

DOI: 10.3979/j.issn.1673-825X.2012.02.014

基于链路自适应的协作编码部分重传机制研究

吴施民¹ 徐位凯²

(1. 重庆邮电大学 移动通信重点实验室 重庆 400065; 2. 厦门大学 通信工程系 福建 厦门 361005)

摘要:在协作编码部分重传(coded partial retransmission, CPR)机制的基础上,引入链路自适应技术,通过在中继节点获取链路状态信息后,选择调制编码模式,实现自适应协作传输。仿真结果表明,在不降低系统吞吐量的情况下,改善了 BER 性能,在吞吐量为 0.19 时,自适应调制的 CPR 机制相对于直接传输的 CPR 增益约为 4.5 dB。在 BER 为 10^{-3} 时,自适应调制的 CPR 协议相对于非自适应 CPR 协议增益约为 2 dB。

关键词:CPR 机制; 自适应调制; 译码转发; 吞吐量

中图分类号: TN929

文献标识码: A

文章编号: 1673-825X(2012)02-0196-05

Cooperative coded partial retransmission scheme based on link adaptive technology

WU Shi-min¹, XU Wei-kai²

(1. Key Lab of Mobile Communication in Chongqing, CQUPT, Chongqing 400065, P. R. China;

2. Dept. of Communication Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, P. R. China)

Abstract: In this paper, the cooperative Coded Partial(CPR) Retransmission scheme based on link adaptive technique is proposed. Utilizing the link state information at the relay node, the optimized-modulation and code mode of relay node is chosen. The simulated results show that Bit Error Rate(BER) performance of the proposed system is improved without sacrificing the system throughput. The BER of the proposed scheme has about 4.5 dB gains compared with that of the direct transmission at throughput of 0.19, Moreover, the proposed scheme obtains about 2 dB compared with the non-adaptive scheme at BER of 10^{-3} .

Key words: CPR scheme; adaptive modulation; decode and forward; throughput

0 引言

在无线信道下,通信系统的整体性能由于多径衰落,多普勒效应和时间弥散效应而显著恶化。协作通信系统中,用户之间协作产生的分布式空间分集增益可减轻信道衰落等影响,提高通信质量。放大转发(amplify and forward, AAF)和选择译码转发(selective decode and forward, SDF)是 2 种常见的协作协议^[1]。

纠错编码常与 AAF 和 SDF 协议相结合来保证传输的可靠性。文献[2]提出了一种采用 LDPC

(low density parity check) 码的编码协作方案。有效地增加了空间分集增益,提高了系统性能。但在信道状态变化频繁的无线信道下,仅采用纠错编码方案的前向纠错很难保证传输的可靠性。因此,重传机制被引入协作通信系统中来降低系统的误码率以确保服务质量。文献[3]将自动请求重传技术(automatic repeat request, ARQ)应用于协作系统中,发现协作 ARQ 总是比非协作 ARQ 协议具有更好的性能。文献[4]则提出了一种新的混合自动请求重传协议(coded partial retransmission, CPR)。在 CPR 协议中信道条件最好的中继节点只重传一部分发送到

收稿日期:2011-09-28 修订日期:2011-12-02

基金项目:重庆市科委攻关项目(CSTC 2009AA2037)

Foundation Item: The Project for Science and Technology Development of Chongqing Committee of Science and Technology(CSTC, 2009AA2037)

中继的信息,重传和接收过程中使用了 Type-I 型 HARQ(hybrid automatic repeat request)及最大比合并方法。结果表明,基于单中继的 CPR 协议的系统吞吐量性能要优于基于单中继或多中继的常规协作 HARQ 系统。

正交的协作通信系统在获得分集增益的同时占用了更多的频率资源,导致了频谱效率的降低。为了在一定的错误性能指标下提高系统的频谱利用率,链路自适应技术被应用到协作通信系统中^[5-7],通过利用信道状态信息来灵活地调整传输功率、符号速率、星座映射的尺寸等参数,可以有效地提高系统的频谱效率。这些链路自适应技术在改变传输速率时大多采用了 TYPE-I 型 HARQ 进行简单的重传。ARQ 在误码率不大时可以得到理想的吞吐量,但产生的时延较大,不宜于提供实时服务。综合以上问题,本文将 CPR 协议与基于 PA-I 码的自适应调制相结合,不仅提供了比单独的 CPR 协作系统更好的 BER(bit error ratio)性能,而且提供了比采用简单重传的自适应调制协作系统更高的系统吞吐量。

1 协作模型

考虑一个单中继系统,有 3 个协作终端分别为源节点 S、中继节点 R、目标节点 D,如图 1 所示。

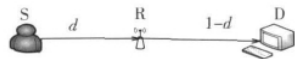


图 1 协作模型

Fig. 1 Cooperative model

假设源节点 S 与目的节点 D 之间为标准化的单位距离,源节点 S 与中继节点 R 间距离为 d 。信道为准静态瑞利衰落信道,信道系数在第一次数据传输及重传时不变,只在传送新的数据时改变且相互独立。SD,SR,RD 链路的信道系数分别记为 h_{sd}, h_{sr}, h_{rd} ,考虑到路径损耗指数 α ,SR 链路的信道可表示为

$$g_{sr} = h_{sr} \times \left(\sqrt{\frac{1}{d}} \right)^\alpha \quad (1)$$

RD 链路的信道可表示为

$$g_{rd} = h_{rd} \times \left(\sqrt{\frac{1}{1-d}} \right)^\alpha \quad (2)$$

信道噪声为零均值加性高斯白噪声,方差为 N_0 。SD,SR,RD 链路的信道噪声分别记为 n_{sd}, n_{sr}, n_{rd} 。

在 SDF 协议中,循环冗余校验码(cyclic redundancy check,CRC)被用来检验目的节点是否正确译

出接收到的码字。源、中继及目的节点采用时分协作方案,在第 1 时隙,源节点 S 发送信息,中继节点 R 与目的节点 D 接收的信息分别记为 y_{sr}, y_{sd} 。第 2 时隙,中继节点 R 转发、目的节点 D 接收的信息记为 y_{rd} 。

$$y_{sr} = \sqrt{P}g_{sr}x_s + n_{sr} \quad (3)$$

$$y_{sd} = \sqrt{P}g_{sd}x_s + n_{sd} \quad (4)$$

(3)-(4)式中: \sqrt{P} 为传输的平均符号能量; x_s 为源节点 S 发送的信息。假设中继译码正确,如果 CRC 检验出目的节点译码错误,中继将重传信息至目的节点。

$$y_{rd} = \sqrt{P}g_{rd}x_r + n_{rd} \quad (5)$$

(5)式中, x_r 为中继节点重传的信息。

如果源和中继的调制与编码模式相同,则 x_s 与 x_r 相同,在实际的通信系统中,信道状态信息在接收端被估计,再反馈至发送端。这里假设中继节点接收到信道状态信息且源与中继及目的节点间的反馈信道无差错。

2 解调及 PA 码译码

乘积累积码(product accumulate code,PA)具有低编码复杂度、规则的结构、1/2 码率以上灵活的速率等优点^[8]。本文采用 PA 码作为前向纠错中的编码方式,PA 码中码元符号间的关系有助于对接收到的部分长度码字正确地译出。

图 2 为 PA 码的编码及调制流程。主要由内码、外码编码器及交织器 π_2 组成,其中,内码编码器为递归的累加器,外码编码器由通过交织器 π_1 连接的 2 个平行的单校验乘积编码器组成。

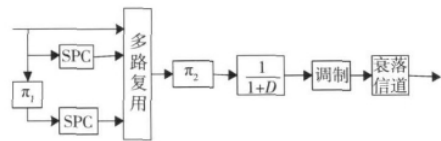


图 2 编码及调制

Fig. 2 Encode and modulation

图 3 给出了解调及 PA 码译码流程。根据信道输出,解调器通过对数似然比(log-likelihood ratio,LLR)估计出软信息再进行软判决译码。例如对于信息比特 c_j ,对数似然值为

$$LLR(c_j) = \ln \frac{P(c_j = 0)}{P(c_j = 1)} \quad (6)$$

当源或中继节点的信息比特采用 BPSK 调制时,已知信道衰落系数 h 及噪声功率,可得信道输出

的条件概率密度函数 $f_{Y|X,H}(y|x,h)$ 服从高斯分布:

$$f_{Y|X,H}(y|x,h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_X} \exp\left(-\frac{(y-xh)^2}{2\sigma_X^2}\right) \quad (7)$$

(7) 式中: X 为二进制信道输入比特; Y 为信道输出比特, 其均值为 xh , 噪声方差为 σ_X^2 ; y 为经过信道后在目的节点合并后的信息符号。

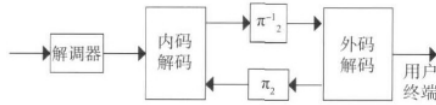


图 3 解调及译码

Fig. 3 Demodulation and decode

由 (6) 式可得信道输出的 LLR 为^[10]

$$LLR(r_i) = \ln \frac{f_{Y|X,H}(y|x=1,h)}{f_{Y|X,H}(y|x=-1,h)} = \frac{2yh}{\sigma_X^2} \quad (8)$$

若采用 M-QAM ($M=2^m$) 调制时, 信息比特 r_i 被映射到一个 QAM 复调制符号 $a(i) = a_1(i) + ja_Q(i)$,

$$f_{Y|X,H}(y|h,\mu=\alpha) = \frac{1}{\sigma_X \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{y-h\alpha^2}{\sigma_X^2}\right)$$

信道输出的 LLR 为

$$LLR(r_i) = \ln\left(\frac{\sum_{\alpha \in S_i^{(1)}} P(a=\alpha|y,h)}{\sum_{\alpha \in S_i^{(0)}} P(a=\alpha|y,h)}\right) = \ln \frac{\sum_{\alpha \in S_i^{(1)}} \exp\left(-\frac{1}{\sigma_X^2}|y-h\alpha|^2\right)}{\sum_{\alpha \in S_i^{(0)}} \exp\left(-\frac{1}{\sigma_X^2}|y-h\beta|^2\right)} \quad (9)$$

使用近似等效公式 $\ln \sum_j \exp(-x_j) \approx -\min_j(x_j)$ (9) 式可简化为^[10]

$$LLR(r_i) = \frac{1}{\sigma_X^2} \left(\min_{\beta \in S_i^{(0)}} \|y-h\beta\|^2 - \min_{\beta \in S_i^{(1)}} \|y-h\alpha\|^2 \right) \quad (10)$$

(9) - (10) 式中: $S_i^{(0)}$ 为对应的信息比特为 0 的已调制的符号集; $S_i^{(1)}$ 为对应的信息比特为 1 的已调制的符号集; σ_X^2 为噪声方差。

解调后的信道输出 LLR 被送至译码器来初始化内码译码, PA 码的译码包括内码译码及外码译码, 均为迭代译码。其译码过程和串行结构的 Turbo 码类似, 主要通过交换内码和外码之间的外信息进行迭代, 即任一个码字得到的外信息作为另一个子码的先验信息。译码算法采用文献 [8] 中的信息传递算法, 这里仅简述其译码步骤:

步骤 1 内码译码器根据信道输出的 LLR 和来

自外码译码器的软信息, 计算出外信息 $L_e(i)$;

步骤 2 把来自内码译码器的外信息 $L_e(i)$ 进行解交织, 经过多路分解后得到对应信息位比特的的外信息 $L_{ed}(i)$, 对应上支路和下支路的校验比特的的外信息 $L_{p1}(i)$ $L_{p2}(i)$;

步骤 3 外码译码器根据步骤 2 得到的外信息 $L_{ed}(i)$ $L_{p1}(i)$ $L_{p2}(i)$ 计算出上路的外信息 $L_{e1}(i)$, $L_{ep1}(i)$; 下路的外信息 $L_{e2}(i)$ $L_{ep2}(i)$;

步骤 4 局部迭代完成后, 由步骤 3 得到的来自外码译码器的外信息进行解交织和多路复用得到 $\{L_{ed}(i) + L_{e1}(i) + \pi^{-1}L_{e2}(i); L_{p1}(i) + L_{ep1}(i); L_{p2}(i) + L_{ep2}(i)\}$;

步骤 5 Turbo 迭代完成后, 根据 $L_{ed}(i) + L_{e1}(i) + \pi^{-1}L_{e2}(i)$ 的值进行判决, 译码错误时, 询问外码局部迭代是否完成, 局部迭代完成后, 送至交织器 π_2 进行交织, 再送至内码译码器作为外信息初始化内码译码。

3 基于自适应调制的 CPR 协作协议

协作通信系统在采用时分协作方案传输时, 在第 1 时隙, 信息比特以低阶的 BPSK 调制方式调制为符号 x_s 后, 以能量 P 从源节点发送 n 个已调制编码的符号。若目的节点译码正确, 则第 2 时隙的时间为 0, 中继节点不再重传信息。

假设中继节点在第 1 时隙译码正确。若目的节点译码错误, 且 RD 链路的链路状态信息在中继节点可知, 从中继发送 n/L 个重新调制的符号到目的节点 L 为初始发送信息分段为相同长度的分组数。中继节点将根据链路状态信息采用自适应调制。信息比特在采用 BPSK, QPSK 或 16QAM 等调制方式重新调制为符号 x_r 后, 重传至目的节点。目的节点合并之前所有接收到的信息及重传的部分信息。如需要进行更多次数的重传, 则下一个分组继续被发送, 最后一个分组发送完毕时, 返回至第 1 个分组。直至达到最大重传次数^[4]。

目的节点在接收到信息后采用合并算法合并信道输出信息 y_{sd} y_{rd} , 由于接收到的数据调制方式可能不同, 传统的最大比合并、选择合并等算法不再适用。文献 [7] 中提出了一种新的合并算法, 目的节点采用最大后验概率接收机进行分集合并, 以达到最大分集增益。用对数似然比来简化最大后验概率计算后可得:

$$LLR_{r_i} = LLR_{r_i}(y_{sd}) + LLR_{r_i}(y_{rd}) \quad (11)$$

由 (8) 式 (10) 式计算出 SD, RD 链路的 LLR 后, 再代入 (11) 式即可得合并后的对数似然函数值, 并用

来初始化 PA 码内码译码。设最大重传次数 $M = 4$, 表 1 给出了具体的发送及接收端合并过程。

表 1 $L = 2$ 最大重传次数 $M = 4$ CPR 传输流程
Tab. 1 Transmission flow of CPR with $L = 2$ and the max retransmission number $M = 4$

TX	每次传送的符号	MAP 接收合并
0	$X = [x_0, \dots, x_{n-1}]$	$LLR(y_{SD})$
1	$X^{r1} = [x_0^{r1}, \dots, x_{n/2-1}^{r1}]$	$LLR^0 = LLR^0(y_{SD}) + LLR^{r1}(y_{RD})$ $LLR^1 = LLR^1(y_{SD})$
2	$X^{r2} = [x_{n/2}^{r2}, \dots, x_{n-1}^{r2}]$	$LLR^0 = LLR^0(y_{SD}) + LLR^{r1}(y_{RD})$ $LLR^1 = LLR^1(y_{SD}) + LLR^{r2}(y_{RD})$
3	$X^{r3} = [x_0^{r3}, \dots, x_{n/2-1}^{r3}]$	$LLR^0 = LLR^0(y_{SD}) + LLR^{r1}(y_{RD}) + LLR^{r2}(y_{RD})$ $LLR^1 = LLR^1(y_{SD}) + LLR^{r3}(y_{RD})$
4	$X^{r4} = [x_{n/2}^{r4}, \dots, x_{n-1}^{r4}]$	$LLR^0 = LLR^0(y_{SD}) + LLR^{r1}(y_{RD}) + LLR^{r2}(y_{RD}) + LLR^{r3}(y_{RD})$ $LLR^1 = LLR^1(y_{SD}) + LLR^{r4}(y_{RD})$

在自适应调制模式选择中通常将信噪比划分为 N 个连续区间, 在给定的错误概率指标下, 计算出信噪比的区间门限值。再根据收端得到的链路状态信息, 确定链路信噪比所在区间, 选择调制模式。这里采用误比特率 (BER) 准则作为目标错误概率。目标 BER 记为 P_{target} , 满足 $P_e \leq P_{target}$ 条件的最高阶的调制模式被选择来重新调制重传的信息, P_e 为合并后的各链路总 BER。为了便于性能分析及简化自适应调制的准则, 近似的 BER 表达式被采用^[9]:

$$BER_n(\gamma) \approx a_n \exp(-b_n \gamma) \quad (12)$$

(12) 式中: 参数 a_n, b_n 与不同的调制模式有关; γ 为信噪比。表 2 为 3 种调制模式下 a_n, b_n 的取值。

表 2 不同调制模式下的 a_n, b_n

序号	调制模式	a_n	b_n
1	BPSK	0.2	1
2	QPSK	0.25	0.543 4
3	16 QAM	0.2	0.1

在 $P_e \leq P_{target}$ 条件下, 中继节点还需要获得 SD 链路的信道状态信息, 进一步简化判决条件可得, 当 RD 链路满足目标错误概率时, 合并后的 BER 也一定满足目标错误概率^[7]。由 $P_{rd} \leq P_{target}$ 可得 $\gamma_n =$

$$\frac{1}{b_n} \ln\left(\frac{a_n}{P_{target}}\right) \quad (n = 2, 3), \gamma_1 = 0, \gamma_4 = \infty$$

当 RD 链路的瞬时信噪比落入 $[\gamma_n, \gamma_{n+1}]$ 时, 第 n 个调制模式被采用。

4 仿真结果

本文的程序仿真平台为 VC6.0, 1 000 个分组的数据信息从源节点开始发送, 每个分组包含 1 200 bit 的信息, 16 bit 的 CRC 校验码。3/4 码率的 PA 码用于前向纠错, 路径损耗指数 $\alpha = 3$, 目标误比特率 $P_{target} = 10^{-3}$ 。

定义吞吐量公式为

$$T = \frac{1}{N_w} \sum_{i=1}^{N_w} \frac{R}{\frac{N_{RTX}(i)}{L} + 1} \quad (13)$$

(13) 式中: N_w 为仿真的码字分组数目; $N_{RTX}(i)$ 为正确译码所需的重传次数, 如超出最大重传次数则 $N_{RTX}(i) \rightarrow \infty$; 直接传输时 $L = 1$ 。图 4 和图 5 分别给出了自适应调制的 CPR 机制、非自适应调制协作系统及直接传输 3 种传输方式的吞吐量和 BER 性能曲线对比。

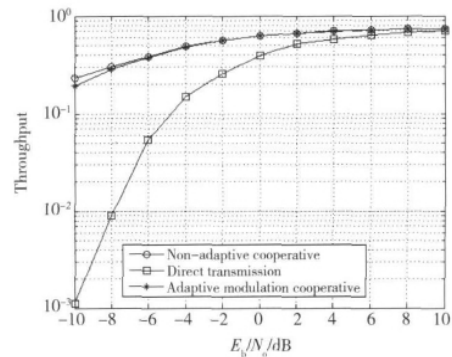


图 4 3 种传输方式的吞吐量性能曲线对比
Fig. 4 Throughput performance analysis of three transmission schemes

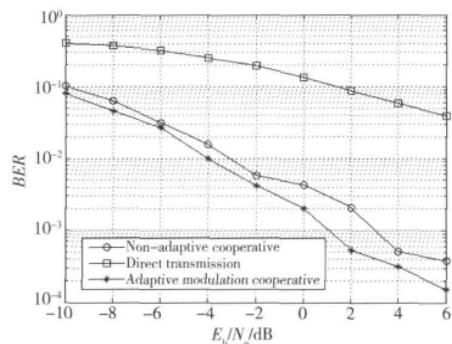


图 5 3 种传输方式的 BER 性能曲线对比
Fig. 5 BER performance analysis of three transmission schemes

由图 4 可知, 采用自适应调制的编码协作策略

和非自适应的编码部分重传机制的吞吐量性能优于直接传输。在吞吐量为 0.19 时,自适应调制的 CPR 机制相对于直接传输的增益约为 4.5 dB。吞吐量为 0.23 时,非自适应 CPR 机制相对于直接传输的增益约为 4.7 dB。在总的信噪比区间内,自适应调制的 CPR 与非自适应机制的吞吐量性能相近。

由图 5 可知,采用自适应调制的 CPR 协议提供了更好的 BER 性能,相对于非自适应调制和直接传输的协议,能有效地减轻信道衰落的影响。

5 结 论

本文采用自适应调制的 CPR 协作机制实现了在中继获取链路状态信息下,动态地采用不同的调制方式。与非自适应调制的 CPR、直接传输相比,在不降低系统吞吐量的情况下,改善了 BER 性能,一定程度上提高了频谱效率。

参考文献:

- [1] KAMMOUN I, CIPRIANO A M. Diversity Gains for Different Cooperative Schemes on Fast Fading Channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(5): 1356-1361.
- [2] ZHAO Dong-feng, LI Dao-ben. Coded Cooperation Scheme Using LDPC Codes [J]. Journal of Beijing University of Posts And Telecommunications, 2008, 31(5): 121-125.
- [3] HAGHIGHI A A, NAVAIE K. Diversity Multiplexing Trade-off in ARQ Based Cooperative and Non-Cooperative Communication over General Channel Dynamics [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(1): 303-313.
- [4] De OLIVEIRA Brante G G, UCHOA A G D, SOUZA R D. Cooperative Coded Partial Retransmission scheme using Type-I HARQ and LDPC codes [C]// Proc. of IEEE 21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Istanbul: IEEE Press, 2010: 123-128.
- [5] ALTUBAISHI E S, SHEN Xuemin. Variable-rate based relay selection scheme for decode-and-forward cooperative networks-[C]// Proc. of Wireless Communications and Networking Conference (WCNC2011). Cancun, Quintana Roo: IEEE Press, 2011: 1887-1891.
- [6] BABICH F. Cooperative Systems for the Fading Channel with Adaptive Modulation and Incremental Encoding [C]// Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference. Miami, FL: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [7] ZHANG Yuanyuan, MA Yi, TAFAZOLLI R. Modulation-Adaptive Cooperation Schemes for Wireless Networks [C]// Proc. of IEEE Conference On Vehicular Technology. [s.l.]: IEEE Press, 2008: 1320-1324.
- [8] LI Jing, NARAYANAN K R, GEORGHIADES C N. Product accumulate codes: a class of codes with near-capacity performance and low decoding complexity [J]. IEEE Transactions On Information Theory, 2004, 50(1): 31-46.
- [9] MASENG T. Digital communication over fading channels: a unified approach to performance analysis [J]. IEEE communications magazine, 2001, 39(7): 36.
- [10] ALAM M Z, ISLAM C S, ALOM M Z, et al. Using Log likelihood relation for BER analysis of QAM in space diversity [C]// Proc. of 11th International Conference On Computer and Information Technology. Khulna: IEEE Press, 2008: 646-651.
- [11] MA Yi, TAFAZOLLI R, ZHANG Yuanyuan, et al. Adaptive Modulation for Opportunistic Decode-and-Forward Relaying [J]. IEEE Transactions On Wireless Communications, 2011, 10(7): 2017-2022.
- [12] SOURYAL M R, VOJCIC B R. Cooperative turbo coding with time-varying rayleigh fading channels [C]// Proc. of IEEE International Conference on Communications. [s.l.]: IEEE Communications Society, 2004: 356-360.
- [13] SAID Ben M, BOUJEMAA H. Cooperative ARQ protocols for dual-hop systems [C]// Proc. of the second International Conference on Communications and Networking. Tozeur: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [14] SAHNOUN I, KAMMOUN I, SIALA M. Performance analysis of adaptive modulation in cooperative networks [C]// Proc. of the second International Conference on Communications and Networking. Tozeur: IEEE Press, 2010: 1-7.
- [15] 杨大成. 移动传播环境 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
YANG Da-cheng. Mobile communication environment [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2003.

作者简介:



吴施民(1986-)男,硕士研究生,主要研究方向为无线网络跨层设计,协作通信,E-mail: wsmsjlj@126.com.

(编辑:魏琴芳)