比如 M-PSK ($\beta_1 = 2, \beta_2 = \sin^2(\pi/M)$).

可进一步将式(11)表达成接收信噪比的概率分布函数的积分形式^[15]:

$$P_e = \frac{\beta_1 \sqrt{\beta_2}}{2\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\beta_2 x}}{\sqrt{x}} P_{\gamma_r}(x) dx \quad (12)$$

将式(9)代入式(12),无协作分集时系统的 ASER 可表示为:

$$\begin{aligned} P_e^1 &= \frac{\beta_1 \sqrt{\beta_2}}{2\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\beta_2 x}}{\sqrt{x}} P_{\gamma_r}(x) dx \\ &= \frac{\beta_1 m_2^2 \beta_1 \sqrt{\beta_2}}{2\sqrt{\pi} \gamma_2^2 \Gamma(m_2)} \sum_{k=0}^{m_1-1} \frac{m_1^k}{k! \gamma_1^k} \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \cdot C^i \left(\frac{C m_1 \bar{\gamma}_2}{m_2 \gamma_1} \right)^{\frac{m_2-i}{2}} \end{aligned} \quad (13)$$

其中

$$I_1 = \int_0^{\infty} x^{k+\frac{m_2-i}{2}} e^{-(\beta_2+m_1/\gamma_1)x} K_{m_2-i} \left(2\sqrt{\frac{m_1 m_2 \bar{C} x}{\gamma_1 \gamma_2}} \right) dx$$

通过变量替换,令 $y = \sqrt{x}$,则 I_1 可表示为:

$$I_1 = \int_0^{\infty} 2y^{2k+m_2-i} e^{-(\beta_2+\frac{m_1}{\gamma_1})y^2} K_{m_2-i} \left(2\sqrt{\frac{m_1 m_2 \bar{C}}{\gamma_1 \gamma_2}} y \right) dy \quad (14)$$

对式(14)运用文献[13]中式(6.631.3),并将其代入式(13),可得无协作分集时系统 ASER 闭合表达式

为:

$$\begin{aligned} P_e^1 &= \frac{\beta_1}{2} - \frac{m_2^2 \beta_1 \sqrt{\beta_2}}{2\sqrt{\pi} \gamma_2^2 \Gamma(m_2)} \sum_{k=0}^{m_1-1} \frac{m_1^k}{k! \gamma_1^k} \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \\ & \cdot C^i \left(\frac{C m_1 \bar{\gamma}_2}{m_2 \gamma_1} \right)^{\frac{m_2-i}{2}} \left(\beta_2 + \frac{m_1}{\gamma_1} \right)^{-\frac{1}{2}(2k+m_2-i)} \\ & \cdot \left(\frac{m_1 m_2 \bar{C}}{\gamma_1 \gamma_2} \right)^{-\frac{1}{2}} \Gamma\left(k+m_2-i+\frac{1}{2}\right) \Gamma\left(k+\frac{1}{2}\right) \\ & \cdot e^{m_1 m_2 \bar{C}/(2\beta_2 \bar{\gamma}_1 \bar{\gamma}_2 + 2m_1 \bar{\gamma}_2)} W_{-\frac{1}{2}(2k+m_2-i), \frac{1}{2}(m_2-i)} \\ & \cdot \left(\frac{m_1 m_2 \bar{C}}{\beta_2 \gamma_1 \gamma_2 + m_1 \bar{\gamma}_2} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

其中 $W_{k,\lambda}(\cdot)$ 为 Whittaker 函数,其定义见文献[13]中式(9.222).

3.2 有协作分集时系统的中断概率、平均误符号率和接收信噪比的 n 阶矩性能

基于 MGF 的方法是一种简单有效的衰落信道下的系统性能分析方法^[12],下面我们通过基于 MGF 的方法来分折系统的中断概率和 ASER 性能.首先给出 γ_r 的 MGF 表达式.

定理 2 有协作分集时等效信噪比 γ_{eq} 的 MGF 的闭合表达式为:

$$\begin{aligned} M_{\gamma_{eq}}(s) &= \frac{m_1^{m_1} m_2^{m_2}}{\gamma_1^{m_1} \gamma_2^{m_2} \Gamma(m_2)} \left(\frac{m_1 m_2 \bar{C}}{\gamma_1 \gamma_2} \right)^{-\frac{1}{2}} \sum_{k=0}^{m_1} \binom{m_1}{k} \\ & \cdot C^k \left(\frac{m_1 \bar{C} \gamma_2}{\gamma_1 m_2} \right)^{\frac{m_2-k}{2}} \Gamma(m_1+m_2-k) \left(1 + \frac{s \bar{\gamma}_0}{m_0} \right)^{-m_0} \\ & \cdot \left(\frac{m_1}{\gamma_1} + s \right)^{-\frac{1}{2}(2m_1+m_2-k-1)} e^{m_1 m_2 \bar{C}/(2\bar{\gamma}_2 m_1 + 2\bar{\gamma}_1 \bar{\gamma}_2 s)} \\ & \cdot W_{-\frac{1}{2}(2m_1+m_2-k-1), \frac{1}{2}(m_2-k)} \left(\frac{m_1 m_2 \bar{C}}{\gamma_2 m_1 + \gamma_1 \gamma_2 s} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

证明 由 $M_{\gamma_r}(s) = \mathbb{E}_{\gamma_r} \{ e^{s\gamma_r} \}$ 并运用文献[13]中式(6.631.3),再通过 $M_{\gamma_{eq}}(s) = M_{\gamma_0}(s) \cdot M_{\gamma_r}(s)$ 推得.

(1) 中断概率性能

中断概率为 $M_{\gamma_{eq}}(s)/s$ 在 γ_{th} 处的拉普拉斯反变换,即:

$$P_{out}^2 = L^{-1} \left[\frac{M_{\gamma_{eq}}(s)}{s} \right]_{\gamma_{th}} \quad (17)$$

其中, L^{-1} 表示拉普拉斯反变换, γ_{th} 为信噪比门限.由于式(16)较为复杂,式(17)的解析解较难获得,可通过基于 Euler 求和的方法求得拉普拉斯逆变换的数值解^[16].

(2) 平均误符号率性能

已知 γ_{eq} 的 MGF,通过使用基于 MGF 的方法,我们可获得许多调制模式下的 ASER 表达式.比如,对于 M-PAM 调制,其 ASER 为:

$$P_e^2 = \frac{2(M-1)}{M\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} M_{\gamma_{eq}} \left(\frac{g_{MPAM}}{\sin^2 \theta} \right) d\theta \quad (18)$$

其中 $g_{MPAM} = 3/(M^2 - 1)$. M-PAM 调制下的 ASER 可表示为具有简化形式的上限, 即: $P_e^2 \leq \left(1 - \frac{1}{M}\right) M_{\gamma_{eq}}(g_{MPAM})$.

(3) 接收信噪比的 n 阶矩

接收信噪比的一阶矩和二阶矩是用来评价系统性能(如平均输出信噪比和衰落量)的重要参数. 更高阶矩对于信号检测、分类和估计等信号处理算法也非常有用, 对于评价衰落信道下宽带通信系统的性能具有重要作用.

定理 3 有协作分集时的等效信噪比 γ_{eq} 的 n 阶矩闭合表达式为:

$$E(\gamma_{eq}^n) = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \left(\frac{\bar{\gamma}_0}{m_0}\right)^k \frac{\Gamma(m_0+k)\Gamma(m_1+n-k)}{\Gamma(m_0)\Gamma(m_1)\Gamma(m_2)\Gamma(n-k)} \cdot \left(\frac{\bar{\gamma}_1}{m_1}\right)^{n-k} \left(\frac{Cm_2}{\gamma_2}\right)^{m_2} G_{2,1}^{1,2} \left[\frac{\bar{\gamma}_2}{Cm_2} \middle| \begin{matrix} 1, 1+m_2 \\ n-k+m_2 \end{matrix} \right] \quad (19)$$

其中 $G_{pq}^{mn}(\cdot)$ 为 Meijer's G 函数, 定义见文献 [13] 中式 (9.301), 该函数在 Maple 和 Mathematica 等数学软件中是标准的内置函数.

证明 由 n 阶矩定义并运用文献 [13] 中式 (3.381.4) 推得.

4 仿真结果与分析

本节通过数值仿真验证所推导的闭合表达式的正确性, 并比较有/无协作分集时系统中断概率、ASER 和接收端平均信噪比性能.

由图 2 可见, 无协作分集时接收信噪比的 PDF 的闭合表达式(式(10))在各种 m 值下都与数值仿真结果完全吻合. 接收信噪比的均值随着 m 值的增加而增加, 这是由于 Nakagami- m 信道的参数 m 为衰落指数, m 增大意味着衰落减小, 故而平均接收信噪比提高.

由图 3 可见, 在各种信道参数 m 值下, 数值仿真结

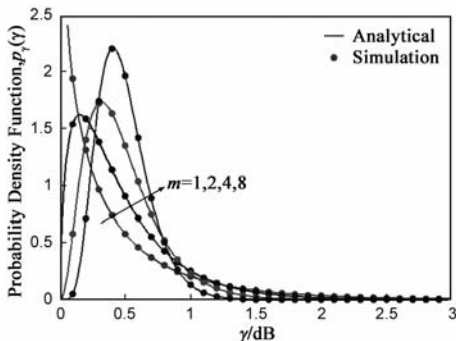


图2 无协作分集时接收信噪比的PDF的解析解和数值仿真结果比较($m_1=m_2=m, \bar{\gamma}_1=1, \bar{\gamma}_2=2, 10^5$ 次 Monte Carlo)

果与解析曲线吻合良好. 通过比较 $m_1 = 1, m_2 = 2$ 和 $m_1 = 2, m_2 = 1$ 这两种情况可见, 当第一跳和第二跳信道衰落分别相对于 $m_1 = 1, m_2 = 1$ 改善相同程度时, 第一跳信道对提升系统中断概率性能的作用大于第二跳信道, 这一推断也可通过比较 $m_1 = 2, m_2 = 3$ 和 $m_1 = 3, m_2 = 2$ 可见. 当中继前后两跳信道质量都有所提高时(即 $m_1 = 2, m_2 = 2$), 中断概率性能明显提升, 说明了两跳通信具有“瓶颈效应”, 当两跳信道质量相对均衡时, 系统性能便会显著增强.

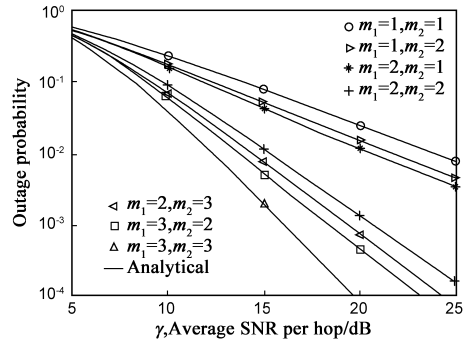


图3 无协作分集时在不同信道参数 m 值下系统中断概率性能 ($\bar{\gamma}_1=\bar{\gamma}_2=\gamma, \gamma_{th}=0\text{dB}, 10^6$ 次 Monte Carlo)

由图 4 可见, 当 $m = 1$ 时, 无协作分集时的中断概率曲线与文献 [6] 的图 2 中对应于“Fixed Gain Relays”的曲线相同, 且所有情况下的解析曲线与数值仿真结果完全吻合, 说明所推导的有/无协作分集这两种情况下的中断概率表达式(式(17)和式(9))是正确的. 与文献 [9] 中的图 1 对比可见, 在无协作分集时的系统中断概率性能方面, 可变增益 AF 中继优于固定增益 AF 中继, 这是因为可变增益 AF 中继根据瞬时信道状态调整放大系数, 以较高的复杂度换取性能优势. 当引入直达径后, 系统中断概率性能相比于无直达径时明显提升, 这是由于中继第二跳与直达径协作产生了分集增益.

由图 5 可见, 各种情况下的数值仿真结果与解析解均吻合. 对于 $m = 1 \sim 4$, 有协作分集时系统 ASER 性能均明显优于无协作分集时, 有/无协作分集时的 ASER 性能都随着 m 值的增大而提升.

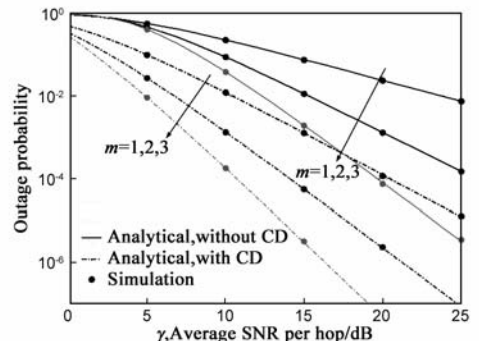


图4 有协作分集和无协作分集时系统中断概率性能比较 ($m_0=m_1=m_2=m, \gamma_0=\gamma_1=\gamma_2=r, r_{th}=0\text{dB}, 10^7$ 次 Monte Carlo)

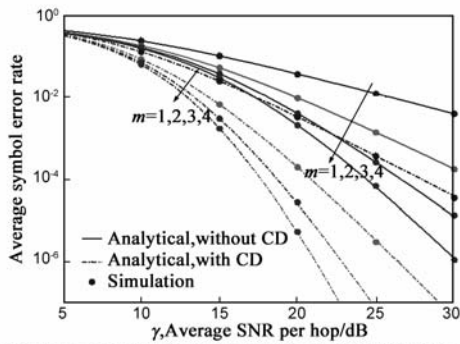


图5 有协作分集和无协作分集时系统ASER性能比较(A-PAM调制, $m_0=m_1=m_2=m, \gamma_0=\gamma_1=\gamma_2=\gamma, 10^7$ 次Monte Carlo)

下面仿真三种不同信噪比条件下的 ASER 性能, 分别记为 Case 1: $\bar{\gamma}_1 = 5\bar{\gamma}_0, \bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma}_0$; Case 2: $\bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}_0, \bar{\gamma}_2 = 5\bar{\gamma}_0$; Case 3: $\bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}_0, \bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma}_0$.

由图 6 可见, 当 $m = 1$ 时, 在 $\bar{\gamma}_0 = 5 \sim 30$ dB 范围内 Case 1 的 ASER 性能均优于 Case 2 和 Case 3, 可见, 在瑞利信道下, 中继第一跳信道的传输质量(平均接收信噪比)对于系统 ASER 的影响大于第二跳信道. 当 $m = 2$ 和 5 时, 在低 $\bar{\gamma}_0$ 的情况下, Case 1 的 ASER 性能仍优于 Case 2 和 Case 3, 但随着 $\bar{\gamma}_0$ 的提高, Case 2 的 ASER 性能逐渐优于其他两种情况, 可见, 在 Nakagami- m ($m > 1$) 信道下, 在低信噪比时中继第一跳接收信噪比对系统 ASER 性能影响较大, 在高信噪比时中继第二跳接收信噪比对 ASER 性能的提升起主导作用. 在实际通信场景中, 由于大尺度衰落等原因中继前后两跳传输质量通常不平衡, 此时应根据实际信道状况将发送功率在信源和中继间优化分配以提升系统总体性能.

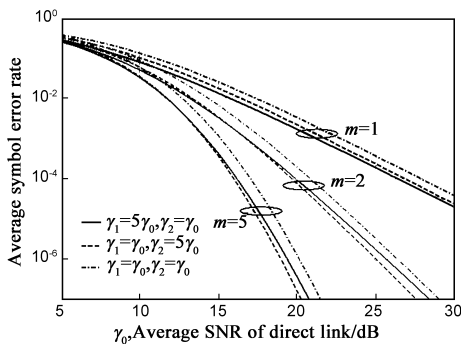


图6 有协作分集时在不同信噪比条件下的ASER性能比较(4-PAM调制, $m_0=m_1=m_2=m$)

5 结论

本文针对不同 m 参数 Nakagami- m 信道下的固定增益 AF 中继系统, 研究了无协作分集和有协作分集两种情况下的系统性能. 分别通过基于 PDF 和基于 MGF 的性能分析法推导了无协作分集和有协作分集时的系统中断概率和 ASER 的闭合表达式, 以及接收信噪比的 n 阶矩闭合表达式. 仿真结果表明, 各种情况下的数值

仿真结果与解析解吻合良好, 系统各方面性能均随着 m 参数的增大而提升, 有协作分集时系统性能均优于无协作分集时, 此外, 通过对信道不平衡时的性能分析发现, 中继前后两跳的信道质量对系统性能的影响是不相同的.

参考文献:

- [1] J N Laneman, D N C Tse, G W Wornell. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062 - 3080.
- [2] R Zhao, L X Yang, W P Zhu. Transmission scheme and performance analysis for decode-and-forward MIMO two-way relay systems[J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2009, 52(12): 2308 - 2316.
- [3] C G Li, X Yang, L X Yang, W P Zhu. A joint source and relay power allocation scheme for a class of MIMO relay systems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(12): 4852 - 4860.
- [4] 李春国, 赵睿, 仲崇显, 杨绿溪. 中继辅助的 MIMO 系统联合最优的功率分配研究[J]. 电子学报, 2010, 38(10): 2214 - 2218.
C G Li, R Zhao, C X Zhong, L X Yang. Investigation on joint optimal power allocation for MIMO systems assisted by relay [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(10): 2214 - 2218. (in Chinese)
- [5] 李汀, 杨绿溪. 一种前向放大中继通信系统中的有限反馈中继预编码方案[J]. 电子学报, 2010, 38(7): 1531 - 1534.
T Li, L X Yang. Limited feedback precoding for amplify-and-forward relaying [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(7): 1531 - 1534. (in Chinese)
- [6] M O Hasna, M S Alouini. A performance study of dual-hop transmissions with fixed gain relays[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2004, 3(6): 1963 - 1968.
- [7] M O Hasna, M S Alouini. End-to-end performance of transmission systems with relays over Rayleigh-fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2003, 2(6): 1126 - 1131.
- [8] H Min, S Lee, K Kwak, et al. Effect of multiple antennas at the source on outage probability for amplify-and-forward relaying systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2009, 8(2): 633 - 637.
- [9] M O Hasna, M S Alouini. Harmonic mean and end-to-end performance of transmission systems with relays [J]. IEEE Transactions on Communication, 2004, 52(1): 130 - 135.
- [10] D B Costa, M D Yacoub. Dual-hop transmissions with semi-blind relays over Nakagami- m fading channels [J]. Electronics Letters, 2008, 44(3): 214 - 216.

- [11] B Maham, A Hjørungnes. Asymptotic performance analysis of amplify-and-forward cooperative networks in a nakagami- m fading environment[J]. IEEE Communication Letter, 2009, 13(5): 300 – 302.
- [12] M K Simon, M S Alouini. Digital Communication over Fading Channels[M]. New York: Wiley, 2000.
- [13] I S Gradshteyn, I M Ryzhik. Table of Integrals, Series, and Products, 6th ed[M]. San Diego, CA: Academic, 2000.
- [14] M Abramowitz, I A Stegun. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, 9th ed [M]. New York: Dover, 1970.
- [15] M R McKay, A Grant, I B Collings. Performance analysis of MIMO-MRC in double-correlated Rayleigh environments[J]. IEEE Transactions on Communication, 2007, 55(5): 497 – 507.
- [16] Y C Ko, M S Alouini, M K Simon. Outage probability of diversity systems over generalized fading channels [J]. IEEE Transactions on Communication, 2000, 48(11): 1783 – 1787.

作者简介:



赵睿 男, 1980年2月出生于江苏扬州. 2003年和2006年分别在哈尔滨工业大学和东南大学获得学士和硕士学位, 现为东南大学信息科学与工程学院博士生, 主要研究方向为无线通信信号处理、多用户 MIMO 通信和基于中继的协作通信.

E-mail: rzhao.seu@gmail.com



杨绿溪 男, 1964年出生于安徽桐城. 东南大学信息科学与工程学院教授, 博士生导师. 分别于1990年和1993年获东南大学信号与信息处理专业硕士和博士学位, 主要从事通信信号处理、MIMO 通信系统设计、协作通信与分集处理、盲信号处理、阵列信号处理等方面的科研和教学工作.

E-mail: lxyang@seu.edu.cn