

# 一种基于 RCPT 码的混合 ARQ 方法及其在衰落信道下的性能

修春娣<sup>1</sup>, 李道本<sup>2</sup>, 范跃祖<sup>1</sup>, 李永会<sup>3</sup>

(1. 北京航空航天大学自动化学院, 北京 100083; 2. 北京邮电大学信息工程学院, 北京 100876;  
3. 北京航空航天大学电子工程系, 北京 100083)

**摘 要:** 本文基于码率匹配截短 Turbo (RCPT-Rate Compatible Punctured Turbo) 码, 综合利用“码字校验交替重传”方案及 Chase 组合技术, 提出了一种新型混合 ARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest) 方法, 并进一步在瑞利衰落信道上对该方法的性能进行了仿真验证, 同时将其与几种现有基于 RCPT 码的混合 ARQ 方法进行了比较. 数值结果表明, 本文所提方法能以较低的系统实现复杂度获得较好的性能.

**关键词:** 混合 ARQ; 码率匹配截短 Turbo 码; 码字校验交替重传; Chase 组合

**中图分类号:** TN929 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 10-1568-03

## Hybrid ARQ Scheme Using Rate Compatible Punctured Turbo (RCPT) Codes and Its Performance over Rayleigh Fading Channel

XIU Chun-di<sup>1</sup>, LI Dao-ben<sup>2</sup>, FAN Yue-zu<sup>1</sup>, LI Yong-hui<sup>3</sup>

(1. Dept. of Automatic Control, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;  
2. Dept. of Information Engineering, Beijing University of Post Telecommunication, Beijing 100876, China;  
3. Dept. of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** This paper presents a novel Hybrid ARQ (Automatic Repeat reQuest) scheme, which jointly utilizes RCPT (Rate Compatible Punctured Turbo) codes and CPC (alternate “Codeword retransmission” and “Parity retransmission” & Chase combining) strategy. Performance of the proposed scheme is investigated by numerous simulations and compared with several current Hybrid ARQ schemes using RCPT codes over Rayleigh fading channel. Numerical results show that the proposed scheme can provide better performance with lower system complexity.

**Key words:** hybrid ARQ; RCPT codes; alternate “codeword retransmission” and “parity retransmission”; chase combining

### 1 引言

数字通信系统的飞速发展对数据通信的可靠性提出了更高的要求, 第三代移动通信 (3G) 系统高速分组数据业务要求误码率达到  $10^{-6}$  或更低, 然而, 在恶劣的信道下, 尤其是高数据速率或高速移动环境中, 多径干扰及多普勒频移等严重地影响着系统性能, 有效的差错控制技术就成为通信领域致力研究的课题. 混合 ARQ 技术, 由于结合了前向纠错 (Forward error correction) 方式的高效性和自动重复请求 ARQ 方式的高可靠性, 越来越得到广泛的重视和应用.

Turbo 码的出现为编码理论和技术的发展开辟了道路<sup>[1]</sup>. 随后, 人们又发展了码率匹配截短 Turbo 码——RCPT 码的概念并将其应用于混合 ARQ 方法中, 实现高速数据的可靠通信<sup>[2~4]</sup>. 现有 3G 系统采用基于 RCPT 码的 Chase 组合方法和递增冗余 IR (Incremental Redundancy) 方法实现物理层差错控制机制<sup>[5~7]</sup>. Chase 组合方法简单, 对缓存需求小, 系统实现复杂性低, 但在低信噪比时系统吞吐量较低. IR 方法以重传递增的冗余回应收端译码失败的重传请求. 当信道条件极其恶劣时, 编译码器结构设计的复杂性及收发两端的缓存需求将随着重传次数的增加而增大, 因而, 系统实现的复杂度较高.

本文综合现有方法的优势, 提出了一种 RCPT/CPC 混合

ARQ 方法. 该方法基于 RCPT 码, 利用“码字校验交替重传”方案<sup>[9]</sup>及 Chase 组合技术 (CPC-alternate “codeword retransmission” and “parity retransmission” & chase combining), 既能很好地改善系统性能又能相对降低系统复杂度.

### 2 码率匹配截短 Turbo 码

在 RCPT/CPC 混合 ARQ 方法中, Turbo 码采用并行级联卷积码 PCCC (Parallel Concatenated Convolutional Code) 方案, 将其输出按不同的截短方式进行截位即可获得不同的 RCPT 码. 本文仅考察初始码率为  $1/2$  和  $3/4$  的两级编码方案, 对应的 RCPT 编码器结构如图 1 所示, 由三个  $1/2$  码率的递归系统卷积 RSC 编码器和两个不同的 Turbo 内交织器级联而成, 附加的截短电路用来实现必要的截位操作.

图 1 中, RSC 编码器的移位寄存器初始值皆设为零. 对于每一个输入比特流  $X$ , 有六个输出比特流  $X$ 、 $Y$ 、 $X$ 、 $Y$ 、 $X$  及  $Y$  形成,  $X$  和  $X$  为交织后的  $X$ 、 $Y$ 、 $Y$  和  $Y$  分别为三个 RSC 编码器输出的校验比特流. 进一步对每一个输出比特流按照一定的截短方式和截短周期  $p$  进行截位, 以获得所需的 RCPT 码. 对应于  $n$  个比特流的截短方式可以用  $n \times p$  阶的矩阵  $P$  表示, 称为截短矩阵.

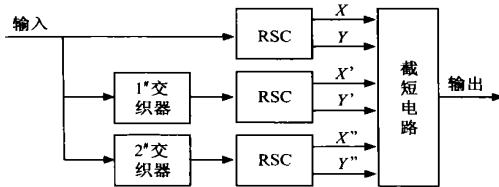


图1 RCPT编码器结构图

依据选用的两级编码方案和所提的混合 ARQ 方法,我们选定 RCPT 码组一的码率为 1/2、1/4,相应的截短周期  $p$  为 2,截短矩阵  $P_{11}$ 、 $P_{12}$ 如下。

$$P_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, P_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

同时选定 RCPT 码组 2 的码率为 3/4、3/8,相应的截短周期  $p$  为 6,截短矩阵为下列的  $P_{21}$ 、 $P_{22}$ 。

$$P_{21} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, P_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

### 3 RCPT/ CPC 混合 ARQ 方法

基于选定的 RCPT 码组,RCPT/ CPC 混合 ARQ 方法的具体实现过程如下:首先,  $k$  比特长数据包被送入 RCPT 编码器得到码字  $A$  和  $C$ ,码字  $C$  为 1/4(或 3/8)码率的 RCPT 母码,  $A$  是按照矩阵  $P_{11}$ 、 $P_{12}$ (或  $P_{21}$ 、 $P_{22}$ ) 将  $C$  截短而得到的 1/2(或 3/4)码率的 RCPT 子码。被截掉的校验比特构成与  $A$  等长的校验码组  $B$ ,  $A$  与  $B$  可结合构成母码  $C$ , RCPT 的码结构如图 2。

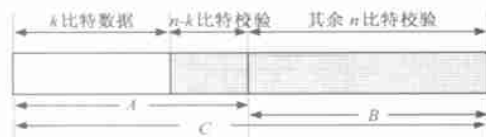


图2 RCPT码构成

考虑到传输的实时性,我们将混合 ARQ 系统的最大传输次数限定为 3。第一次传输过程中,发端首先发送子码  $A$ ,母码  $C$  被储存在发端缓存中以备重传。以  $A^*$  表示对应接收码字,收端尝试对  $A^*$  进行译码。若译码成功,则该组数据被接受,同时收端通过反馈信道反馈一个 ACK(Acknowledge) 信号通知发端发送下一组数据;否则,收端将  $A^*$  储存在收端缓存中,并反馈一个 NAK 信号要求发端数据的重传。发端接到第一个 NAK 信号后发送校验码组  $B$ ,以  $B^*$  表示对应接收数据,收端将  $B^*$  与缓存中的  $A^*$  结合构成  $C^*$  后尝试译码。若译码成功,收端接受该组数据并反馈一个 ACK 信号;否则,  $B^*$  被储存在收端缓存中,同时一个 NAK 信号被反馈给发端要求数

据的再次重传。

发端以重传子码  $A$  回应收端的第二个 NAK 信号。收端将新接收到的  $A^*$  与缓存中  $A^*$  进行 Chase 组合,然后进一步与缓存中的  $B^*$  结合构成  $C^*$ ,送入译码器。若译码成功,则该组数据被接受,一个 ACK 信号被反馈给发端;否则,收端抛弃该组数据并反馈一个 NAK 信号,等待发端下一组数据传输。

这样,发端交替传送子码  $A$  与校验码组  $B$ ,即为“码字校验交替重传”方案。Chase 组合技术用来获取分集增益,可采用等增益合并、最大比值合并等合并算法。

### 4 数值仿真结果

本文利用 COSSAP 仿真软件在单径瑞利衰落信道下,对现有基于 RCPT 码的 Chase 组合混合 ARQ 方法、部分 IR 方法、全 IR 方法及 RCPT/ CPC 混合 ARQ 方法进行了一系列的仿真,并以相同的系统最大吞吐量为依据对仿真结果加以比较。

数据通信中,信息的传输通常以帧为单位,本文假设系统传输一帧数据需 2ms,并以信息帧统计量达  $10^4$  或错误帧达 500 为仿真结束条件。系统仿真参数如下:ITU PA 信道,车速 5km/h;检错码采用 CRC-16:  $g(D) = D^{16} + D^{12} + D^5 + 1$ ;RSC 编码器的生成多项式为:  $g_1(D) = 1 + D^2 + D^3$ ,  $g_2(D) = 1 + D + D^3$ ; Turbo 码内交织器采用伪随机交织器; Chase 组合采用最大比值合并算法; Turbo 译码器采用 Log-MAP 译码算法。仿真过程中,考察如表 1 所示的四级调制编码方案 MCS( Modulation and Coding Scheme), 并进一步假设反馈信道为无误传输。在评估混合 ARQ 系统性能时,我们以系统误帧率 FER 和系统吞吐量作为度量标准。

表1 调制编码方案 MCS 及参数

调制编码方案	MCS1	MCS2	MCS3	MCS4
调制	QPSK	16QAM	16QAM	64QAM
码率	1/2	1/2	3/4	3/4
数据帧长	256	512	512	768
交织深度	122	250	372	564

误帧率是衡量数据通信系统可靠性的一种度量,定义为收端未能正确译码而抛弃的帧数与发端发送的总帧数之比。图 3~6 比较了  $E_b/N_0$  ( $E_b$  是每个信号比特的功率,  $N_0$  是噪声功率谱密度) 在 0~30dB 范围内几种混合 ARQ 方法的 FER 性能。其中, Chase 组合方法于 MCS1 性能最好而于 MCS4 最差。全 IR 方法则恰恰相反,其可靠性随着 MCS 级别的增加而增加。另一方面, Chase 组合方法在  $E_b/N_0$  较低时失效,而  $E_b/N_0$  较高时全 IR 方法处于劣势。由图 3~6 还可以观察到,部分 IR 方法和本文所提出的 RCPT/ CPC 混合 ARQ 方法在整个  $E_b/N_0$  范围内皆有效,可靠性介于 Chase 组合方法和全 IR 方法之间,但后者对应于高级别 MCS 的性能明显优于前者。

差错控制系统的吞吐量定义为单位时间内收端正确接收的信息比特数,由 FER 及峰值速率决定。在混合 ARQ 系统中,将 ARQ 过程引起的传输时延折算到吞吐量的公式中,可得到

$$\text{吞吐量} = (1 - FER) \times \text{峰值速率} / \text{平均传输次数}$$

峰值速率定义为单位时间内发端发送的信息比特数,即

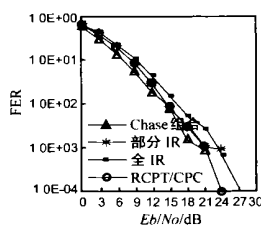


图3 对应MCS1的FER性能比较

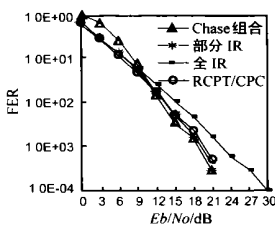


图4 对应MCS2的FER性能比较

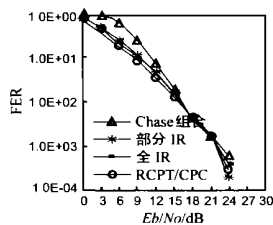


图5 对应MCS3的FER性能比较

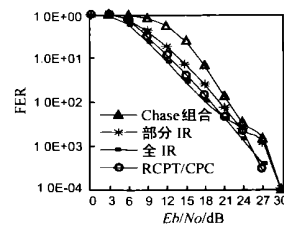


图6 对应MCS4的FER性能比较

系统对应于固定信息包长的最大吞吐量. 平均传输次数即收端成功接收一个信息帧或最终抛弃该帧信息所需要的传输次数(包括第一次传输和所需的重传次数).

几种混合 ARQ 方法系统吞吐量的比较曲线如图 7 ~ 10

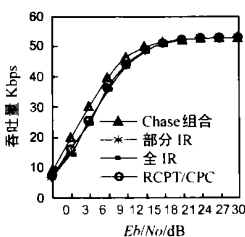


图7 对应MCS1的吞吐量比较

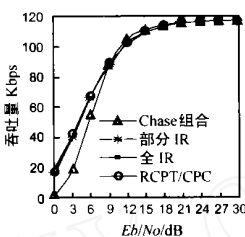


图8 对应MCS2的吞吐量比较

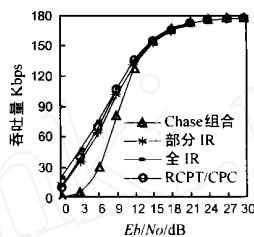


图9 对应MCS3的吞吐量比较

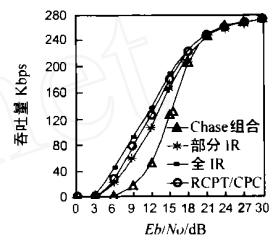


图10 对应MCS4的吞吐量比较

本文还从译码复杂性角度比较分析了几种基于 RCPT 码的混合 ARQ 系统实现复杂度. Chase 组合混合 ARQ 系统对重复发送的数据只做简单的加权译码操作,因而译码算法和译码设备简单,系统实现的复杂性低. IR 方法中,低码率 RCPT 码需要多级 Turbo 编码器级联,从而译码算法和译码结构复杂,译码时延大,相应的译码设备也复杂,成本高.相比之下,RCPT/CPC 混合 ARQ 方法由于利用了“码字校验交替重传”方案,使系统不再需要类似 IR 方法中可能低于 1/4 码率的 RCPT 码,进而降低了译码复杂性和译码时延.

## 5 结论

本文基于码率匹配截短 Turbo 码,利用“码字校验交替重传”方案及 Chase 组合技术提出了一种有效的 RCPT/CPC 混合 ARQ 方法,并在瑞利衰落信道下对该方法及现有的 Chase 组合混合 ARQ 方法、部分 IR 混合 ARQ 方法、全 IR 混合 ARQ 方法的性能进行了仿真验证和比较分析.仿真结果表明,本文所提出的 RCPT/CPC 混合 ARQ 方法在整个 SNR 范围内于任何一级 MCS 都能以较低的复杂度获得较高的可靠性和系统吞吐量.因而,综合系统性能和复杂度两方面考虑,RCPT/CPC 混合 ARQ 方法不失为实现高速数据高效可靠传输的一种优选解决方案.

## 参考文献:

- [1] C Berrou, et al. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: turbo-codes [A]. Proc. ICC 93 [C]. Geneva, Switzerland, May 1993. 1064 - 1070.
- [2] A S Barbusescu, S S Pietrobon. Rate compatible turbo codes [J]. Electronics letters, vol. 31, 535 - 536, Mar. 1995.
- [3] D N Rowitch, L B Milstein. RCPT codes in a hybrid FEC/ARQ system

所示.可以看出, Chase 组合方法于 MCS1 能提供最高的吞吐量,而全 IR 方法对于其他级别的 MCS 最有效,本文所提 RCPT/CPC 混合 ARQ 方法能获得近似于全 IR 方法而比其他两种方法高的系统吞吐量.

- [A]. Proc. Communications Theory Mini - Conf. of GLOBECOM 97 [C]. Phoenix, AZ, Nov. 1997. 55 - 59.

- [4] D N Rowitch, L B Milstein. On the performance of hybrid FEC/ARQ systems using rate compatible punctured turbo (RCPT) codes [J]. IEEE Trans. Commun., vol. 48, 948 - 959, June, 2000.
- [5] 3G TR 25.848 V0.6.0 (2000-05) [S].
- [6] Motorola. Performance comparison of hybrid ARQ schemes: additional results [R]. TSGR1 # 18(01)0044.
- [7] US 6,308,294 B1. Adaptive hybrid ARQ using turbo Code Structure [P]. Oct. 23, 2001.
- [8] D Chase. Code combining. A maximum-likelihood decoding approach for combining an arbitrary number of noisy packets [J]. IEEE Trans. Commun., vol. COM - 33, 385 - 393, May 1985.
- [9] Xiu Chundi et al. A novel retransmission strategy of type- RCPT/HARQ scheme for packet data service in CDMA System [A]. FTIC '2001, Beijing, China, Nov. 2001. 358 - 362.

## 作者简介:



修春娣 女,1975 年 11 月生于黑龙江省鸡西市,1997 年毕业于哈尔滨工业大学电气工程系,获学士学位;1999 年毕业于哈尔滨工业大学电气工程系,获硕士学位,现为北京航空航天大学电气工程与自动化学院博士研究生,主要研究方向为 CDMA 系统中自适应调制与编码理论,混合 ARQ 技术,发射分集技术,以及智能交通系统 ITS 中的移动通信技术.

李道本 男,1939 年生于河南省郑州市,北京邮电大学教授,博士生导师,主要研究方向为信号与信息处理,调制与编码,码分多址通信.