

文章编号:1009-3087(2014)02-0133-07

# Nakagami- $m$ 信道中基于矩生成函数的 HARQ 性能分析

陈昌川<sup>1,2</sup>, 饶 毓<sup>2</sup>, 赵超莹<sup>3</sup>

(1. 重庆邮电大学 信号与信息处理重庆市重点实验室, 重庆 400065; 2. 重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065;  
3. 重庆航天火箭电子有限公司, 重庆 400039)

**摘 要:**针对多支路两跳协作中继系统,提出了一种基于 Nakagami- $m$  衰落信道的 M-QAM 和 HARQ 联合优化方案。该方案利用矩生成函数,计算了协作与非协作下各个节点对应的 SNR 的概率密度分布函数,推导了 M-QAM 和 HARQ 联合时系统误符号率的闭合表达式,进一步通过中继的状态转移概率,分析推导出协作 HARQ 下系统吞吐量的闭合表达式。理论分析和仿真验证得出:随着调制阶数  $M$  的减小,系统误符号率减小;协作 HARQ 比非协作明显降低了系统误符号率,提高了系统吞吐量;随着参与协作的中继个数的增加,系统吞吐量增大,系统误符号率减小。

**关键词:** Nakagami- $m$  衰落信道;矩生成函数;混合自动重传请求;多进制正交幅度调制  
**中图分类号:** TN929.5 **文献标志码:** A

## Performance Analysis of HARQ for Moment Generating Function in Nakagami- $m$ Fading Channels

CHEN Changchuan<sup>1,2</sup>, RAO Yu<sup>2</sup>, ZHAO chaoying<sup>3</sup>

(1. Chongqing Key Lab. of Signal and Info. Processing (CQKLS&IP), Chongqing Univ. of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;  
2. School of Communication and Info. Eng., Chongqing Univ. of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;  
3. Chongqing Aerospace Launch Vehicle Electronic Technol. Co., Ltd, Chongqing 400039, China)

**Abstract:** A joint optimization algorithm which combines M-QAM with HARQ protocol is proposed for the multi-branch two-top cooperation diversity system to minimize the symbol error rate (SER) and maximize the throughput. Using moment generating function (MGF), the probability density function of SNR among relay nodes and the destination node were calculated, and the formulas of the SER for M-QAM were derived in non-cooperative and cooperative HARQ protocols over Nakagami- $m$  fading channels. Then, by utilizing the state transition probability of relay, the throughput in closed-form in cooperative HARQ protocols was derived. The simulation results showed that the decrease of modulation order  $M$  could lead to the decrease of the SER, and cooperative HARQ protocols by MGF could obtain lower SER and better throughput compared with non-cooperative HARQ protocols. In view of M-QAM with HARQ protocol, the increment of relay could lead to the increment of system throughput and the decrement of the SER, and then the performance of System is improved.

**Key words:** Nakagami- $m$  fading channel; moment generating function; hybrid automatic repeat request; multiple quadrature amplitude modulation

实际的无线链路受到多径衰落、阴影效应、多普

勒频移等因素影响,导致信号传输出现差错,系统可靠性得不到保证。为了提高衰落时变信道中数据的传输可靠性,降低系统误包率,包括 IEEE802.11n/IEEE802.16e, 3GPP 和 3GPP2 在内的组织都建议采用增量冗余混合自动重传请求 (hybrid automatic repeat request, HARQ)<sup>[1-2]</sup>。HARQ 技术能有效控制由于干扰、多径效应、多普勒效应等造成的数据传输错误,保证数据正确无误的传送到目的端用户,大大提高了无线通信系统中数据传输的效率和通信的可靠性。在协作中继系统中研究 HARQ 技术,更好地提高系统数据信息的传输速率,以及高可靠性传输,当前已经成为一个热点研究问题。

收稿日期:2013-06-18

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (61371164; 61071196; 61102131; 61275099); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-10-0927); 信号与信息处理重庆市市级重点实验室建设项目 (CSTC2009CA2003); 重庆市杰出青年基金资助项目 (CSTC2011jjq40002); 重庆市自然科学基金资助项目 (CSTC2010BB2398; CSTC2010BB2409; CSTC2010BB2411; CSTC2012JJA40008); 重庆市教育委员会科研项目 (KJ120525); 重庆邮电大学研究生教育创新计划重点项目 (Y201001; Y201104)

**作者简介:** 陈昌川 (1978—), 男, 讲师, 硕士。研究方向: 移动通信; 智能信息处理。E-mail: creditdegree@gmail.com

文献[3]考虑到放大转发(amplify and forward, AF)方式和解码转发(decode and forward, DF)方式,并将它们与协作 I 型 HARQ 相结合,推导了误比特率和吞吐量的闭合表达式,通过仿真表明协作的性能明显优于非协作。文献[4]分析了基于中继译码状态,以及中继自适应在 DF 和编码协作分集(code cooperation, CC)模式之间相互转换的混合中继策略,讨论了不同策略下系统的吞吐量,仿真结果表明混合中继策略性能优于直传和 DF 策略。文献[5]设定没有直传的多中继场景,分别分析了多中继下 HARQ 和单中继下 HARQ 的吞吐量和误包率的闭合表达式,并通过仿真证明了多中继下 HARQ 的性能优于单中继下 HARQ。文献[6]在机会中继的大前提下基于 Nakagami- $m$  衰落信道,分析了采用 AF、DF 模式的协作截断 ARQ、截断 I 型 HARQ、截断 II 型 HARQ 的系统时延,并通过仿真验证了在相同的重传机制下,DF 模式的系统时延优于 AF 模式的系统时延;在相同模式下,截断 HARQ 的系统时延优于截断 ARQ。文献[7]提出了结合中继选择的 ARQ 策略,考虑最优中继选择策略:通过最大最小原则和调和平均值原则选择最优中继和次优中继,从而协作源端到目的端信号的传输。文献[8]在中继系统中将 ARQ 和自适应调制(BPSK、QPSK)结合,源端节点和中继节点通过分析传输链路的信道状况,调整 BPSK、QPSK 方式,提高系统吞吐量。但是该文献并未对最大重传次数作限定,这样会造成系统时延的增大。中继协作中,采用链路自适应技术能有效提高数据的传输速率,现有文献大多都是针对 BPSK、BFSK 或 QPSK 调制来分析,大多是针对 Rayleigh 衰落信道进行的分析研究,实际的信道都是衰落、时变的,采用具有代表性的 Nakagami- $m$  衰落信道,更具研究意义。

作者在 Nakagami- $m$  衰落信道下,将 HARQ 与多进制正交幅度调制(multiple quadrature amplitude modulation, M-QAM)进行结合,对多支路两跳协作中继系统的性能进行了比较和优化,通过对矩生成函数(MGF)的分析,计算出各个节点对应的信噪比(SNR)的概率密度分布函数,推导了非协作与协作 HARQ 和 M-QAM 联合下系统误符号率表达式,以及协作 HARQ 下系统的吞吐量表达式。最后通过仿真比较了不同调制阶数对于系统误符号率的影响;同时对协作和非协作 HARQ 的性能进行了分析;并针对 16QAM 和 HARQ 的联合优化,分析了中继数目对系统性能的影响。

## 1 系统模型

### 1.1 协作中继模型

如图 1 所示,考虑的是一个  $N$  支路两跳协作中继系统模型。其中,源端节点用  $S$  表示,目的端节点用  $D$  表示,中继节点用  $R_i (i = 1, 2, \dots, M)$  表示。 $S$  可以直接传输数据信息到  $D$ ,称之为  $S$ - $D$  直连链路, $S$  也可以根据接收端数据信息的译码情况,选择通过  $N$  个中继  $R_i$  转发数据,称之为  $S$ - $R$ - $D$  中继链路。

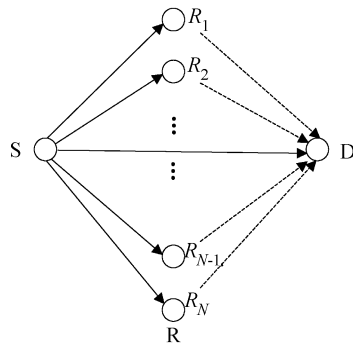


图 1  $N$  支路两跳协作中继系统模型

Fig. 1 Multi-branch two-hop cooperation diversity system model

为了方便进行下一步描述,作如下假设:

- 1) 假设  $S$ - $D$ 、 $S$ - $R$ - $D$  信道为相互独立的 Nakagami- $m$  衰落信道;
- 2) 由于系统允许时延有限,设定最大重传次数设定为  $N_{\max}$ ;
- 3) 中继节点和目的节点的反馈 ACK/NACK 无差错的到达源端节点。

### 1.2 中继系统下的 HARQ 流程

$N$  支路两跳协作中继系统下 HARQ 的工作步骤如下:

- 1) 第 1 次传输时,第 1 时隙源端节点向  $N$  个中继节点和目的节点发送数据信息,当接收到这些数据信息后,目的节点进行纠错译码,发送反馈信息 ACK/NACK 到源端节点和中继节点。如果反馈 ACK,则表示目的节点接收数据信息成功,系统可以进入下一个阶段;如果反馈 NACK 到中继和源端节点,则表示目的节点译码失败,系统将自动进行重传状态,同时第 2 时隙由中继节点协作源端节点进行数据的重传。HARQ 的工作过程见图 2。

- 2) 进行第 1 次传输时,源端节点通过  $S$ - $D$  链路发送数据信息到达 ( $i$  表示成功译码中继个数,  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $j$  表示重传次数,  $j = 0, 1, 2, \dots, n$ ), 此时有  $i$  个中继译码成功,成功译码的中继将正确的数据信息存储,以方便后期重传,并且它不再接收源端

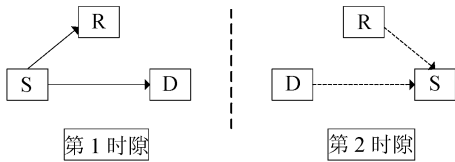


图2 协作 HARQ 的工作过程

Fig.2 Cooperation HARQ process

节点发送的重传数据信息。只有当传输次数达到系统的最大重传次数时才将存储的信息进行释放。未成功译码的  $N - i$  个中继继续接收源端节点发送的重传数据信息,如果达到最大重传次数后,依然还有中继没有正确接收的源端节点发送的数据信息,此时放弃接收并丢弃该错误信息。

3) 第2 时隙进行重传时,系统从成功译码的中继中,选择一个传输链路最佳的中继,并与源端节点的数据信息进行冗余编码,然后将编码后的数据信息发送到目的节点。如果目的节点译码成功,则反馈 ACK 信令到源端节点;如果目的节点译码失败,则系统继续进行重传。在继续重传的这一阶段,将加入之前时隙成功译码的中继  $R_{x,y}(x \geq i, i = 1, 2, \dots, N)$ 。

4) 经过  $n$  次传输( $n - 1$  次重传)后,可利用中继变为  $R_{k,n-1}$ 。当选中的最优中继和源端节点协作编码后仍旧传输失败,前一阶段译码失败的  $N - k$  个中继在通过源端节点重传后,又增加了  $L(0 \leq L \leq N - k)$  个成功译码的中继,此时将新增的  $L$  个中继加入到成功译码的中继集合中,准备下一次的传输,其他  $N - k - L$  个中继继续接收源端节点发送的重传的数据信息或者新的数据信息。

5) 重复上述步骤,直到目的节点成功接收到数据信息,或者达到最大重传次数时,系统开始进行新的数据信息的传输。

给出协作场景下 HARQ 的流程图,如图3 所示。

非协作场景下 HARQ 的传输,可以看作是直传链路 HARQ 传输。源端节点将数据信息直接传输给目的端节点,目的端节点译码后,反馈 ACK 或 NACK 到源端节点。如果源端节点接收到反馈 ACK,则系统将进行下一数据的传输;如果源端节点接收到反馈 NACK,则系统进入重传状态,源端节点继续传输原数据包到目的节点,如果数据信息重传次数超过最大传输次数  $N_{max}$ ,目的节点仍旧反馈 NACK,则丢弃该数据信息,并记录其误包率。

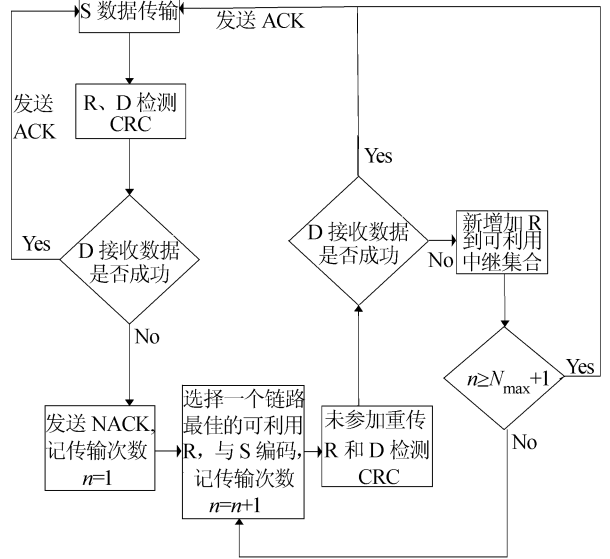


图3 协作场景下 HARQ 的流程图

Fig.3 Flowchart of HARQ in cooperative scenario

## 2 基于矩生成函数的 HARQ 性能分析

在 Nakagami- $m$  衰落信道中,瞬时信噪比  $\gamma$  的概率密度函数表达式为:

$$f(\gamma) = \frac{m^m \bar{\gamma}^{m-1} \exp(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}})}{\Gamma(m) \bar{\gamma}^m} \quad (1)$$

式中:  $\bar{\gamma}$  为平均 SNR, 即  $\bar{\gamma} = E(\gamma)$ ;  $m(m \geq 1/2)$  为 Nakagami- $m$  信道的衰落因子, 当  $m = 1$  时, 式(1)服从 Rayleigh 分布, 当  $m = \infty$  时, 式(1)服从 Gaussian 分布;  $\Gamma(m) := \int_0^\infty t^{m-1} e^{-t} dt$  为 gamma 函数,  $\Gamma(m, z) := \int_z^\infty t^{m-1} e^{-t} dt$  为不完全 gamma 函数。通过调整衰落因子  $m$  的值可以模拟不同的时变信道状态。

### 2.1 非协作 HARQ 系统性能

首先分析非协作场景下的 HARQ。在直传链路 S-D 中采用 M-QAM 与 HARQ 联合调制, 此时误符号率和接收端信噪比的矩生成函数(MGF)关系<sup>[9]</sup> 可以表示为:

$$p = \frac{4}{\pi} \left(1 - \frac{1}{M}\right) \int_0^{\pi/2} M\left(\frac{\varphi}{\sin^2 \theta}\right) d\theta - \frac{4}{\pi} \left(1 - \frac{1}{M}\right)^2 \int_0^{\pi/4} M\left(\frac{\varphi}{\sin^2 \theta}\right) d\theta \quad (2)$$

式中,  $M$  表示调制阶数,  $\varphi = 1.5/(M - 1)$ 。

当直传链路 S-D 信道服 Nakagami- $m$  衰落时, 此时系统误符号率(symbol error rate, SER)表达式<sup>[10]</sup> 可以表示为:

$$p = \frac{4}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) I_S(0, \pi/2, \varphi \bar{\gamma}/m, m) - \frac{4}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right)^2 I_S(0, \pi/4, \varphi \bar{\gamma}/m, m) \quad (3)$$

其中,

$$I_S(\theta_L, \theta_U, a, b) = (\theta_U - \theta_L) + \sum_{n=1}^b (-1)^n \sum_{r=0}^{n-1} \frac{a^{n-r-1/2}}{(1+a)^{n-1/2}} \binom{b}{n} \binom{n-1}{r} \times \phi\left(\sqrt{\frac{1+a}{a}} \tan \theta_L, \sqrt{\frac{1+a}{a}} \tan \theta_U, 1+r\right) \quad (4)$$

$$\phi(c, g, n) = \int_c^g \frac{dx}{(1+x^2)^n} = \frac{(2n-3)!!}{2^{n-1}(n-1)!} (\arctan g - \arctan c) + \frac{(2n-3)!!}{(n-1)!} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{(n-k-1)!}{2^k(2n-2k-1)!!} \quad (5)$$

此时,求源端节点到目的节点传输的误符号率、源端节点到中继节点传输的误符号率,可以转化求误符号率和接收端信噪比的矩生成函数。于是,源端节点到目的节点传输的误符号率可以表示为:

$$P_{SD} = \frac{4}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) I_S(0, \pi/2, \varphi \overline{\gamma_{SD}}/m, m) - \frac{4}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right)^2 I_S(0, \pi/4, \varphi \overline{\gamma_{SD}}/m, m) \quad (6)$$

源端节点到第  $n$  条支路的中继节点的误符号率为:

$$P_{SR(n)} = \frac{4}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) I_S(0, \pi/2, \varphi \overline{\gamma_{SR(n)}}/m, m) - \frac{4}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right)^2 I_S(0, \pi/4, \varphi \overline{\gamma_{SR(n)}}/m, m) \quad (7)$$

式中,  $\overline{\gamma_{SR(n)}}$  表示第  $n$  条中继支路上的平均信噪比。

误符号率(SER)与误码率(PER)之间的转换关系为:

$$P_{PER} = 1 - (1 - p_{SER})^{L_p \text{lb} M} \quad (8)$$

式中,  $L_p$  表示数据信息的比特数,  $M$  表示调制阶数。将式(6)、(7)分别代入式(8),即可以得到各自的误码率  $P_{SD}$ 、 $P_{SR}$ 。

## 2.2 协作 HARQ 系统性能

针对  $N$  支路两跳协作中继系统进行研究分析。当信道服 Nakagami- $m$  衰落时,采用 M-QAM 与 HARQ 进行联合优化。

当成功译码中继数  $i = 0$  时,即中继不参与协作,直接由源端节点重传数据信息给目的节点,此时系统平均误码率的表达式为:

$$P_1 = P_{SD}^{N_{\max}} (1 - P_{SD}) + P_{SD}^{N_{\max}+1} \quad (9)$$

当成功译码中继数  $i > 0$  时,  $P_{k+1,SD,RD}$  表示源端节点与  $k$  个成功译码中继参与重传后的误符号率,此时参与数据信息传输的支路有  $k+1$  个。

选取  $k$  个成功译码中继的最优中继与源端节点进行协作编码,然后重传数据信息传输。假设  $k$  个成功译码中继的信噪比分别为  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_k$ , 且信噪比都相互独立,令  $\gamma_B = \max\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_k\}$ , 此时  $\gamma_B$  的累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)为:

$$F(\gamma_B) = 1 - \exp\left(-\frac{m\gamma_B}{\bar{\gamma}}\right) \sum_{p=0}^{m-1} \frac{1}{p!} \left(\frac{m\gamma_B}{\bar{\gamma}}\right)^p \quad (10)$$

通过式(10),可以得到  $\gamma_B$  的概率密度分布函数(PDF)的表达式如下:

$$f_B(\gamma) = kF(\gamma)^{k-1}f(\gamma) = kf(\gamma) \left[1 - \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}\right) \sum_{p=0}^{m-1} \frac{1}{p!} \left(\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}\right)^p\right]^{k-1} = kf(\gamma) \sum_{q=0}^{k-1} (-1)^q \binom{k}{q} \exp\left(-\frac{qm\gamma}{\bar{\gamma}}\right) \cdot \left(\sum_{p=0}^{m-1} \left(\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}\right)^p \frac{1}{p!}\right)^q \quad (11)$$

$\gamma_B$  的矩生成函数的表达式为:

$$M(s) = \int_0^{\infty} f_B(\gamma) \exp(-s\gamma) d\gamma \quad (12)$$

将式(11)代入式(3),可以推导得到 S-R-D 链路中的误符号率  $p_{k+1,SD,RD}$  表达式如下:

$$P_{k+1,SD,RD} = \frac{k}{\Gamma(m)} \frac{4}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \sum_{q=0}^{k-1} (-1)^q \binom{k}{q} \cdot \sum_{n=0}^{q(m-1)} \frac{c_n(q)}{n!} \frac{(m+n-1)!}{(q+1)^{m+n}} \cdot I_S(0, \pi/2, \varphi \bar{\gamma}/m(q+1), m+n) - \frac{k}{\Gamma(m)} \frac{4}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right)^2 \sum_{q=0}^{k-1} (-1)^q \binom{k}{q} \cdot \sum_{n=0}^{q(m-1)} \frac{c_n(q)}{n!} \frac{(m+n-1)!}{(q+1)^{m+n}} \cdot I_S(0, 4, \varphi \bar{\gamma}/m(q+1), m+n) \quad (13)$$

其中,

$$c_n(q) = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \binom{n}{i} [(q+1)i - n] c_{n-i}(q), n \leq m-1; \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{m-1} \binom{n}{i} [(q+1)i - n] c_{n-i}(q), n \geq m-1 \end{cases} \quad (14)$$

将式(13)代入式(8),即可以得到误码率  $P_{k+1,SD,RD}$ 。

源端节点和最优中继进行编码后,对目的节点进行第  $n-1$  次重传到  $n$  次重传的过程中,中继的状态转移概率  $h(R_{k+L,n}/R_{k,n-1})$  可以表示为:

$$h(R_{k+L,n}/R_{k,n-1}) = \binom{k}{L} [1 - P_{SR}]^L [P_{SR}]^k \quad (15)$$

式(14)表示为第  $n$  次重传中,有  $L$  个非可用中继转化可用中继,参与到重传中,即在  $n-1$  次重传中有  $R_{k,n-1}$  个中继参与,在  $n$  次重传中有  $R_{k+L,n}$  个中继参与。

成功传输一个数据包所需平均时隙  $S$  为:

$$S = A + B \quad (16)$$

其中,

$$A = \sum_{n=1}^{N_{\max}} \sum_{k_1=0}^{R_N} \sum_{k_2=k_1}^{R_N} \cdots \sum_{k_{n-1}=k_{n-2}}^{R_N} \left\{ \left[ \prod_{j=1}^{n-1} h(R_j/R_{j-1}) \right] \times n \left[ 1 - P_{k_{n-1}+1,SD,RD} \right] \left[ \prod_{j=1}^{n-1} P_{k_{j-1}+1,SD,RD} \right] \right\} \quad (17)$$

$$B = \sum_{n=1}^{R_N} \sum_{k_1=0}^{R_N} \sum_{k_2=k_1}^{R_N} \cdots \sum_{k_{n-1}=k_{n-2}}^{R_N} \left\{ \left[ \prod_{j=1}^{N_{\max}} h(R_j/R_{j-1}) \right] \times (1 + N_{\max}) \left[ \prod_{j=1}^{N_{\max}} P_{k_{j-1}+1,SD,RD} \right] \right\} \quad (18)$$

式(17)<sup>[11]</sup>表示在最大重传次数  $N_{\max}$  以内,目的节点成功接收到的数据信息所需要的时间;式(18)表示达到限定的最大重传次数  $N_{\max}$  后,目的节点依然译码失败后所需时间,不论  $N_{\max} + 1$  次传输是否成功。

此时系统吞吐量表达式为:

$$T = \frac{\text{lb } M}{S} \prod_{i=1}^N (1 - P_{SR(n)}) = \frac{\text{lb } M}{S} \cdot \sum_{n=1}^{N_{\max}+1} \sum_{k_1=0}^{R_N} \sum_{k_2=k_1}^{R_N} \cdots \sum_{k_{n-1}=k_{n-2}}^{R_N} \left\{ \left[ \prod_{j=1}^{n-1} h(R_j/R_{j-1}) \right] \cdot \left[ 1 - P_{k_{n-1}+1,SD,RD} \right] \left[ \prod_{j=1}^{n-1} P_{k_{j-1}+1,SD,RD} \right] \right\} \quad (19)$$

### 3 数值与仿真结果分析

采用 Matlab 仿真平台对  $N$  支路两跳协作中继系统的相关性能进行了数值仿真。该系统利用矩生成函数,对 M-QAM 与 HARQ 进行联合优化,分析了协作和非协作情况下系统的性能。无线信道采用 Nakagami- $m$  衰落信道。假设源端节点的发射功率和  $N$  个中继转发的功率一样,忽略路径损耗,假定  $\gamma_{SD} = \gamma_{SR} = \gamma_{SR(n)} = \gamma$ 。每个数据包的信息比特数设定为  $L_p = 120$ 。

图4为直传链路 S-D 采用 M-QAM 调制和 HARQ 联合优化时系统误符号率的仿真曲线。其中,调制阶数  $M$  取 4、8、16、32、64,信道衰落因子  $m = 1$ ,最大重传次数  $N_{\max} = 2$ 。在信噪比相同的情况下,从纵向看,64QAM、32QAM、16QAM、8QAM、4QAM 误符号率依次降低。出现这种情况的原因是:星座图中随着  $M$  的增加,信号空间的各个信号间的最小距离减小,相应的对信号噪声容限就越小,则抗噪声能力逐渐减小,接收信号的错误概率将随之增大。所以随着调制阶数  $M$  的逐渐减小,系统的误符号率逐渐减小。

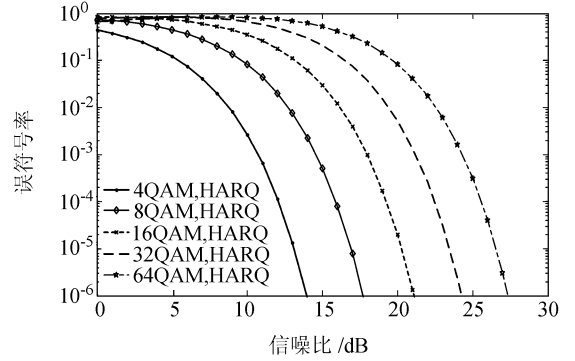


图4 直传链路采用 M-QAM 调制方式和 HARQ 联合优化的误符号率

Fig. 4 Symbol error rate when M-QAM modulation scheme and combining HARQ optimization are adopted in direct link

图5为  $N$  支路两跳中继协作下,针对 16QAM 调制和 HARQ 联合优化时协作与非协作的系统误符号率仿真曲线。其中,信道衰落因子  $m = 1$ ,支路  $N$  取值为 2,成功译码中继个数为 1,最大重传次数  $N_{\max} = 2$ 。

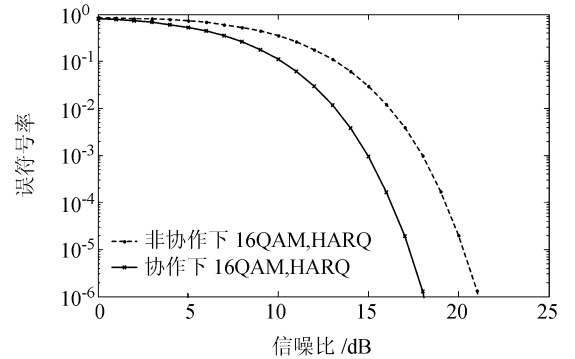


图5  $N$  支路两跳中继协作下不同传输方式的误符号率

从图5中的仿真曲线可以很明显地看出,采用协作分集时,系统的误符号率明显降低,远远低于非协作时系统的误符号率。造成这种现象的原因是,

源端节点和选出的最优中继节点进行合并编码,使得误符号率逐步降低。

图 6 为  $N$  支路两跳中继协作下采用 16QAM 调制和 HARQ 联合优化时系统误符号率的仿真曲线。其中,支路  $N$  取值分别为 2、3、4,信道衰落因子  $m = 1$ ,最大重传次数  $N_{\max} = 2$ 。

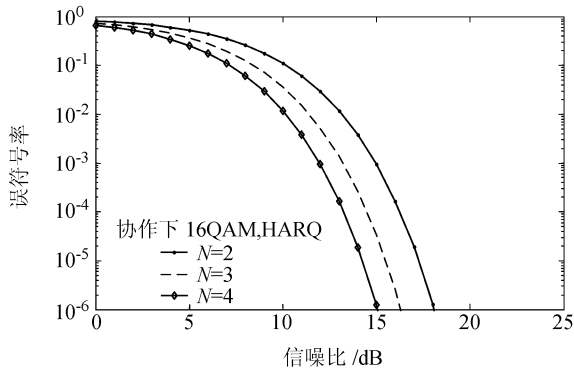


图 6 两跳中继协作下不同支路的误符号率

Fig. 6 Symbol error rate of different branches in two-top cooperation diversity system

从图 6 中的仿真曲线可以看出,在传输中支路越多,即参与中继数目越多,系统的误符号率降低明显。也就是说,中继支路中正确译码的中继数目的增加,协作分集合并的阶数也随之增加,选出的最优中继的性能更好;随着信噪比的增加,这些性能所呈现出来的优势会更加明显。

图 7 描述了当最大重传次数  $N_{\max} = 2$  时, $N$  支路两跳中继协作下采用 16QAM 调制和 HARQ 联合优化时,协作与非协作的系统吞吐量仿真曲线。其中,信道衰落因子  $m = 1$ 。

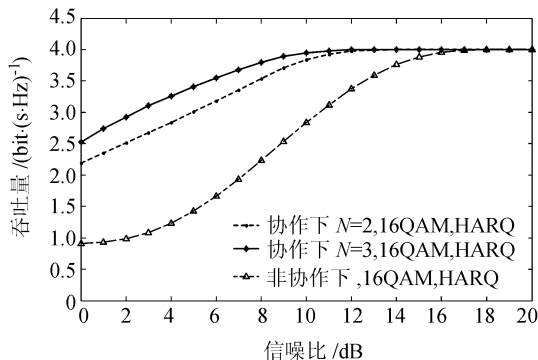


图 7  $N$  支路两跳中继协作下不同传输方式的系统的吞吐量

Fig. 7 System throughput with different transmission modes in multi-branch two-top cooperation diversity system

从图 7 可以看出,当信道条件恶劣,即信噪比较低时,采用中继协作方式的系统吞吐量远远大于非协作情况下的系统吞吐量;当信道条件较好,即信噪比较高时,中继协作与非协作的系统吞吐量相差

并不明显。造成这种情况的原因是,好的信道条件使得系统误包率极低,传输的数据信息均能被正确接收,这是一种极理想的信道状况。同时,通过对仿真曲线分析可知,协作通信中参与的中继个数越多,系统的吞吐量将进一步得到改善。

## 4 结 论

研究了多支路两跳协作中继系统 M-QAM 调制与 HARQ 的联合设计问题。在 Nakagami- $m$  衰落信道下,将 M-QAM 调制与 HARQ 进行联合优化,利用矩生成函数分析研究了协议和非协作场景下 HARQ 的传输流程,计算出各个节点对应的信噪比的概率密度分布函数,推导出采用 M-QAM 调制时协作与非协作 HARQ 的系统误符号率表达式,进一步通过中继的状态转移概率,推导出了协作 HARQ 下系统的吞吐量表达式。通过理论分析与仿真结果表明,改进方案优于传统方案:

1) 利用矩生成函数的直传 HARQ 系统中,随着调制阶数  $M$  的减小,系统的误符号率逐渐减小。

2) 针对 16QAM 调制和 HARQ 联合,采用协作分集时,系统的误符号率明显小于非协作时系统的误符号率,同时协作时系统的吞吐量远远高于非协作时的吞吐量。

3) 协作分集时,参与的中继个数越多,系统的误符号率会进一步降低,吞吐量也会有一定程度的提高。

### 参考文献:

- [1] Lin Shu, Costello D, Miller M. Automatic repeat request error control schemes[J]. IEEE Communications Magazine, 1984, 22(12): 5-17.
- [2] IEEE P802.16-2004 Unapproved Draft IEEE standard for local and metropolitan area networks part 16: Air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems, amendment for physical and medium access control layers for combined fixed and mobile operation in licensed bands[S]. NY: IEEE, 2005.
- [3] Cerutti I, Fumagalli A, Gupta P. Delay models of single-source single-relay cooperative ARQ protocols in slotted radio networks with poisson frame arrivals[J]. IEEE/ACM

- Transactions on Networking,2008,16(2):371 – 382.
- [4] Qi Yinan, Hoshyar R, Tafazolli R. On the performance of HARQ with hybrid relaying schemes[C]. IEEE International Conference on Communication, Dresden, Germany,2009:1 – 6.
- [5] Bhambri A, Kaltenberger F, Knopp R. et al. Smart hybrid-ARQ (SHARQ) for cooperative communication via distributed relays in LTE-advanced[C]. 2011 IEEE 12th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, San Francisco, USA,2011:41 – 45.
- [6] Boujemaa H. Delay analysis of cooperative truncated HARQ with opportunistic relaying[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2009,58(9):4795 – 4804.
- [7] Yu Guanding, Zhang Zhaoyang, Qiu Peiliang. Cooperative ARQ in wireless networks: Protocols description and performance analysis [C]. IEEE International Conference on Communication, Istanbul, Turkey,2006:3608 – 3614.
- [8] Lin Zinan, Erkip E. Ghosh M. Adaptive modulation for coded cooperative systems[C]. 2005 IEEE 6th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, New York, USA,2005:615 – 619.
- [9] Marvin K S, Mohamed-Slim A. Digital communication over fading channels[M]. New York:Wiley,2000:320 – 326.
- [10] Annamalai A, Tellambura C. Error rates for Nakagami- $m$  fading multichannel reception of binary and M-ary signals[J]. IEEE Transactions on Communications,2001,49(1):58 – 68.
- [11] Xu F, Lau F C M, Yue D W. Cross-layer design scheme for multihop communications[J]. Electronics Letters,2007,43(14):762 – 763.

(编辑 赵 婧)