

下一代移动通信系统中的混合自动重传请求技术研究

摘 要

由于移动信道的时变和多径传输特性,常导致系统有较高的误码率,而单纯的 FEC(前向纠错码)或 ARQ(自动重传请求)机制往往无法提供所希望的系统性能。因此为了提高数据及图像传输的可靠性,人们提出了采用 ARQ 与 FEC 相结合的混合 ARQ(hybrid ARQ)差错控制方案。该技术于上世纪六十年代初期首次提出,并在过去几十年里得到了较为全面的研究。3GPP 已把它作为第三代移动通信后期高速数据传输的关键技术之一。本论文正是在此背景下,对混合 ARQ 技术从理论和实际应用上进行了深入细致地研究。

本文首先简单介绍了传统及现有的混合 ARQ 所具有的优势与劣势,并分析了其在下一代移动通信系统中的发展。随后以 Turbo 码译码、分集接收和打孔截断作为切入点,研究了多种改进方案。结合 Turbo 码与 ARQ 机制的优势,本文提出了两种新的混合自动重传请求机制:接近恒定传输时延的混合 ARQ 方案与具有混合编码器结构的混合 ARQ 方案。本文完成的主要工作及创新点为:

1. 本文中阐述了 V-BLAST 系统, Turbo 码的编码和译码算法的基本原理及优势,并且通过仿真给出了多天线系统的性能优势和 V-BLAST 系统中以 Turbo 码编码的不同类型混合 ARQ 的性能比较。

2. 提出了接近恒定传输时延的混合自动重传请求方案。该新方法在传统的自动重传请求的基础上采用了 RCPT(码率匹配截短 Turbo)的编码器和解码器,并可以根据需求调整新信息的编码速率来匹配不同的传输模式,因此减少甚至可以消除因为重传引起传输时延。

3. 提出了一种具有混合编码器结构的自适应混合 ARQ。该方案的基本原理是利用 Turbo 码是由两个卷积码编码器构成的特点,根据先前接收机反馈信息估计时变衰落信道当前状态选择不编码,可调速率的卷积码和可调速率的 Turbo 码作为前向纠错码。该方案实现了卷积码和 Turbo 码联合作为前向纠错码的自适应 HARQ 系统,在保证系统性能的前提下,减小了硬件实现中所需的资源,节约了成本。

关键词:混合 ARQ Turbo 码 RCPT 码 下一代移动通信中的 ARQ

THE RESEARCH OF HYBRID ARQ PROTOCOL IN NEXT GENERATION MOBILE COMMUNICATION

ABSTRACT

On the mobile communication systems, a forward error correction (FEC) or automatic repeat request (ARQ) scheme may be insufficient to achieve the desired performance due to the time-varying nature of the channel. Therefore, the reliability of data and image transmission is usually improved using hybrid ARQ error control scheme which is combined by ARQ and FEC. Hybrid ARQ technique was first designed in the early of 1960s and gains comprehensive research during the latest four decades. Recently, 3GPP has proposed it as one of the most pivotal techniques for the high speed packet transmission.

In this paper, research actuality and future progress of Hybrid ARQ are first introduced. The author try to improve the performance of Hybrid ARQ based on Turbo decoding principle、diversity and puncture techniques. Moreover, the paper propose two new Hybrid ARQ protocol: Near invariable transfer delay Hybrid ARQ protocol and A novel Hybrid ARQ protocol with a mix encoder. In this thesis, the author makes the following contributions:

1. Introduce the Hybrid ARQ protocol with Turbo code in V-BLAST system, and the Turbo encode and decode algorithm is also listed. Moreover the author gives the simulation result of performance comparison of different Types of Hybrid ARQ with Turbo coder in V-BLAST system.

2. Propose Near invariable transfer delay Hybrid ARQ protocol. The new protocol using RCPT (Rate Compatible Punctured Turbo) encoder and decoder in the traditional Hybrid ARQ. And the system could adjust the transfer code rate to math different transfer models according to the requirement. MIMO system with n_t transmit antennas and n_r receive antennas is adopted in the protocol, which can improve the frequency band availability with the increasing of antenna amount.

3. Propose a novel Hybrid ARQ protocol with a mix encoder to reduce hardware loss and decoding delay. The mix encoder takes the advantage of the Turbo encoder structure constituted of two convolutional encoders. The system could choose one of uncode, RCPC or RCPT code as FEC with the feedback information through feedback channel. The protocol used only a pair of Turbo encoder and decoder to accomplish combined FEC, which could reduce hardware loss and cost.

Keyword: Hybrid ARQ, Turbo code, RCPT code, ARQ in the next generation communication

图表索引

图 2.1 自动重传请求基本组成框图	7
图 2.2 停止等待式自动重传示意图	7
图 2.3 退回 N 步自动重传请求示意图	8
图 2.4 选择性自动重传请求示意图	9
图 2.5 混合 II 型/III 型 自动重传请求的协议栈	15
图 3.1 Turbo 编码的 V-BLAST 系统中的自动重传请求机制。	19
图 3.2 Turbo 码编码器结构	20
图 3.3 不同天线数的 V-BLAST 系统中的误比特率比较	23
图 3.4 V-BLAST 系统中卷积码与 1/2, 1/3 的 Turbo 码的误比特率比较。	24
图 3.5 不同编码方式, 不同合并方式下混合 ARQ 的吞吐量比较。	25
图 4.1 接近恒定传输时延的自动重传请求的系统框图	30
图 4.2 不同传输模式下的帧结构图	31
图 4.3 接近恒定速率的自动重传请求机制的流程图	32
图 4.4 每包含 10 个帧, 重传门限为 1 的条件下, 本方法的机制和 Turbo 编码的混合自动重传请求机制的中断率性能	35
图 4.5 每包含 50 个帧, 重传门限为 1 的条件下, 本方法的机制和 Turbo 编码的混合自动重传请求机制的中断率性能比较	35
图 4.6 每包含 100 个帧, 重传门限为 1 的条件下, 本方法的机制和 Turbo 编码的混合自动重传请求机制的中断率性能比较	36
图 4.7 每包含 10 个帧, 重传门限为 2 的条件下, 本方法的机制和 Turbo 编码的混合自动重传请求机制的中断率性能比较	36
图 4.8 每包含 50 个帧, 重传门限为 2 的条件下, 本方法的机制和 Turbo 编码的混合自动重传请求机制的中断率性能比较	37
图 4.9 每包含 100 个帧, 重传门限为 2 的条件下, 本方法的机制和 Turbo 编码的混合自动重传请求机制的中断率性能比较	37
图 4.10 三种模式的平均步长的性能比较: 本方法所提出的重传门限为 1, 重传门限为 2 的模式和全 IR Type II 模式	38
图 4.11 传统的全递增冗余的 HARQ 和本方法中重传门限为 1, 重传门限为 2 吞吐量的性能比较	39
图 5.1 新方法提出的具有混合编码器结构的自适应 HARQ 方案的系统框图	45
图 5.2 新方法提出的具有混合编码器结构的自适应 HARQ 方案中的混合编码器结构图	46
图 5.3 具有混合编码器结构的自适应 HARQ 方案的流程图	47
图 5.4 具有混合编码器结构的自适应 HARQ 方案的冗余传输方式图	48
图 5.5 在 AWGN 信道中本方法和递增冗余 Turbo 码编码 HARQ 的吞吐量的比较	49
图 5.6 在 AWGN 信道中本方法和递增冗余 Turbo 码编码 HARQ 的每帧平均迭代次数的比较	51
图 5.7 在衰落信道中本方法和递增冗余 Turbo 码编码 HARQ 的吞吐量的比较	52
图 5.8 在衰落信道中本方法和递增冗余 Turbo 码编码 HARQ 的每帧平均迭代次数的比较	52

独创性（或创新性）声明

本人声明所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京邮电大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

本人签名：严振亚 日期：2007.3.10

关于论文使用授权的说明

学位论文作者完全了解北京邮电大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属北京邮电大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。（保密的学位论文在解密后遵守此规定）

保密论文注释：本学位论文属于保密在__年解密后适用本授权书。非保密论文注释：本学位论文不属于保密范围，适用本授权书。

本人签名：严振亚 日期：2007.3.10

导师签名：刘建中 日期：2007.3.10

第一章 绪论

蜂窝移动通信系统自 20 世纪 70 年代问世以来获得了极大的进步,经历从单基站大功率系统到多基站小功率系统,从单一覆盖模式到蜂窝和复蜂窝覆盖模式,从模拟到数字,从多个不同的国家标准到区域性国际标准,从单一语音业务到可提供语音和中低速数据业务等一系列的变化。这些变化使得移动通信系统在传输能力和传输质量方面获得了极大的进步,成为人们在交流和获取信息中不可或缺的重要工具。但是,相对于有线通信技术的传输能力,相对于人们对通信需求的不断提高,移动通信技术还有待得到更多的研究和开发。未来的个人移动通信系统的目标是使任何人在任何地点、任何时间、以任何方式与任何人进行通信,而且将是语音、数据、图像等多种业务并存的多媒体通信。

1.1 研究背景

第一代模拟移动通信系统是随着频率复用、小区切换技术的方法而得以发展起来的,其典型代表为 AMPS、TACS 等。由于模拟调制的频谱利用率低,抗干扰性能差,因而系统容量有限、保密性能差、不同系统不能兼容、业务质量远逊于有线通信系统。由此促使人们研制出以欧洲的 GSM 系统、美国 IS-95、日本 PDC 等系统为代表的第二代数字移动通信系统。第二代数字移动通信系统基本采用了当时通信和信号处理领域的最新技术,能提供语音通信,以及电路交换的低速或中速率的数据通信,改善了第一代系统存在的不足。同时,在接口规范上充分考虑了国际漫游的需要,形成了统一的区域性国际标准[1]。

由于第二代数字移动通信系统在很多方面仍然没实现人们最初的目标,比如统一的全球标准;同时也由于人们对于系统传输能力的要求越来越高,几千比特每秒的数据传输能力已经不能满足某些用户对于高速率数据传输的需要。在此情况下,人们把目光转向了第三代移动通信系统(3G)。

第三代移动通信系统多址方式的主流为宽带 CDMA 技术;在核心网上使用了电信网络和计算机网络的最新技术:ATM 和移动 IP,实现了语音、电路交换和分组交换数据的多媒体传输,使移动用户可以方便灵活地接入电信网和 Internet;在终端和无线接入网综合应用了信息领域最新发展的技术:多用户检测、快速功控、Turbo 编码、智能天线等技术。这些新技术的使用使第三代移动通信系统可以在复杂的传输环境中提供比第二代移动通信系统更大的系统容量和更高的服务质量[1]。

第三代无线数据传输速率在移动环境中应达到 144Kbps, 在步行条件下达到 384Kbps, 在室内静止环境下为 2Mbps。上述数据传输速率能够支持包括视频点播和 Internet 高速接入等业务, 因此是真正的移动多媒体。2001 年 10 月日本 NTT DoCoMo 开始提供 3G 商用业务, 一些国家和地区也陆续开始部署 3G 网络。

但是, 移动通信技术不会, 也不可能因为今天的成就而停止不前。在最近刚刚写入 3GPP 技术规范的高速下行分组接入 (HSDPA) 技术报告中, 可以实现 10.8Mbps 峰值速率的高速下行数据业务, 其中有很多令人瞩目的技术很可能就在未来的系统中得到应用。

1.2 下一代移动通信中的新技术

1. 自适应调制和编码[1][2] (AMC, Adaptive Modulation and Coding):

根据信道的情况确定当前信道的容量, 根据容量确定合适的编码、调制方式, 以便最大限度地发送信息。HSDPA 中的 AMC 共有 7 级调制/编码方案, 以适配不同用户的信道质量, 可提供高速率传输和高的频谱利用率。

2. 混合 ARQ 协议[1][2] (H-ARQ, Hybrid Automatic Repeat reQuest):

ARQ 和 FEC 相结合的差错控制方法, 与 FEC 共同完成无差错传输保护。混合 ARQ 的通信链路是闭环链路, 存在一个反馈应答信号 (ACK/NACK)。

3. TDD 双工方式[1][2]:

3G 和后 3G 业务中, 很大部分业务将是不对称的 IP 型业务。而在支持不对称业务方面, TDD 双工方式具有先天的优势。

4. 多输入多输出天线[1][2] (MIMO, Multi-Input Multi-Output):

MIMO 可以成倍地提高衰落信道的信道容量。假定发送天线数 m , 接收天线数 n , SNR 是每个接收天线的信噪比。在每个天线发送信号能够被分离的情况下, 信道容量公式如下:

$$C = m \log_2 \left(\frac{n}{m} \text{SNR} \right) \quad (n \geq m)$$

由此可知, 对于多天线阵发送和接收的系统, 在理想情况下信道容量将随着 m 线性增加, 从而提供了目前其它技术无法达到的容量潜力。此外, 由于多天线阵发送和接收技术本质上是空间分集与时间分集技术的结合, 有很好的抗干扰能力, 可以极大地提高通信系统的性能。

1.3 数字通信中的差错控制方法

任何一种通信方式,无论是光纤通信还是移动通信,无论是计算机通信还是卫星通信,都存在一个关键的问题:如何有效地控制由于噪音和干扰而导致的传输错误,以保证数据正确地到达接收方。差错控制技术则为这一问题提供了解决的方案,它主要应用于数据链路层和物理层中,以提高数据传输速率和增大吞吐量为目的。本文的主要工作就是对数字通信中的差错控制方法作为深入的研究与创新。

在数字通信系统中,基本的差错控制方法有以下两种:

1、自动重传请求 (ARQ, Automatic Repeat reQuest) 法

接收端在收到的码元中检测出错码时,即设法通知发送端重发,直到正确接收为止。所谓检测出错码,是指在若干接收码元中知道有一个或一些是错的,但不一定知道错码的准确位置。

ARQ 方式的主要优点有[3]:(1)只需要少量的多余码元(一般为总码元的 5%~20%)就能获得极低的输出误码率,可靠性高;(2)要求使用的检错码基本上与信道的差错统计特性无关,也就是说,对各种信道的不同差错特性,有一定自适应能力;(3)其检错译码器与前向纠错法中的纠错译码器相比,成本和复杂性均低得多。这种方法的主要缺点是:(1)由于需要反向信道,故不能用于单向传输系统,也难以用于广播(一发多收)系统,并且实现重发控制比较复杂;(2)当信道干扰增大时,整个系统可能处于重发循环中,因而通信效率降低,甚至不可通信;(3)不适宜提供实时服务。

2、前向纠错 (FEC, forward error correction) 法

接收端不仅能在收到的码元中发现有错码,还能够纠正错码。对于二进制系统而言,如果知道错码的位置,就能够纠正它。FEC 码在早期主要分为线性分组码和卷积码两类。上世纪 90 年代,随着 Turbo 码、LDPC (Low Density Parity Check) 码的问世, FEC 码的研究进入了一个新的阶段。

FEC 通信系统的优点是:(1)不需要反向信道(传递重发指令)和重发控制系统;(2)系统的传输效率高,等于码速率;(3)不存在由于反复重发而延误时间,实时性好。但它的缺点在于:(1)为了获得高的系统可靠性,必须选用纠错能力强的码组,这使得译码电路复杂化,造价提高;(2)依赖检错和译码的准确性,难以保障系统的高可靠性。

由此可见, FEC 和 ARQ 两种技术各有利弊。为了进一步提高性能,将检错和纠错结合使用。当出现少量错码并在接收端能够纠正时,即用 FEC 法纠正;当错码较多超过纠正能力但尚能检测时,就用 ARQ 法。我们称这一方法为混合

ARQ 法。这一方法在一定程度上降低了 FEC 方式的译码复杂性,又避免了 ARQ 方式的信息传送连贯性差的特点,并且能达到较低的误码率。它主要应用于实时性要求不是太高的业务。

应该指出,发展到今天,我们通常意义上所说的差错重传控制系统,并不仅仅指差错重传的控制机制方面的问题,同时也包括了收发端使用的编解码方法的选择,编码速率的控制,甚至还有调制方式的变换等等。

1.4 本文所做的工作及论文结构

本文主要完成了以下四方面的工作:

1. 按作者的理解对现有的混合自动重传请求机制作出详细的阐述,主要包括不同的重传机制与不同的合并方式。同时阐述了在现行的移动通信环境中广泛采用的重传方式,在文中也给出了未来移动通信系统中混合自动重传请求的发展。

2. 阐述在V-BLAST系统中以Turbo作为信道编码的混合自动重传请求机制的性能分析。在文中先阐述了V-BLAST系统的系统分析,性能比较,以及在移动通信中的优势;也包括了Turbo码的编码和译码算法,分析了Turbo码的编译码优势。在文中通过仿真比较给出了V-BLAST系统中以Turbo码编码的混合自动重传请求的性能比较。

3. 提出了一种解决重传延时的新的自动重传方法,命名为接近恒定传输时延的混合自动重传请求方案。该新方法在传统的自动重传请求的基础上在发送端和接收端采用了RCPT(码率匹配截短Turbo)的编码器和解码器,我们可以根据需求调整新信息的编码速率来匹配不同的传输模式。在重传信息的同时保证新信息比特的传输,以达到恒定的传输时延。同时该方法采用的是 n_T 个发送天线和 n_R 个接收天线的多天线系统。多天线空时编码系统可以使频带利用率随着天线数线性增加,可以提高系统的传输速率,提高传输质量。

4. 提出了一种减少硬件损耗,译码延迟的新的混合自动重传请求机制,命名为具有混合编码器结构的自适应混合ARQ。该方案的基本原理是利用Turbo码是由两个卷积码编码器构成的特点,根据先前接收机反馈信息估计时变衰落信道当前状态选择不编码,可调速率的卷积码和可调速率的Turbo码作为前向纠错码。该方案只利用了一套Turbo编码器和译码器的资源,实现了卷积码和Turbo码联合作为前向纠错码的自适应HARQ系统,在保证系统性能的前提下,减小了硬件实现中所需的资源,节约了成本,而且该方案根据反馈信息选择不同打孔方式和不同编码方式,易于实现自适应编码。

论文共分为六章,结构安排如下:

第二章给出了混合自动重传请求得研究现状与发展,本章介绍了传统自动请求技术,现行混合自动重传请求技术。同时也介绍了混合自动重传请求的实际应用与最新的发展。

第三章V-BLAST系统中基于Turbo码的混合自动重传请求技术,分析了V-BLAST系统的系统性能与Turbo码的编译码特性。同时本章给出了V-BLAST系统和Turbo码相结合下的混合自动重传请求的性能分析。

第四章提出一种接近恒定传输时延的混合自动重传请求技术。该方法可以减少因为重传产生的延时,在信道条件差的情况下减少重传的次數,在信道条件好的情况可以保证恒定传输延时。

第五章提出了一种具有混合编码器结构的混合自动重传请求技术。该方法可以减少硬件损耗和功耗,也减少因为重传的Turbo码的译码时延。该方法主要利用的是RCPT码的特性,以一种编码器机构实现未编码,卷积码和Turbo三种不同的码字。

第六章总结全文的研究工作并对今后的研究方向进行了展望。

1.5 参考文献

- [1] . 胡捍英、杨峰义,“第三代移动通信系统”,人民邮电出版社,2001.8,第一版
- [2] 3GPP TR25.848, “Physical layer aspects of UTRA High Speed Downlink Packet Access(Relase 4)”, 2001.03.
- [3] 樊昌信、詹道庸、徐炳祥、吴成柯,“通信原理”,国防工业出版社,1995.10,第四版。
- [4] 3GPP TR25.835, “Report on Hybrid ARQ Type II/III[S]”
- [5] “Hybrid ARQ methods for FDD in Release 2000[R], TSGRI(#14)-00-0869”, Nokia.
- [6] 杨大成等,“CDMA2000 1x 移动通信系统”,机械工业出版社,2003 年 1 月,第一版
- [7] 付琳、周亮,“3GPP HARQ 简述”,成都信息工程学院学报, SUM No.61, No.2 2002.
- [8] 张平等,“第三代蜂窝移动通信系统——WCDMA”,北京邮电大学出版社,2000 年 11 月,第一版
- [9] 吴江,“WCDMA 系统 Turbo 码译码技术的研究与实现(东南大学硕士学位论文)”, 2002.3

第二章自动重传请求技术的基本原理及研究现状

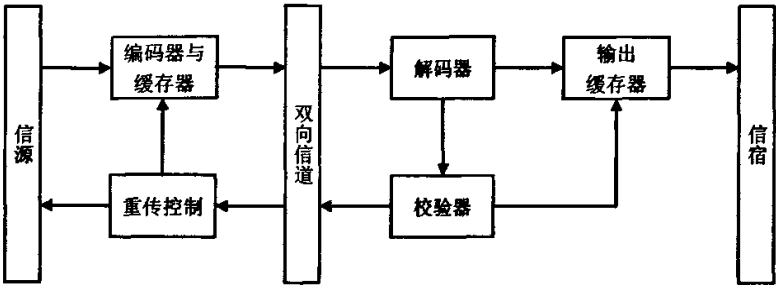
第三代移动通信系统中,高速分组数据业务要求误码率达到 10^{-6} 或更低。然而,无线移动信道具有时变和多径导致的衰落特点,有较高的误码率。当信道条件由于深衰落、多径干扰而恶化时,即使性能优异的 1/3 码率 Turbo 码也会译码失败,因而必须引入有效的差错重传控制技术,以实现高速数据的可靠通信,进而保证服务质量(QoS) [1][2]。

近年来,人们对于差错重传控制技术,尤其是对于混合 ARQ 技术的研究,取得了不少喜人的成果,这一方面的研究也正成为颇受瞩目的热点。目前,3GPP 的无线接入工作组(TSG-RAN)对 3G 采用的混合 ARQ 方法进行大量的性能分析和机制讨论,形成多份技术报告(TR)和技术规范(TS)(参见文献[2][3])。在 HSDPA(下行高速数据分组接入)中,混合 ARQ 技术得到了充分应用,并显著提高了系统的吞吐量[2]。

本章首先介绍了传统的 ARQ 技术,然后对混合 ARQ 的三种类型分别做了详细说明,并给出了混合 ARQ 在第三代移动通信中的实际应用方案,最后简单介绍了混合 ARQ 技术的最新发展。

2.1 传统的 ARQ 技术

自动重传请求系统即 ARQ 系统,其组成原理框图如图 2.1 所示[1]。在发送端,输入的信息码元在编码器中被分组编码(加入监督码元)后,除立即发送外,尚暂存于缓存器中。接收端收到通过信道传来的码元后,由译码器根据该码的编码规则,判决收到的码元序列有无错误。若未检出错误,经反馈信道发出不需重发指令。发送端收到该指令后,继续发送下一码组,发送端的缓存器中的内容也随之更新。若检出错误,则由译码器控制产生一重发指令给原发送端。这时,发送端重发控制器控制缓存器重发一次。仅当译码器认为信息码元正确时,才将信码送给收信者,否则在输出缓存器中删除掉。

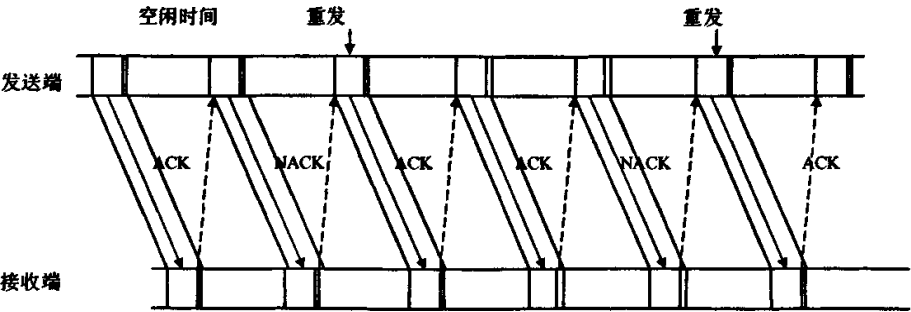


这就是最早的 ARQ 技术，体现了最初差错控制的思想，仅仅只是由收端简单地根据收到的数据帧是否正确来控制重传。若是收到错帧，则发出否定确认信号（NACK，negative acknowledge），要求发端重传上一个数据帧，并等待这个数据帧的重传；若是重传仍有错，则继续重传，直到重传的次数超过系统事先设定的最大重传次数，收端放弃这个数据帧，继续下一个数据帧的传送。

ARQ 技术仅仅是在重传机制方面起到了作用，对于收端和发端的很多环节都没有改进。而且由于没有将 FEC 引入 ARQ 中，使得原始的 ARQ 并没有纠错的功能，只有检错的功能。

根据 ARQ 具体实现方式的不同，大致可分为以下基本的三类[1][2][3]：
1、停止等待式 ARQ（Stop and Wait ARQ，简称 SW-ARQ）

停止等待式 ARQ (如图 2.2 所示)是指发送端每发出一帧数据后，就等待接收端的确认；发送端收到 NACK 后，进行重发。



停止等待式 ARQ 最简单也最易实现，但由于每发出一个数据帧后都要停下来等待应答，所以信道利用率很低。此外这种方案要能具体使用，还需解决下面两个问题：

(1) 丢帧之后的系统恢复

某些偶然性的干扰可能会破坏数据帧的完整性,使接收端无法确认是否收到一数据帧,因而也就不会发出响应信号。另一种情况是接收端已正确收到数据帧,也发出响应信号,但响应在传输过程中因破坏而丢失了。这样造成发送端迟迟收不到响应信号,整个系统一直处于等待状态中。解决这个问题的办法是设定一最长等待时间,一旦超过这个时间还没收到某帧的确认信号的话,发送端就重发该数据帧。

(2) 防止重复帧

若接收端发送的 ACK 丢失了,发端仍重发原来帧,接收端就会收到两个相同的数据帧,即出现重帧现象。解决这个问题的办法是对数据帧进行编号。

2、退回 N 步 ARQ (Go-back-N ARQ, 简称 GBN-ARQ)

GBN-ARQ (如图 2.3 所示) 是发端连续按序发送码字并且把它们存储下来等待接收每个码字的 ACK/NACK 信号。每个码字的应答信号要等到一个周期延时后收到(一个周期延时定义为发送一个码字到收到该码字的应答信号的时间间隔)。在这个周期内,又发送了其它的 $N-1$ 个码字。只要接收到某个码字 i 的 NACK 信号,就停止发送新的码字,重新发送码字 i 和它后面的一个周期内的其它连续的 $N-1$ 个码字。接收端抛弃了码字 i 和它后面无论错误与否的 $N-1$ 个码字,如此重发直到收到码字 i 的 ACK 为止。



图 2.3 退回 N 步自动重传请求示意图

与 SW-ARQ 相比, GBN-ARQ 效率要高得多。它的缺点是某个码字出错后,接收端就抛弃该码字和它后面的 $N-1$ 个码字,即使它们中有些是正确的,这就使系统的吞吐量随着一个周期延时增大而急剧恶化。因此它在高速率和延时周期大的系统中不适用。

3、选择重传 ARQ (简称 SR-ARQ)

在 GBN-ARQ 基础上,当某一帧有错时,设法只重传有错的这一帧,其余 $N-1$ 个正确帧被接收端存储起来。发送端不再需要重传错帧后 $N-1$ 个数据帧,省下的时间用来传送新的帧。这就是 SR-ARQ,其原理如图 2.4 所示。

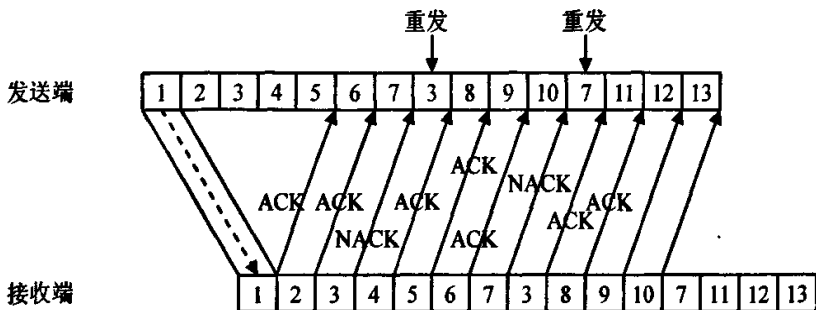


图 2.4 选择性自动重传请求示意图

很显然，SR-ARQ 的吞吐量要大于 GBN-ARQ 的。但由于要存储那些被检测出错误的帧后的其它正确数据帧，SR-ARQ 的接收端必须提供一个足够大容量的存储器，以保证不会有溢出。SR-ARQ 方式的收端可以接收乱序帧，而 GBN-ARQ 方式的手段只能接收顺序帧。

综上所述，这三种基本的 ARQ 控制机制中，SW-ARQ 最简单，对用户端存储容量的要求也最小。但由于不能及时得到确认信息，发端必须在发送下一个数据分组前等待上一个数据分组的确认信息。在等待期间，信道闲置而浪费系统容量。它是无法用于高速大容量的系统中的。

GBN-ARQ 和 SR-ARQ 的效率都优于 SW-ARQ。当然，相比之下 SR-ARQ 的发送效率更高些，但这是以 SR-ARQ 更为复杂的实现作为代价的。SR-ARQ 在等待响应的时候，为了充分利用信道容量，发端要发送大量数据分组。接收端可能要组合那些分隔重传的信息，为此必须要用序列号识别数据分组。序列号和数据分别编码，且序列号需用更可靠的编码以克服任何时候出现在数据里的错误，这样就增加了对信令要求的带宽。

现在，3G 的 HSDPA 信道采用 N 信道停等协议，希望能结合 SW-ARQ 最小复杂度和 SR-ARQ 有效通过率的特点，通过设置并行停等协议的信道数 N 来提高通过率。

2.2 混合 ARQ (Hybrid ARQ) 技术

混合 ARQ (H-ARQ) 可看成是在 ARQ 系统中引入一个 FEC 子系统，用 FEC 来纠正经常出现的错误图样，以减少重发的次数，从而既提高系统可靠性又提高了系统的传输效率。H-ARQ 最早由 J.M.Wozencraft 和 M.Horstein 于 1961 年提出。20 世纪 80 年代和 90 年代出现了研究 H-ARQ 的热潮。S.Kallel、L.K.Rasmussen、M.D.Rice、S.B.Wicker 等人也发表了多篇 H-ARQ 方面的文章。

近年来将混合 ARQ 和物理层相结合的研究课题也具有广阔的发展空间。

基于不同的检错和纠错编码技术, 3GPP 将 H-ARQ 分为三类: 混合 I 型 ARQ、混合 II 型 ARQ 和混合 III 型 ARQ [4][5]。

2.2.1 混合 I 型 ARQ

混合 I 型 ARQ 是为了区别后来出现的改进的 H-ARQ 而命名的, 它实际上就是单纯的将 FEC 和 ARQ 结合。当收端发现收到的数据帧检验有错时, 首先试图进行纠错。当错误数目在纠错范围内时, 错误将被纠正, 并将解码信息直接传送给用户或将其保存在缓存器中等待用户需要; 当错误模式无法识别即错误无法被纠正时, 则丢弃这帧, 同时要求发端重传一个相同的数据帧。当重发帧收到有误时, 仍是开始试图纠错。无法纠错时将重发帧丢弃, 再要求重发。如此周而复始, 直到发送码组被成功接收。

与基本 ARQ 相比, 在较高误码率信道中, 混合 I 型 ARQ 具有较好的性能, 原因在于其纠错能力大大减少了重发次数。但在低误码率信道中, 其优势并不明显, 同时由于加入了更多的校验码元以使码组同时具有检错与纠错能力, 增加了传输的冗余度。

一般来说, 混合 I 型 ARQ 比较适用于噪声基本恒定不变和干扰可预计的信道中。在这类信道条件下, 足够的错码纠正能够大大降低重发次数, 从而较好地提高了系统性能。然而, 对于一个误码率不断变化的时变信道, 混合 I 型 ARQ 同样存在缺点。

对于误码率较低的信道(例如好天气下的卫星信道), 传输非常稳定, 几乎不需要或需要很少纠错, 因此大量的纠错码元就成了大大的浪费。而当信道噪声非常大时, 纠错能力就会觉得不够, 常常需要重发, 从而降低系统的传输效率。

在混合 I 型 ARQ 中, 由于不用保留传错的数据帧, 所以无论收端、发端均不需要很多的存储器, 这样实现起来相对比较简单。混合 I 型 ARQ 可以与不同的编码方式相结合使用, 例如: 分组码、卷积码、Turbo 码和级联码。

2.2.2 混合 II 型 ARQ

混合 II 型 ARQ 的设计初衷是为了克服混合 I 型 ARQ 的缺点, 系统不以恒定的码速率传输, 而是根据信道当前的具体情况自适应调整码速率。从而让它在信道好时多传点信息, 信道差时少传点信息。这点从信道容量的角度很容易理解。

混合 II 型 ARQ 重发请求的产生与混合 I 型相同; 但错帧不被丢弃而是存储在接收端, 并与重发帧合并起来形成一个更可靠的数据帧, 合并的方法有码字合

并和分集合并；重发帧和已发数据帧的内容一般不同。在混合 II 型 ARQ 系统中，由于已发数据帧与重发帧的结合，获得了一个纠错能力更强大的数据帧，这样即提高译码准确性，又可获得高吞吐量和低时延。混合 II 型 ARQ 从设计思路出发也可分为下面几种：

1、纠错位重传

最初的混合 II 型 ARQ 都采用了纠错位重传的设计方法。它是将要发送的码字分两次来传，第一次传只带检错位的码字，如果信道很好的话，传输的过程基本不会造成错误，这就是基本的 ARQ；但是如果信道变得恶劣了，第一次传输不成功，再把剩下的纠错位发过去，这就变成了混合 II 型 ARQ。我们可以看到，纠错位重传其实就是把基本 ARQ 和混合 I 型 ARQ 结合了一下，使它能更好地适应信道的变化，提高传输的效率。

第一个提出这种设计的是 Mandelbaum，后来 Metzner 及林舒教授都对其作了改进。在这种类型的混合 II 型 ARQ 中普遍用到了级联码。由于第一次与第二次传输的码字所组成的码往往非常的长，这就给接收端的译码工作造成了困难，级联码是降低译码难度的一个方法。

2、合并 (Combing)

在可任意使用反馈信道来发重发请求的通信系统中，通过率和可靠性均可通过使用分组合并 (Packet Combining) 的方法来改善性能。接收机将接收到的多个重复分组以某种方式合并成一个更加可靠的分组，从而改善译码数据的可靠性，并降低了重发的概率。通过将任意数目的分组组合，分组合并的差错控制系统也可提供针对信道变化的较好的自适应性。

在如今的 H-ARQ 中，收端通常用来合并数据帧的方法有两种：一是分集合并 (Diversity Combining)，二是码字合并 (Code Combining)。前者是将先后收到的编码速率为 R 的各个码字中的每一个比特都一一相加起来，最后得到一个编码速率仍旧为 R 的码字，然后再将这个码字送到译码器中进行译码。至于码字合并，它能够将数目最少的，编码速率为 R 的码字合并起来，得到一个编码速率小于 R 的码字，这个码字将具有更强的纠错能力。在使用码字合并技术的系统中，设每次发送的码字都是按 R_0 的子编码速率 (sub code rate) 进行编码，若是收端收到 N 个均是由于重传请求而发送的数据帧 (即子码字，sub code word)，这些码字将被合并起来组为一个新码字，而这个码字的编码速率降到 R_0/N 。

在码字合并中有两个关键算法：

- (1) 最大似然译码，而不是通过最小码字距离代数译码；
- (2) 通过软判决得到的，每个收到的码字的权值。

收到 N 个码字, 设为 $c_i, i=1, 2, \dots, N$, 它们各有各的权重, 设为 $w_i, i=1, 2, \dots, N$; 加权后合并, 以实现最大的信噪比, 得到码字 C , 具体公式为:

$$C = \sum_{i=1}^N w_i c_i$$

一般而言, 分集合并虽然性能不如码字合并的出色, 但实现起来比较简单, 没有太复杂的算法, 所以仍是一种不错的合并方法, 如今仍经常使用它。

3、递增冗余 (IR, Incremental Redundancy) [4][5]

随着编码理论的发展, 递增冗余技术逐渐被引入到混合 ARQ 系统中来。IR 主要是通过递增发送码字的冗余度, 以增大正确译码的概率, 从而增加数据吞吐量。其关键之处就在于逐渐降低编码速率, 即递增传送码字的冗余。例如: 在初次传送时, 以高码率编码, 冗余度较小, 若未能正确解码, 则降低编码速率, 增大冗余度, 再次发送, 接收端将两次接收到的数据帧合并解码, 从而增大纠错能力。也就是说, IR 并不是每次重传都采用同一个码字, 同一个编码速率的, 而是根据前一次解码的结果来决定下一次发送的码字的编码速率的。

自适应递增冗余 (AIR, Adaptive Incremental Redundancy) 则是在递增冗余的基础上增加了自适应 (adaptive) 的功能。因为移动通信是时变信道, 比特错误情况随信噪比等因素的变化而变化, 所以信道采用自适应编码速率以适配信道条件, 从而获得较高的吞吐量。

4、链路自适应 (LA, Link Adaptation)

LA 是一个涵盖很广的概念, 比如通常说的 CDMA 系统使用的快速功率控制就是一种链路自适应方法。

最近, 自适应调制和编码 (AMC) 提供了一种新的链路自适应方法, 以保证提高整个系统的吞吐量。它将调制和编码灵活地组合起来, 形成多种不同的方案, 并根据每一个用户的平均信道条件自适应地选择适合该用户的某种方案。比如说 $1/4$ 编码速率和 QPSK 调制组合成为一种方案, $1/5$ 编码速率和 16QAM 调制组合成另一种方案。

当然对于不同组合方案的选择, 必须根据比较准确的信道估计。这就要求链路自适应方案必须包含信道估计这一环节。

IR 和 LA 的核心思想都是通过不断调整数据传输方案, 使之适应时变的无线信道条件, 增大吞吐量。两者的不同点在于, LA 技术需要先行估计信道条件, 然后根据信道估计的结果, 调整编码/调制方案; 而 IR 技术则不需要进行信道估计, 只要根据接收端的解码结果, 来调整发送端的信道编码速率, 而对于调制方案则固定使用一种。

对两者进行比较发现, 单纯的 LA 对于吞吐量的改善不如 IR 明显, 这是

因为 LA 是根据信道预测来跟踪信道的变化, 任何预测的错误都会导致 LA 的性能下降; 而另一方面, IR 对编码速率的选择是根据前一次解码的结果来确定的。自然, IR 更能实时地跟踪信道的变化, 更好的利用信道变化的信息, 获得更大的吞吐量。

当然, IR 较好的性能也是以其较长的时延为代价的。这是由于 IR 的重传机制协议本身需要 ACK/NACK 的反馈, 所以尽管 IR 的整体吞吐量大, 但是其中每一个数据帧所需要的时延都比 LA 的大, 特别是在信道条件恶劣的情况下, IR 往往需要重传好几次方能正确译码。这样数据帧的时延就很大了, 所以说 IR 特别适合用于对时延要求不是很高的无线数据业务中。再者, 对于两者的实现条件进行比较, 可以看到, 对于 LA, 最基本的一点就是在收端需要有信道条件的估测, 并且还能实时与发端交流这些信息; 而对于 IR 而言, 由于较长的反馈时延, 并且需要合并, 所以收端和发端都要有较大的存储器, 同时还需要有完备的信令体系来支持重传。

在第三代移动通信系统中, 混合 II 型 ARQ 可以通过使用 RCPC 码或 RCPT 码很方便地实现。

2.2.3 混合 III 型 ARQ

递增冗余混合 ARQ 系统的一个主要缺点是, 重传的递增的冗余码字自己是不能单独进行译码的, 必须和以前传送的码字一起译码, 方有可能正确译码。因此, 若是在信道条件很差的情况下, 第一次发送过来的数据帧丢失了或是严重损坏了, 后面重传过来的冗余码字即便没错也不能正确译码了。自然这种情况会给系统的性能带来负面的影响。为此, 人们提出了基于 CPC 码(互补的打孔卷积码)的混合 III 型 ARQ。

所谓 CPC 码是指: 同一个编码速率有不同种删除格式, 令 $C_I, I=1, 2, \dots, p$, 表示这些具有相同作用的相同编码速率 b/v 的不同码字, 它们统统是由 b/v 编码速率的码字打孔得到的。再令 P_I 表示对应每个码字 C_I 的打孔矩阵, 则定义矩阵

$$P = \sum_{I=1}^p P_I$$

如果矩阵 P 中的每一个元素都大于或等于 1, 也就是说不能出现 0 这个元素, 则称这 p 个 $C_I (I=1, 2, \dots, p)$ 是互补的。

采用 CPC 码(互补地打孔卷积码)后, 每个已发分组与重发分组都能进行

自解码 (Self-decode)。混合 III 型 ARQ 的重发请求与混合 II 型 ARQ 相同；错误的分组同样需要存储在收端，以便于重发分组组合。它适合于存在深衰落的信道。

2.3 混合 ARQ 应用实例

3GPP 中提供了两种混合 ARQ 的应用方式[6]。

2.3.1 RLC 层上重传

RLC 上重传方式是以重传协议作为现有 RLC 传输协议的补充，它涉及 L2 和 L3 的操作。RLC 上重传对 UE (User Equipment)、Node B、CRNC/DRNC 以及 SRNC 在上行方向和下行方向连接时涉及如下五种可能的的基本操作：(1) TX 缓存：发送端缓存数据以备重传；(2) 冗余参数设置：选择特定重传时 PDU 应具有冗余版本；(3) RX 软判缓存以便组合：接收端缓存接收的首次及重传数据以便组合译码；(4) RX 对 RLC-SDU 的重构缓存：缓存 RLC-PDU 以重构 RCL-SDU；(5) 重传组合：首传与重传数据的组合以便进行差错纠正。

2.3.2 L1 层上重传

L1 层上重传又称快速混合 ARQ (FH-ARQ)。它通过在 Node B 上增设快速混合 ARQ 功能来实现。FH-ARQ 采用 N 信道 SW-ARQ 协议(一般取 $N=2$ ，即双信道停等协议)。它的特点是：一个连续的传输流在时间上分为两个子信道，而这两个信道独立地执行 SW-ARQ 协议。只要确认信息的往返时延足够短，以便响应有效，这种双信道结构就可以确保连续传输。

图 2.5 中虚线显示了在 RLC 层和 L1 层之间混合 II/III 型 ARQ 操作所需的附加信息，实线则显示了用户数据的传输。

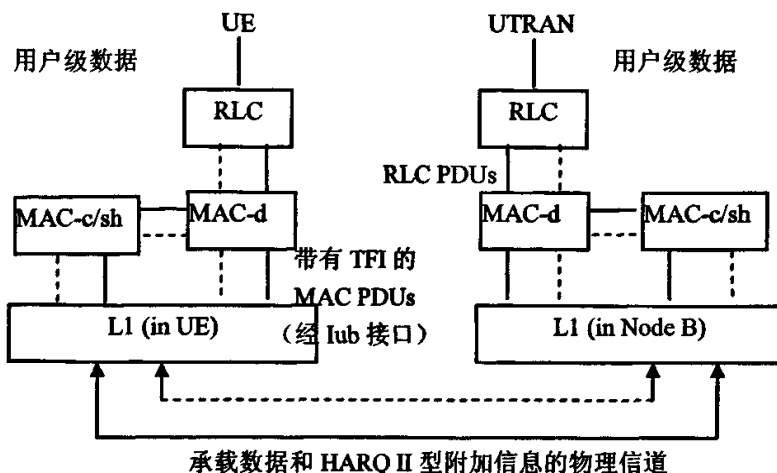


图 2.5 混合 II 型/III 型 自动重传请求的协议栈

2.4 混合 ARQ 技术的最新发展

2.4.1 SAMSUNG 提出的混合 ARQ

Samsung 于 2000 年底提出了一种适用于 CDMA2000 1x 的高速数据业务传输的 H-ARQ 方案[6]。该技术综合运用了准互补码和 Turbo 码的结合，码字合并和分组合并技术等，使得数据的吞吐量有了明显的提高。确切地说，这种 H-ARQ 方案应该算是混合 III 型 ARQ 中的一种，与前面提到的混合 III 型 ARQ 有很多相识之处。

首先，在 Samsung 提出的这种差错重传控制方案中，使用的是准互补 Turbo 码 (QCTC, quasi-complementary Turbo codes)，它与 CPC 码略有类似。QCTC 由 m 个子码组成，每个子码对应不同的生成矩阵。令子码为 $C_i, i=1,2,\dots,m$ ，对应的编码速率为 $R_i, i=1,2,\dots,m$ ，所有的子码能合成一个速率为 R_m 的母码。通过删除和重复，能够生成编码速率为 $R (R \geq R_m)$ 的 QCTC 码。

其次，该混合 ARQ 系统自适应地运用了码字合并和分组合并技术。假设系统中原母码的编码速率为 R_m 。开始时，发送子码，其编码速率大于 R_m ，一旦接收端译码不正确，则要求重发，并使用合并技术。当接收端码字的编码速率大于 R_m 时，系统采用码字合并技术，直到合并后码字的编码速率降到 R_m ，若仍不能正确解码，则开始使用分组合并技术。

理论和仿真结果都已经证明，采用 QCTC 的 Samsung 的混合 ARQ 能够有效地提高系统的吞吐量，特别是在信噪比较低的时候，这样的优势更为明显。

2.4.2 同步递增冗余 (SIR)

一个数据包经过编码,生成 n 个子数据包。开始时,一个或更多子数据包在一个或更多的时隙里发送,收端根据译码结果反馈一个 ACK/NACK。如果反馈 NACK,发端继续发送带有冗余信息的子数据包。

SIR 具体应用在 1x EV-DO 中,如业务信道和控制信道上的分组发送时间可以为 1、2、4、8 或 16 个时隙。当分配的时隙数超过 1 时,将采用 4 时隙交叉 (4-slot interlacing) 方式发送。也就是说,这种情况下,一个物理层分组所对应的多个时隙将不是连在一起发送,而是在时隙之间由 3 个其他分组对应的时隙隔开。如果这个分组对应的多个时隙在还没有全部发送完之前,就已经收到了移动台在反向信道上发送的 ACK,那么还没来得及发送的剩余时隙就不再发送了,而是用来发送其它分组的第一个时隙。之所以中间隔 3 个时隙,这是考虑了移动台接收、解调、解码及反馈 ACK 的延迟。这种情况下,不同分组(用户)有各自规定的发送数据包的时隙,只能在那些规定的时隙内发送以保证严格的同步关系。采用 SIR 会出现以下一些问题:

(1) 当不同用户想发送不同速率(占用不同时隙数目)的数据包时或不同的数据包需要的往返时间不同时,发送端严格的时间同步关系使得这些数据包很难复用。

(2) 在 SIR 中,发端无法告知接收端,如何界定一个子数据包是属于哪一个数据包。因此如果 NACK 误码为 ACK,发端以为译码成功,开始发送新的数据包;而收端仍认为收到的这个子数据还是属于前一个数据包的,于是把它和以前收到的子数据包合并译码,这样一来,同步关系就被打破了。同理,若是 ACK 被误码为 NACK,同步关系也将被打破。

(3) 正是由于同步,使得每个数据包的最大重传次数必须事先确定,使接收端和发送端都明了。

正是由于同步递增冗余存在的这些问题,人们提出了下面的异步递增冗余。

2.4.3 异步自适应递增冗余 (AAIR)

为了适应 HSDPA 和 1x EV-DV,在自适应递增冗余 (AIR) 基础上又提出了异步 (asynchronous) 的概念,于是 AIR 进一步演变为 AAIR,也称 A2 IR。所谓异步是指,同一个用户的不同传送不需要时间同步的关系。发送端等待一个最小往返时间 T_k 之后,就给同一个用户发送另一次数据。与同步的情况不同,两次给同一个用户发送数据之间的时间间隔不是固定的。发送端可以优先安排其它用户占用任意多个时隙发送数据,然后再发送这个用户的冗余信息。在异步自适

应递增冗余系统中, 用一个 NEW/CONTINUE 标志表明这次发送的数据是一个新的数据包的开始还是之前一个数据包的继续(冗余信息), 这将帮助接收端在 ACK/NACK 反馈出错的时候界定属于同一个数据包的那些子数据包。

异步递增冗余有如下优势: 首先, 多个用户的不同包长度、不同速率、不同往返时间的数据包都能灵活地复用发送, 充分利用多用户分集的递增冗余。这是异步相对于同步最明显的优势。其次, 数据包带有 NEW 标志, 防止由于 NACK 误传为 ACK(或者 ACK 误传为 NACK)而导致的收端合并错误。最后, 发端根据 ACK/NACK 反馈, 可自适应控制发送的冗余信息, 由调度程序决定不同用户的优先等级。

2.5 本章小结

本章简要介绍了现有的 ARQ 和混合 ARQ 机制。本章首先介绍了传统的 ARQ 技术, 分别介绍了常用的等停协议, 选择性重传协议和回退 N 帧 ARQ 协议, 现在在移动通信中广泛使用的是等停协议和选择性重传协议。然后本章对混合 ARQ 的三种类型, I 型, II 型和 III 型混合 ARQ 分别做了详细说明, II 型和 III 型混合 ARQ 应用的比较广泛。随后本章给出了混合 ARQ 在第三代移动通信中的实际应用方案, 最后简单介绍了混合 ARQ 技术的最新发展。

2.6 参考文献

- [1] 王 玮, 移动通信系统中的混合 ARQ 技术研究, 东南大学硕士学位论文, 优秀硕士论文, 2004.03.
- [2] 付 琳, 3G 中的 HARQ 原理与组合译码算法研究, 电子科技大学硕士学位论文, 优秀硕士论文, 2003.06
- [3] 3GPP TR25.848, “Physical layer aspects of UTRA High Speed Downlink Packet Access(Relase 4)”, 2001.03
- [4] 王新梅、肖国镇著, “纠错码——原理与方法(修订版)”, 西安电子科技大学出版社, 2001.4, 修订版。
- [5] 杨大成等, “CDMA2000 1x 移动通信系统”, 机械工业出版社, 2003 年 1 月, 第一版。
- [6] 张平等, “第三代蜂窝移动通信系统——WCDMA”, 北京邮电大学出版社, 2000 年 11 月, 第一版。

第三章 V-BLAST 系统中基于 Turbo 码的混合自动重传请求技术

1998 年贝尔实验室的 Golden 和 Foschini 等人提出了垂直贝尔实验室分层空时结构 (V-BLAST) [1][2][3][4], 并利用其搭建的实验平台证明: 在室内富反射环境下, 当平均信噪比 (SNR) 为 24-34dB 时 V-BLAST 系统的频谱效率可达到 20-40bit/s/Hz; 如此高的频谱效率利用传统的技术是无法达到的。使用 Turbo 码编码的 V-BLAST 无线通信系统结合空时码和 Turbo 码的优点[5], 具有与空时码相同的高频谱效率和空间分集增益, 而且因为 Turbo 码获得了更高编码增益。通常空时分层码进行进一步的纠错时, 需要较深的交织, 而且在低信噪比时, 虽然大大降低了传输效率, 却很难达到无错传输, 混合 ARQ 是指 ARQ 重传的内容与已经传输的内容结合起来进行译码的协议, 通常比纯 ARQ 协议具有更高的吞吐效率, 已被广泛采用, 但是相比纯 ARQ, 混合 ARQ 协议通常具有额外的存储器要求, 目前, 对空时码与 ARQ 的联合纠错的研究还比较少。我将通过仿真给出在 V-BLAST 系统中纯 ARQ, II 型, III 型混合 ARQ 的性能差距。

3.1 系统描述

图 3.1 给出了采用 ARQ 机制的 V-BLAST 系统的原理框图[5]。信号源比特流在经过编码和调制 (PSK 或 QAM) 后再经串并变换成为 N_T 路子比特流, 每一路子比特流由其对应的发射机发射出去。发射机 $1 \sim N_T$ 以相同的符号速率发射符号, 并且其间是符号同步的。假设每一路子比特流都采用相同的调制方式, 并且是以长度为 K 个符号的数据包为单位发射的。每一个发射机的发射能量都是与 $1/N_T$ 成比例的, 因此总的发射能量与 N_T 无关。

接收机 $1 \sim N_R$ 均为传统的接收机 (PSK 或 QAM)。每一个接收机所接收的信号都是来自所有 N_T 个发射机的。为了简单起见, 假设信道是平坦衰落的, 信道转移函数矩阵为 $\mathbf{H}$, 其元素 h_{ij} 表示第 j 个发射机到第 i 个接收机之间的 (复) 信道转移函数, 并且有 $N_T \leq N_R$ 。假设信道是准静态的, 即在一个数据包 (K 个符号) 的时间内信道的变化可以忽略。另外, 信道在接收端是可以精确估计的 (例如, 通过嵌在数据包内的训练序列), 在今后的讨论中我们对信道矩阵 $\mathbf{H}$ 及其估计值不做区分。

在混合 ARQ 协议与空时码结合的系统, 假定系统具有理想的错误检测, 如图 3.1 所示发送端采用 Turbo 码编码的空时分层码方式发送, 接收端采用迫零

串行干扰删除的方法进行检测[1][2], 并输出软信息, 译码方法采用软信息的 MAP 迭代译码。当接收端检测道错误的数据帧时, 接收端存储接收数据, 发送端重新发送数据帧或者冗余版本时, 接收端把新收到的数据与所存储的数据以一定的方式合并。合并后的数据经过错误检测后, 如果无误则向发送端发送 ACK, 发送端开始发送新帧, 如果检测有误, 则发送 NACK, 发送端继续发送重传信息或者抛弃旧信息发送新信息。

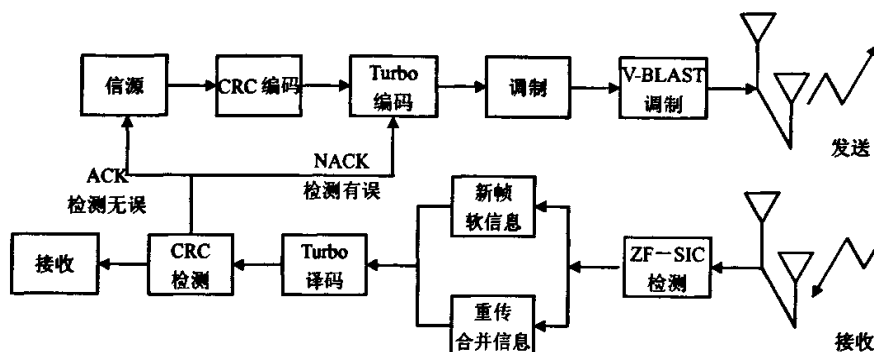


图 3.1 Turbo 编码的 V-BLAST 系统中的自动重传请求机制。

3.2 Turbo 码编码与译码

Turbo 码, 又称并行级联卷积码(PCCC), 最早于 1993 年由法国人 C.Berrou 和 A.Glavieux 共同提出[6]。其编码器由两个递归系统卷积码(RSC)并行级联而成, 二者间由非均匀交织器相互隔离。它巧妙地将卷积码和随机交织器结合在一起, 实现了随机编码的思想; 同时, 采用软输出迭代译码来逼近最大似然译码。计算机仿真结果证实 Turbo 码在 AWGN 信道下的纠错性能已接近香农限。因而一经提出便立即引起信息与编码理论界的轰动, 被认为是近年来纠错编码领域中最重大的突破。

在第三代移动通信系统中, 不但要求传输语音信号, 还要传输数据及图像等多媒体业务。第三代移动通信标准几乎无一例外的选定 Turbo 码作为高速信道的纠错编码方案。而将 Turbo 码用于混合 ARQ 系统的传输方案也被提出, 并进行了各式各样的性能分析。

3.2.1 Turbo 码的编码结构

纠错码的编码器结构是决定其纠错能力的基础, 一个好的信道编码器能够生

成具有优良码距特性的好码，从而增强其抗错能力。Turbo 码的优异性能很大程度上便取决于其与众不同的编码结构。

Turbo 码编码器是由两个递归系统卷积码(RSC)子编码器通过一个非均匀随机交织器并行级联而成，编码后的校验位经过打孔器，从而产生不同码率的码字[6]。图 3.2 表示了一个 Turbo 码编码器框图。

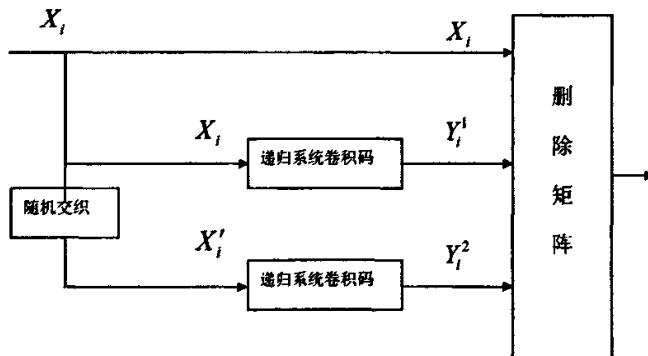


图 3.2 Turbo 码编码器结构

递归系统卷积码 (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_i ，有三个输出比特流 X_i 、 Y_i^1 、 Y_i^2 ，其中 Y_i^1, Y_i^2 为 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 Turbo 码。

3.2.2 Turbo 码译码过程

Turbo 码编码结构上的创新突破了传统纠错编码方案的束缚，因而其译码性能也突破了原有纠错方案的局限，逼近香农理论极限[7][8]。传统的卷积编码器在随机噪声下可以表现出较好的性能，但对于连续突发错误 (Burst Error)，其纠错能力却大大受限。Turbo 编码器引入的并行级联方案突破了串行级联码的局限性，其译码器引入了迭代译码的方法，使得两级译码器间的信息量可以循环传递不断提高信息利用率，增强纠错能力。

Turbo 码的译码采用 MAP 译码算法。Turbo 码的译码器由两个相互级联并带有反馈结构的软输入/软输出 (SISO) 子译码器组成，交织器与编码器中的交织器相同。两级译码器间由交织或解交织结构相互隔离，可多次迭代在两级译码器间相互传递有效信息流，不断增大 MAP 算法的判决可靠性。当迭代循环到一定程度时即可进行解码硬判输出。

MAP 算法是基于符号错误概率最小准则的最大后验概率 (MAP) 算法。以下介绍的是用于实现 MAP 解码的改进 BCJR 算法 Bahl、Cocke、Jelinek and

RajivAlgorithm) [6]。MAP 译码器的输入序列为 $R_1^N = (R_1, \dots, R_k, \dots, R_N)$ 。其中 $R_k = (x_k, y_k)$ 。 $L_e(u_k)$ 是关于信息比特 u_k 的先验信息， $L(u_k)$ 是关于 u_k 的对数似然比。它们的定义如下：

$$L_e(u_k) \equiv \ln \frac{P(u_k=1)}{P(u_k=0)} \quad (3.1)$$

$$L(u_k) \equiv \ln \frac{P(u_k=1|R_1^N)}{P(u_k=0|R_1^N)} \quad (3.2)$$

MAP 算法的目的是根据 R_1^N ，找到最有可能的 u_k ，并输出关于 u_k 的软信息。

根据译码器 2 输出的对数似然比对 u_k 判决，判决准则为： $\hat{u}_k = \begin{cases} 1 & L(u_k) \geq 0 \\ 0 & L(u_k) < 0 \end{cases}$

假设发送端 RSC 码编码器的存储级别为 v ，约束长度为 K ，时刻 k 的编码器状态为 S_k 。由文献[6]，引入概率密度函数 $r_k(s', s)$, $\hat{\alpha}_k(s)$, $\hat{\beta}(s')$ ，定义如下：

$$\gamma_k(s', s) = p(S_k = s | S_{k-1} = s') \cdot p(y_k | S_k = s, S_{k-1} = s') = P(u_k) \cdot p(y_k | u_k) \quad (3.3)$$

$$\tilde{\alpha}_k(s) = \frac{\alpha_k(s)}{\sum_s \alpha_k(s)} = \frac{p(S_k = s, y_1^k)}{\sum_s p(S_k = s, y_1^k)} = \frac{\sum_{s'} \tilde{\alpha}_{k-1}(s') \gamma_k(s', s)}{\sum_{s'} \sum_{s''} \tilde{\alpha}_{k-1}(s'') \gamma_k(s'', s)} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\beta}_k(s') &= \frac{\beta_{k-1}(s')}{p(y_1^k | y_1^{k-1})} = \frac{\sum_s \beta_k(s) \gamma_k(s', s)}{p(y_{k+1}^N | y_1^k) p(y_1^k) / p(y_1^{k-1})} = \frac{\sum_s p(y_{k+1}^N | S_k = s) \gamma_k(s', s)}{p(y_{k+1}^N | y_1^k) p(y_1^k) / p(y_1^{k-1})} \\ &= \frac{\sum_s \tilde{\beta}_k(s) \gamma_k(s', s)}{\sum_{s'} \sum_{s''} \tilde{\alpha}_{k-1}(s'') \gamma_k(s'', s)} \end{aligned} \quad (3.5)$$

根据文献[2]， $L(u_k)$ 可以改写成：

$$L(u_k) = L_e y_k^s + L^e(u_k) + \left[\frac{\sum_{s'} \tilde{\alpha}_{k-1}(s') \cdot \gamma_k^e(s', s) \cdot \tilde{\beta}_k(s)}{\sum_{s''} \tilde{\alpha}_{k-1}(s'') \cdot \gamma_k^e(s'', s) \cdot \tilde{\beta}_k(s)} \right] \quad (3.6)$$

式中, 第一项为信道值, 第二项为前一译码器为第二译码器提供的关于 u_k 的先验信息, 第三项为可送给后续译码器的外部信息[6]。

总结 MAP 算法解码步骤如下:

第一步: 接收完整序列后, 初始化及外附信息量;

第二步: 子译码器 1 中 $\hat{\alpha}_k(s)$ 前向推进 $k=(1 \rightarrow N)$, $\hat{\beta}_k(s)$ 逆向推进 $k=(N \rightarrow 1)$, 并计算对数似然比和外附信息量;

第三步: 子译码器 2 同样先计算 $\hat{\alpha}_k(s)$ 和 $\hat{\beta}_k(s)$, 再计算对数似然比和外附信息量;

第四步: 判断迭代次数, 如未完成, 返回第二步, 如完成, 前进到第五步;

第五步: 硬判决, 得到信息序列中每一比特的译码结果。

3.3 仿真结果及分析

在低信噪比的情况下, Turbo 码的译码性能要比传统的卷积码优异很多。但是在恶劣的信道环境下, 由于发送的信号收到严重干扰, 仅仅采用 Turbo 码作为信道编码方案其性能不一定能满足要求, 并且随着接收端迭代译码次数的增加, 译码输出的对数似然值会出现波动, 严重影响了译码的性能和效率。因此, 人们纷纷提出了基于 Turbo 码的混合 ARQ 方案。Narayanan 首先将 Turbo 码用于混合 ARQ 系统中[9]。

Turbo 码中独有的循环迭代译码结构是 Turbo 码具有良好译码性能的一个重要原因。各个译码单元特有的纠错信息, 也就是我们所说的外附信息, 为另一个译码单元提供了进一步纠错的可能性。但是, 这种反馈译码带来的性能上的增益是有限度的, 即这一额外的信息也不是可以无限地提供的, 原因如下: 虽然子译码器 2 译码时利用了与子译码器 1 相互独立的信息, 但它同时也利用了子译码器 1 所提供的译码信息, 这使得子译码器 2 的译码信息中只有部分是与子译码器 1 相互独立的。子译码器 1 利用边信息中与之独立的部分信息进行译码, 并将含有这部分独立信息的译码信息再次送入子译码器 2, 这必然使子译码器 2 的译码信息中与子译码器 1 相互独立的信息量减少。在一定次数的循环迭代之后, 2 个译码单元的外附信息就会具有很强的相关性, 而不再提供新的纠错信息, 这时称循环迭代次数达到了饱和。当两个子译码器中的信息得到充分交换, 并达到平衡状态时, 译码达到最佳效果。当迭代到一定次数后, 随着迭代次数的增加译码性能的改善就很微小。一般认为, Turbo 码在 5~10 次循环迭代之间达到饱和, 当序列的帧长增加时, 饱和迭代次数也会相应增加。

图 3.3 将给出在 V-BLAST 系统中发射天线数和接受天线对误比特率的影响。V-BLAST 系统是属于 MIMO 的多天线系统，MIMO 可以成倍地提高衰落信道的信道容量。此外，由于多天线阵发送和接收技术本质上是空间分集与时间分集技术的结合，有很好的抗干扰能力，可以极大地提高通信系统的性能。图 3.3 通过仿真给出了多天线系统中天线数对通信系统性能的影响，图中分别给出了 1×2 ， 2×4 ， 4×8 的 MIMO 系统的误比特率曲线。通过仿真证明随着天线数目的增加，误比特率也随之下降，原因是天线数带来的增益可以减少因为信道产生的差错，有效的提高了系统的性能。

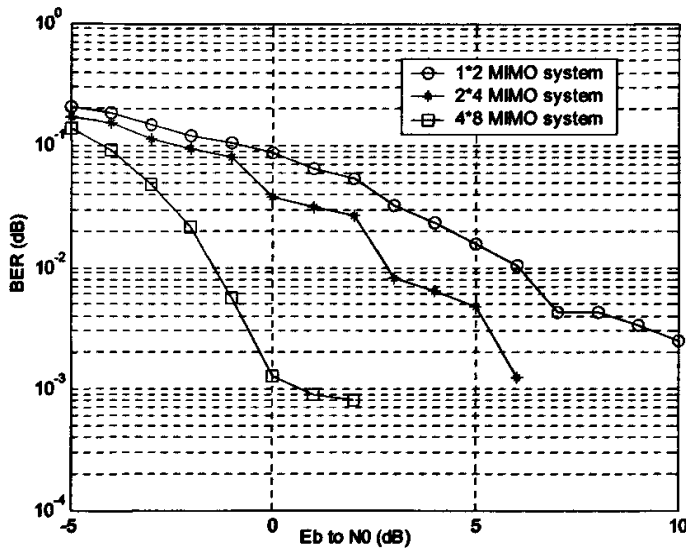


图 3.3 不同天线数的 V-BLAST 系统中的误比特率比较

图 3.4 给出了在 V-BLAST 系统中不同编码方式下的误比特率比较。如图所示，分别列出了码率 1/2 的卷积码，码率 1/2 的 Turbo 码与码率 1/3 的 Turbo 码的误比特率。Turbo 因为其优异的编译码性能获得了下一代移动通信标准的青睐，它具有接近香农信道极限的优势。因此在下图中通过仿真证明了 Turbo 码相对于卷积码所具有的明显优势。同时低码率的 Turbo 码也比高码率的 Turbo 码具有更低的误比特率。

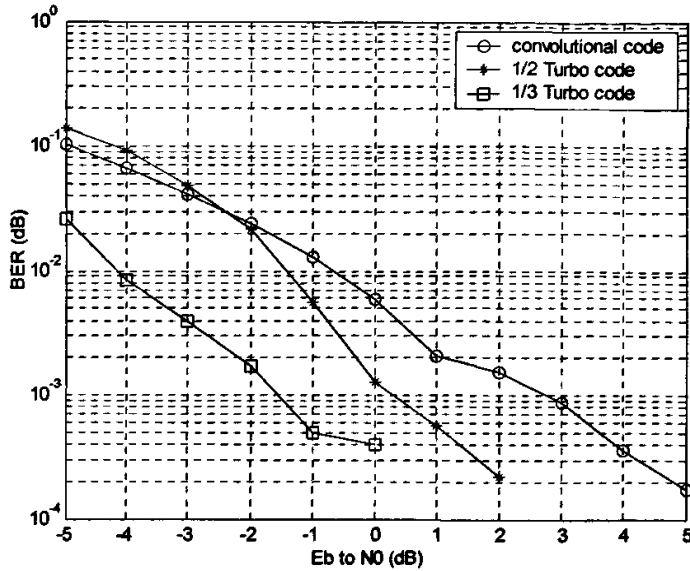


图 3.4 V-BLAST 系统中卷积码与 1/2, 1/3 的 Turbo 码的误比特率比较。

将 Turbo 码应用于 V-BLAST 系统中是未来移动通信发展的的一个方向, 即可以利用 BLAST 系统较高的频谱利用率, 也可以充分发挥 Turbo 码优异的编译码性能。ARQ 机制可以起到精调的作用, 可以利用较少的冗余实现很高的通信质量。在仿真中以吞吐量来衡量 ARQ 机制的性能, 吞吐量的定义为:

$$\text{吞吐量} = \frac{\text{正确传输的比特数}}{\text{总传输的比特数}}$$

式中正确传输的比特数指在发送过程中正确接收的信息比特数据, 而总的传输比特数为正确接收的信息比特数和重传的冗余比特数的总和。当吞吐量为 1 时表示发送的都是信息比特而且都被正确接受, 如果吞吐量为编码速率, 那么意味着发送端以当前编码速率发送, 并且被接收端正确接受, 没有发生重传。

图 3.5 示出了不同编码方式, 不同合并方式下 ARQ 机制的吞吐量比较。图中给出的是 Turbo 码编码的 V-BLAST 无线通信系统中的混 ARQ 机制的吞吐量的比较, 分别给出了该系统下 I 型和 III 型混合 ARQ 机制的吞吐量的比较, II 型, III 型混合 ARQ 机制的吞吐量要明显高于 I 型混合 ARQ 机制。在 III 型混合 ARQ 机制中重传时合并时采用最大比合并 (Max-Ratio Combining) 的吞吐量, III 型混合 ARQ 的合并方式一般采用等增益合并和最大比合并, 而实验证明 MRC 方式的合并要优于等增益合并, 但 MRC 合并需要知道信道的增益, 系统复杂度比较高。图中证明, 在信噪比低于 -6dB 的情况下, III 型混合 ARQ 的性

能高于 II 型混合 ARQ 的性能,因为在信噪比低的情况下,原始信息在传输过程中出错的比特数比较多,只传输冗余校验位很难校正错误的信息位,而依据 III 型混合 ARQ 的重传特性,重传可以自解码的信息位和部分校验位,具有更强的校验性能,合并后的校验性能要优于 II 型混合 ARQ。但当信噪比高于 -6dB 后,因为原始信息出错的比特数减少,需要校正的信息减少,III 型混合 ARQ 重传的信息的利用率就降低了,接收端就不需要那么多的冗余信息来校正错误信息,所以这时 II 型混合 ARQ 的吞吐量

图中还给出了卷积码编码的 V-BLAST 无线通信系统中采用 I 型混合 ARQ 的吞吐量,目的是为了比较在 V-BLAST 无线通信系统中采用卷积码和 Turbo 码对吞吐量的影响,明显可以看到 Turbo 码的性能要优于卷积码,原因是 Turbo 码具有良好的纠错性能,相同码率的条件下 Turbo 的纠错能力要高于卷积码,但 Turbo 码译码算法复杂,时延较长。

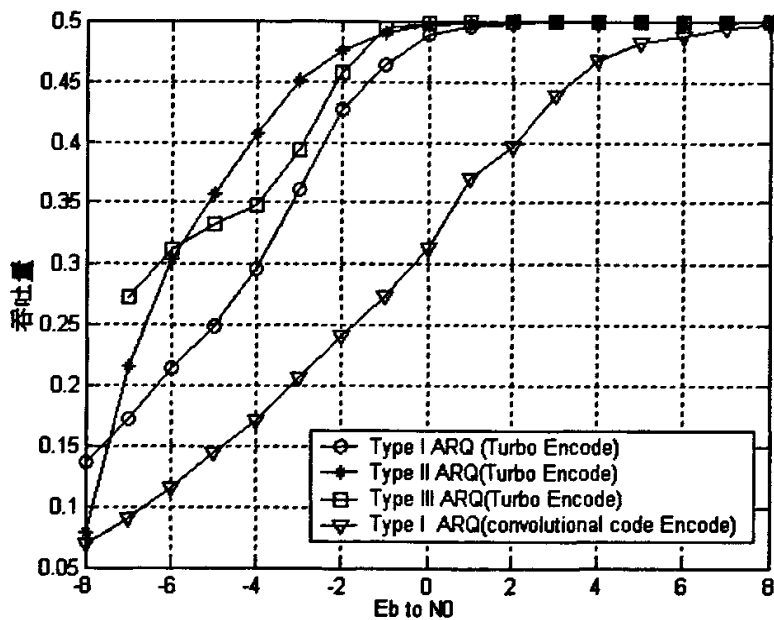


图 3.5 不同编码方式,不同合并方式下混合 ARQ 的吞吐量比较。

3.4 本章小结

本章给出了 Turbo 码编码的 V-BLAST 的混合 ARQ 的性能说明和比较。使用 Turbo 码编码的 V-BLAST 无线通信系统结合空时码和 Turbo 码的优点,既具有与空时码相同的高频谱效率和空间分集增益,而且因为 Turbo 码获得了更高编码增益。V-BLAST 系统和 Turbo 码是今后移动通信发展的新方向,而 ARQ 是

对他们的补充和精调。通过仿真证明, II 型, III 型混合 ARQ 相比 I 型 ARQ 具有更高的吞吐量性能, 但系统复杂度和内存需求要高于 I 型 ARQ。同时通过仿真证明 Turbo 码编码的性能要优于卷积码, 特别是 Turbo 码的打孔性能更加有利于 ARQ 的需要。

3.5 参考文献

- [1] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden, and R. A. Valenzuela, "V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel," in *Proc. ISSE*, Pisa, Italy, September 1998.
- [2] G. D. Golden, C. J. Foschini, R. A. Valenzuela, and P. W. Wolniansky, "Detection algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communication architecture," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 1, pp. 14–16, Jan. 1999.
- [3] J. Benesty, Y. Huang, and J. Chen, "A fast recursive algorithm for optimum sequential signal detection in a BLAST system," *IEEE Trans. Signal Processing*, pp. 1722–1730, July 2003.
- [4] D. Wübben, R. Böhnke, J. Rinas, V. Kühn and K.D. Kanimeyer, "Efficient algorithm for decoding layered space-time codes," *Electron. Lett.*, vol. 37, no. 22, pp. 1348–1350, Oct. 2001.
- [5] S.Kallel and Samir "Efficient hybrid ARQ protocol with adaptive forward error correction" *IEEE COM-42*, 281-289, 1994.
- [6] C Berrou ,et al . Near Shannon limit error-correcting coding and decoding:turbo2codes [A] . *Proc. ICC' 93 [C]* . Geneva , Switzerland ,May 1993. 1064 – 1070
- [7] 李 蕾 差错控制编码在CDMA2000 中的应用研究. 东北电力学院学报. 2004 年12 月. 第24 卷第6 期
- [8] Rowitch D N, Milslein L B. On the performance of hybrid FEC/ ARQ systems using rate compatible punctured turbo (RCPT) code. *IEEE Trans. on communications* 2000. 48 (6) 948-959
- [9] K.R.Narayanan and G.L.stuber, " A novel ARQ technique using the turbo coding principle ", *IEEE Communications Letters*, vol.1, no.2, pp.49-51, March 1997

第四章 接近恒定传输时延的混合自动重传

为了解决传统混合自动重传请求系统中时延抖动等问题,本章提出了一种新的自动重传请求的机制,它能够大幅减小甚至消除因为重传引起的时延抖动的影响。该新方法命名为接近恒定传输时延的混合自动重传请求机制(NITD HARQ, Nearly Invariable Transfer Delay Hybrid Automatic Repeat-reQuest)。

4.1 技术背景

在无线通信蓬勃发展的今天,人们对于信息传输的要求与期望越来越高。其中,有效性和可靠性是用户对信息传输的最基本的两个要求。因此,如何保证高速传输的数据能够准确无误的到达用户终端,成为了如今乃至今后在无线通信中急需解决的问题。而差错控制技术则为这一问题提供了基本的解决方法,特别是近几年提出了结合差错控制编码的HARQ 技术更是能够有效地保证可靠的数据传输[1]。

根据采用的纠错编码速率和合并方式不同, HARQ 分为混合I型(HARQ -Type I),混合II型(HARQ -Type II)和混合III型(HARQ -Type III)。在HARQ -Type I方式中,错误数据抛弃,没有合并。在HARQ -Type II方式中,重传数据和已传数据可以相同,也可以不同,接收机进行合并译码。而在HARQ -Type III方式中,每个已传数据帧和重传数据帧都能独立自解码。

在3G 标准 CDMA2000 和 WCDMA 的空中接口规范中,都是由数据链路层来保障数据的可靠传输。具体实施时两者各有不同。CDMA2000 数据业务的重传机制由媒体接入控制(MAC)层的无线链路控制协议(RLP)实现。RLP 子层使用基于否定应答(NACK)的选择重传 ARQ 协议进行差错控制,基于数据帧的序列号进行有效性检测,尽力而为地保障数据的正确传输。它要求发送端针对未能正确接收的帧进行重发。CDMA2000 信令业务的重传机制由链路接入控制(LAC)层的 ARQ 子层实现。WCDMA 中的数据重传机制由无线链路控制(RLC)层实现。接收方根据收到数据帧的序号判断数据的有效性,并利用状态报告(STATUS PDU)通知发端重发丢失的数据帧。它采用类似 RLP 的基于否定应答的选择重传机制。

在3GPP 中,按照对时延的敏感性区分了四种类型的业务[2]: 话音(conversational)类,流(Streaming)类,交互(interactive)类和后台(background)类。话音业务是时延最敏感的业务,而后台业务是时延最不敏感的业务。HARQ 机制能够保证数据传输的完整性,但是由于重传造成的时延影响,只能用于对时

延不敏感的业务。

4.2 新方法的技术内容

4.2.1 新方法的创新

这个新方法解决其技术问题所采用的技术方案是：如果传输的数据帧不能正确解码，发射机将根据反馈信息将传输错误的数据和待传输的新数据按照设定的规定重新组成新数据帧发送。该方法机制在高信噪比的条件下保证每次传输的数据帧中始终可以包含固定长度的新信息，在低信噪的条件下也可以尽可能的降低重传得次数和中断率。我们用重传某一帧的次数是否超过传输门限来判断信道是否持续恶劣，当信道持续恶劣时，发送端采用传统 HARQ 方式，不再传输新数据只传输已传的错误帧信息。

该新方法在传统的自动重传请求的基础上在发送端和接收端采用了 RCPT（码率匹配截短 Turbo）的编码器和解码器，我们可以根据需求调整新信息的编码速率来匹配不同的传输模式（具体的方向在后面介绍）。该方法采用的是 n_T 个发送天线和 n_R 个接收天线的多天线系统。多天线空时编码系统可以使频带利用率随着天线数线性增加，可以提高系统的传输速率，提高传输质量[3]。

4.2.2 新方法的信息处理过程

该方法提供的接近恒定传输时延的混合自动重传请求机制在发射机端的信息处理包括步骤：

1. 采用循环冗余校验码（CRC）进行校验编码。
2. 采用RCPT编码，发射机根据反馈信息，选择相应的传输模式，调整编码的速率，同时把编码后发送的和打孔的数据存储在发端缓存器中以备重传时使用。
3. 调整帧结构，根据传输模式，将新数据和重传数据以相应方式组合，放入给定长度的帧结构中。
4. 对发送的数据进行调制和多路天线复用处理。首先将数据进行了M-QAM的调制，然后将调制后的数据映射到 n_T 个发射天线上，在时刻 t ，调制后的数据 $x_t^1, x_t^2, \dots, x_t^{n_T}$ 将通过 n_T 个发射天线同时发送。

该方法提供的接近恒定速率的自动重传请求机制在接收端的信息处理包括步骤：

1. 将接收信号进行ZF-SIC(迫零-串行干扰删除)检测

$$y_t^j = \sum_{i=1}^{n_r} h_{i,j}(t)x_t^i + \varepsilon_t^j$$

式中的 y_t^j 表示接收信号, $h_{i,j}(t)$ 表示在 t 时刻上从发送天线 i 到接受天线 j 的信道系数, ε_t^j 表示在 t 时刻上接受天线 j 上的复高斯白噪声。经过检测后, 接收端可以得到了 x_t^i 的估计值 $\hat{x}_t^i$ 。

2. 针对不同传输模式,接收端对新信息进行自解码,对重传信息进行合并后再解码。为了达到最优的性能,我们采取比特级的解码。
3. 解码后的数据经过CRC校验,如果无错,那么通过反向信道向发送端反馈ACK信号。如果检测到错误,那么根据自解码或合并后解码的错误状态向发送端反馈相应的错误信息,同时存储该帧以备与下次重传信息合并使用。发送端根据反馈信息对下帧采用相应的传输模式。

新方法算法的优势是,它既发挥了传统 HARQ 机制保证数据无差错传输的优点,又能够最大限度克服现存 HARQ 机制中传输时延过大,只能用于非实时业务的缺点。新方法在重传时并不停止传输新数据,从而保证能够得到接近恒定传输时延的无差错数据流;新方法可以应用于流媒体类(streaming)和交互类(interactive)等对时延敏感性有要求的业务中;对于无线网络来说,带宽资源是有限的,若采用传统 HARQ 机制,网络要预留大量带宽资源保证重传的开销,若采用该方法的机制,网络预留的带宽会大大减少;某些业务对时延抖动有严格的要求,传统 HARQ 系统会在接收机设置较大的缓存器来消除时延抖动的影响,采用该方法由于得到接近恒定传输时延的数据流,时延抖动不明显,可以大大减小缓存器的大小。

4.3 新方法的具体实施过程

如图 4.1 示出了本章新方法的系统框图,发送端的数据首先经过了 CRC 编码,本方法使用的 CRC 编码器的生成多项式是国际电报电话咨询委员会(CCITT)推荐的多项式,对应的二进制校验序列为 1 0001 0000 0010 0001B。CRC 的生成多项式如下:

$$g(D) = D^{16} + D^{12} + D^5 + 1$$

设定CRC的检错是理想的。

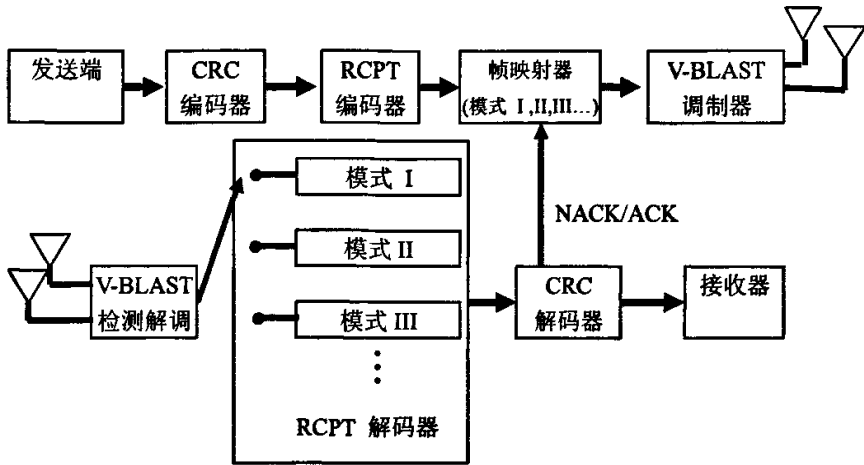


图 4.1 接近恒定传输时延的自动重传请求的系统框图

在CRC编码后采用了RCPT码作为信道编码。RCPT码是在Turbo码的基础上通过调制删除矩阵调制编码速率的。该方法在不同的模式选择不同的删除矩阵，编码速率不同，以适应不同模式下的帧结构的要求。Turbo码编码后的母码数据都保留在发端缓存中，以备因传输出错后的重传使用。

RCPT编码后，该方法需要根据不同的模式调整帧结构，设帧长为 L_f 。如图4.2所示模式I表示传输全新信息（长度为 L ）时的帧结构，RCPT码的编码速率是 R_1 ，此模式下载传输的数据帧包含的都是新信息，长度为 $L_1 (L_1 = L/R_1)$ ；模式II表示接收端检测到一个错帧后发送端发送的帧结构，传输的数据帧里既包含新信息，也包含需要重传的信息，RCPT编码的速率为 $R_2 (R_1 < R_2)$ ，编码后的新信息码字的长度为 L_2 ，因此要传输的数据帧中就有长度为 $(L_f - L_2)$ 空余，这些空余位置就可以用来传输重传信息，重传的信息是在RCPT编码中被删除矩阵删除的校验信息，采用全递增冗余IR (Incremental Redundancy) 信息的方式来传输重传的信息；同理，模式III表示的是检测到两个错误帧时发送端将发送的帧的结构，这时RCPT的编码速率是 $R_3 (R_1 < R_2 < R_3)$ ，编码后的新信息的长度为 L_3 ，在该帧中就有空余长度为 $(L_f - L_3)$ ，这时需要传输的帧结构中包含三个部分，新信息，第一次重传的信息和第二次重传的信息。

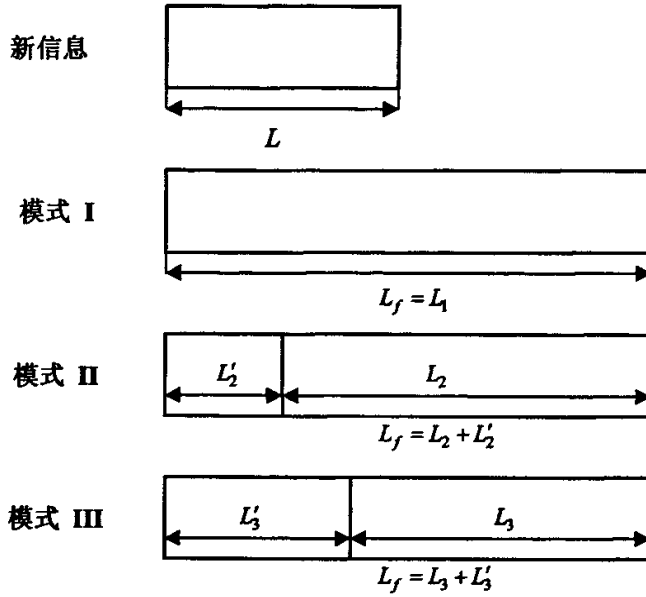


图 4.2 不同传输模式下的帧结构图

编码后的数据再映射到 n_T 个发送天线并进行调制，本方法采用的是多天线系统，数据先经过串并变换映射到 n_T 个发送天线上，然后再作M-QAM的调制并发射。

在接收端对接受的信号做多天线的接收信号的检测，本方法采用的是ZF-SIC检测，保证系统性能的前提下减小系统的复杂度[4][5]。通过了ZF-SIC检测后的数据送入解码器，接收端的RCPT解码器首先要调整接受到帧的帧结构，对新信息和重传信息分别做处理，对新信息要根据RCPT编码时采用的码速率和删除矩阵进行Turbo解码，本方法采用的是比特级的译码，可以有效的提高系统性能，对于重传的信息，可以根据重传的校验位和原有的校验位进行合并译码。RCPT译码后的数据再经过CRC译码，如果没有检测到错误，就通过反馈信道向发送端发送ACK,如果检测到错误，向发送端发送统计错误的帧数，同时将该帧信息存储到收端缓存中等待再次重传信息进行合并。

本方法可以根据系统的具体要求支持多模式的要求，如图 4.3以三模式为例介绍本方法的流程。

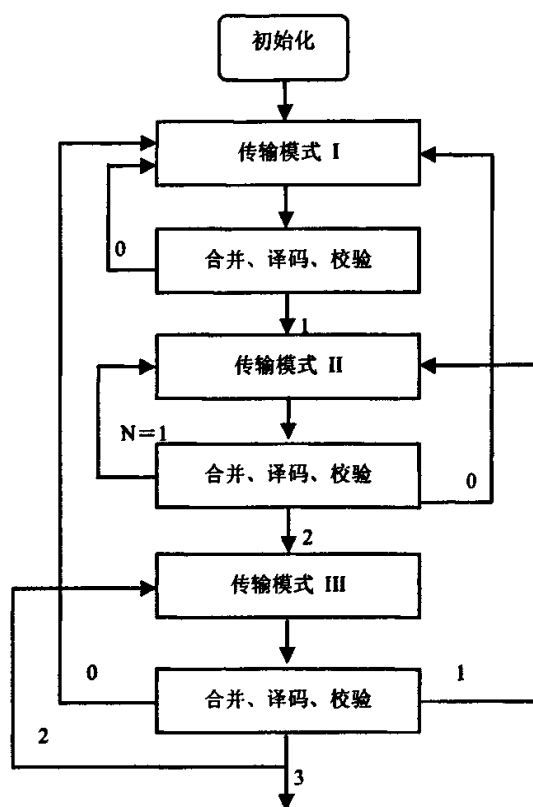


图 4.3 接近恒定速率的自动重传请求机制的流程图

从发送第一帧数据开始,该帧只包含新信息,对应的是模式I,编码速率是 R_1 ,当数据帧传输到接收端,检测后如果无错,那么反馈为0,下一帧仍然是模式I,如果检测到错误,那么下一帧进入模式II,图中的0,1,2,3 分别表示合并和译码后累计错误的帧数。

在模式II中,传输的信息包括两部分,码率变为 R_2 的新信息和上帧传输出错仍需再传的“旧”信息。该帧在接收端检测后,有三种情况,一是新传输的信息检测无误,重传的信息在合并了校验位后也检测无误,那么模式II回到模式I;二是新传输的数据,重传的信息中有一个检测有误,那么反馈为1,下帧进入模式II;三是新传输的数据检测和重传的信息在合并后都有误,那么反馈为2,下帧进入模式III。

在模式III中,传输的信息包括三部分,码率为 R_3 的新信息,上次传输但检测有误的信息所需的重传信息,和经过一次传输一次重传仍然有误的旧信息所需的的重传信息。传输的数据帧在接收端经过检测后,将该帧的三部分做相应的译码,最终经过CRC校验后可出现四种情况:一是三部分均无差错传输,那么反馈为0,

下帧进入模式I；二是三部分中有一个检测有误，那么反馈为1，下帧进入模式II；三是三部分中有两个检测有误，那么反馈为2，下帧进入模式III；四是三部分均未正确传输（此时信道条件持续很差），那么反馈为3，停止传输新数据，将该三帧仍作为新数据放到缓存器发送列表并优先发送，下帧重新进入模式I，只是传输的仍是旧信息。

4.4 新方法的仿真性能比较

为了证明本方法的性能优于传统方案。本节通过仿真给出了本方法和传统 HARQ [6][7]在不同系统参数下的中断率性能比较。每个数据包由若干数据帧组成，当该数据包的所有数据帧全部译码正确后，接收端将这个数据包送到高层处理，最终提交给用户。传统 HARQ 机制中，一旦需要重传，就中断发射新数据而只传旧数据。而在新方法机制中，一旦传输出错，下帧除了传旧数据外还传输了新数据，只有信道持续恶劣，重传次数超过某一个门限值时，才只传旧数据而不再传新数据，我们称此时为传输中断了。本方法中的中断率定义为：

$$\text{中断率} = \frac{\text{中断数据包数}}{\text{总数据包数}}$$

其中中断数据包数是指所有在传输中发生过中断的数据包的个数，总数据包数是指传输的总的数据包数。中断率越低则表明以恒定时延传输的可能性就越高。中断率的指标相当于在传输中保持恒定传输时延率，如果中断率等于 0，那么就意味着完全恒定传输时延，而中断率越接近 0，那么就越接近恒定传输时延的传输率。本方法和传统 HARQ 都是采用 1/2 码率的 Turbo 码编码，传统 HARQ 采用 3GPP 建议的 II 型 HARQ 。

图 4.4, 图 4.5, 图 4.6 示出了本方法和传统 HARQ 的中断率的性能比较。其中每个数据包的帧数有 10、50 和 100 三种情况，本方法的重传门限设为 1，即只重传一次，数据帧结构有 I, II 二种模式。其它仿真参数如下表所示：

发射天线数 n_T	2
接收天线数 n_R	3
帧长 L_f	256
编码前新信息 L	128
模式 I 编码速率 R_1	1/2
模式 II 编码速率 R_2	2/3
调制方式	QPSK

信道	快衰落
----	-----

根据仿真图可知，本方法的中断率要远远低于传统的 HARQ 机制，而中断率越低，就说明该机制连续传送数据帧的概率越高。而在相同的门限条件下，数据包的长度也会影响中断率的性能，数据包越短，中断率越低。

图 4.7, 图 4.8, 图 4.9 示出了本方法和传统 HARQ 的中断率的性能比较。其中每个数据包帧数有 10、50 和 100 三种情况，本方法的重传门限设为 2，即只重传一次，数据帧结构有 I, II 和 III 三种模式。其它仿真参数如下表所示：

发射天线数 n_T	2
接收天线数 n_R	3
帧长 L_f	256
编码前新信息 L	128
模式 I 编码速率 R_1	1/2
模式 II 编码速率 R_2	2/3
模式 III 编码速率 R_3	3/4
调制方式	QPSK
信道	快衰落

根据仿真图可知，本方法的中断率要远远低于传统的 HARQ 机制。而在相同的门限条件下，包的长度也会影响中断率的性能，在快衰落的信道中，短长度的包中断率比长长度的包要低。比较，可知在相同的数据包长度下，重传门限为 2 要比为 1 的中断率低。由中断率的定义可知，中断率越低，那么恒定传输时延的传输率就越高，也就是传输越接近恒定传输时延。在仿真中充分证明了本方法在接近恒定时延的传输上具有巨大的优势。

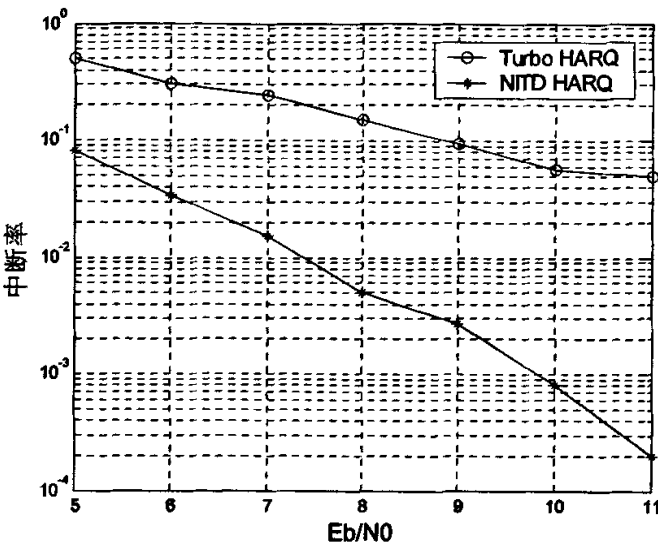


图 4.4 每包含 10 个帧，重传门限为 1 的条件下，本方法的机制和 Turbo 编码的混合自动重传请求机制的中断率性能

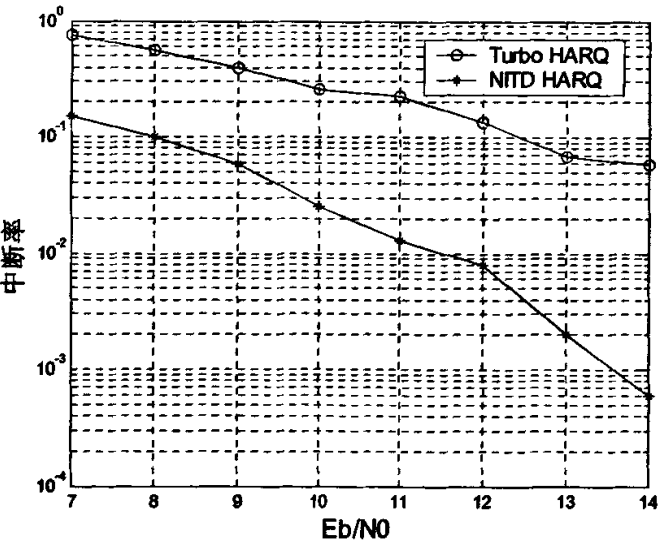


图 4.5 每包含 50 个帧，重传门限为 1 的条件下，本方法的机制和 Turbo 编码的混合自动重传请求机制的中断率性能比较

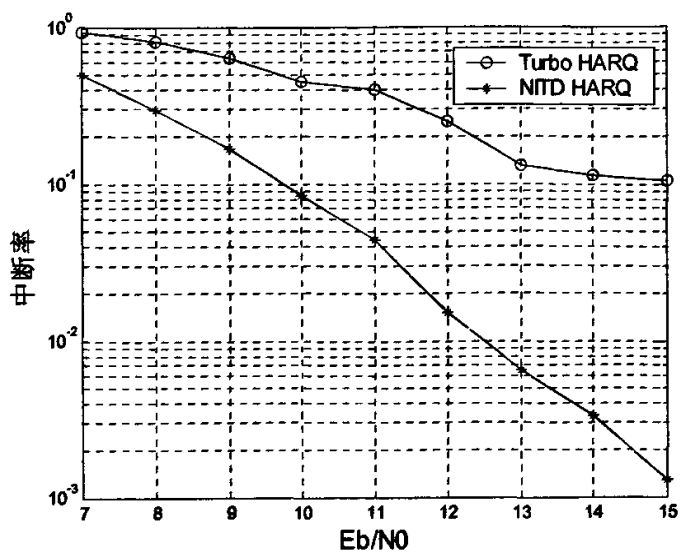


图 4.6 每包含 100 个帧, 重传门限为 1 的条件下, 本方法的机制和 Turbo 编码的混合自动重传请求机制的中断率性能比较

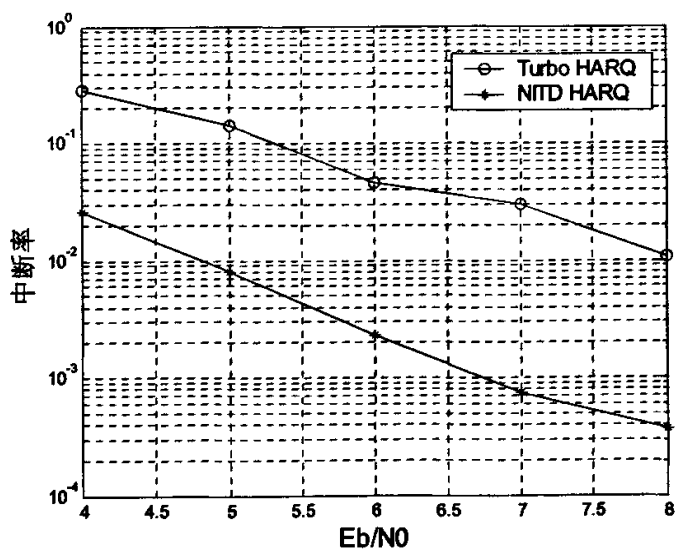


图 4.7 每包含 10 个帧, 重传门限为 2 的条件下, 本方法的机制和 Turbo 编码的混合自动重传请求机制的中断率性能比较

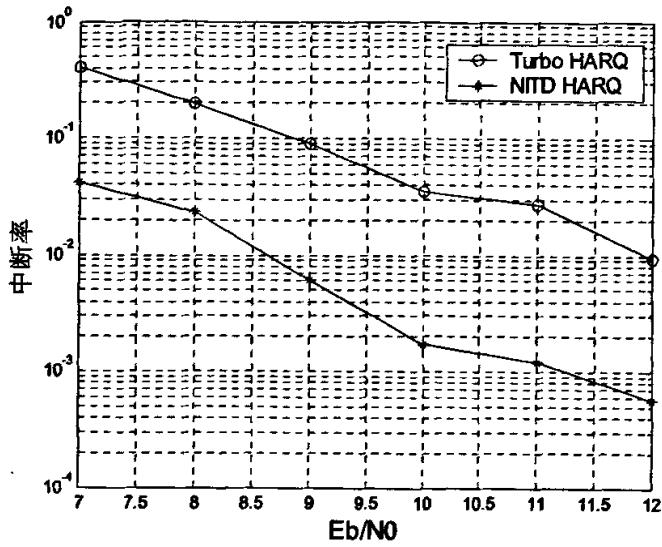


图 4.8 每包含 50 个帧，重传门限为 2 的条件下，本方法的机制和 Turbo 编码的混合自动重传请求机制的中断率性能比较

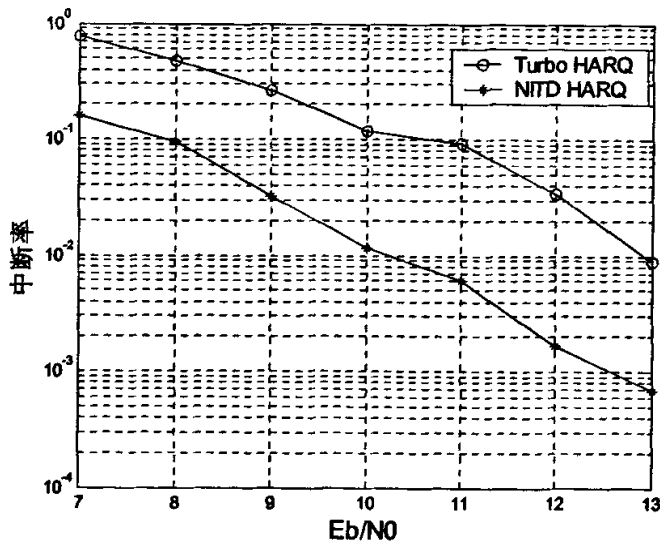


图 4.9 每包含 100 个帧，重传门限为 2 的条件下，本方法的机制和 Turbo 编码的混合自动重传请求机制的中断率性能比较

图 4.10 示出了传统的全递增冗余的 Type II HARQ 与本方法中重传门限为 1 重传门限为 2 情况下的平均步长的比较。平均步长定义为从开始传输数据帧到第一次传输中断时发送的平均数据帧数。平均步长越长，说明机制保持恒定传输

时延传输的可能性越高。从图中可以看出, NITD HARQ 重传门限为 2 的平均步长比重传门限为 1 的平均步长更长。 NITH HARQ 的平均步长比传统的全递增冗余的 Type II 的 HARQ 的平均步长更长。

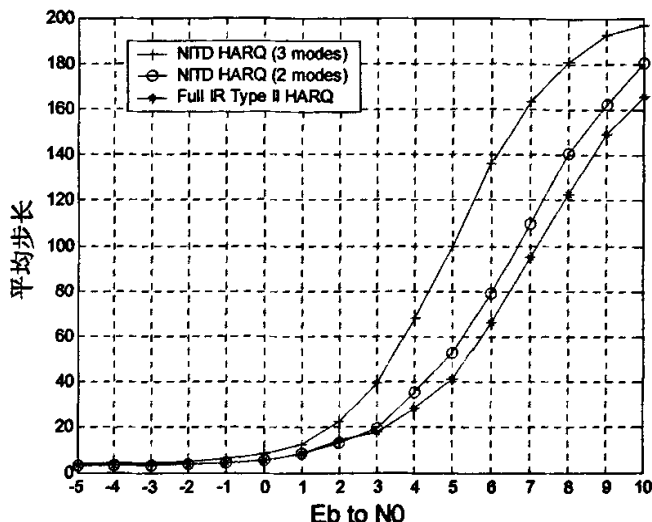


图 4.11 三种模式的平均步长的性能比较: 本方法所提出的重传门限为 1, 重传门限为 2 的模式和全 IR Type II 模式

根据上图, 可以说明本方法在恒定时延的传输上具有的优势, 平均步长说明的是在传输过程中保持完全恒定的传输时延的条件下传输的帧的个数。平均步长越长, 该方案保持恒定的传输时延传输的性能就越高。在图中, 重传门限为 3 的该方法具有最高的平均步长, 那么说明该方案的传输是最接近恒定传输时延的。

图 4.12 示出了传统的全递增冗余的 HARQ 与本方法中重传门限为 1 重传门限为 2 情况下的吞吐量的比较。吞吐量的定义为:

$$\text{吞吐量} = \frac{\text{正确传输的信息比特数}}{\text{总传输的比特数}}$$

本方法和传统的 HARQ 都采用的是 1/2 码率的 Turbo 码编码, 所以吞吐量最高都为 1/2。如图所示, 在信噪比低于 -2dB 的情况下, 传统的 HARQ 的吞吐量要高于本方法的机制, 但是当信噪比高于 -2dB 时, 本方法机制重传门限为 2 的吞吐量要高于传统的 HARQ。而重传门限为 1 的情况下吞吐量总比重传门限为 2 的情况差。

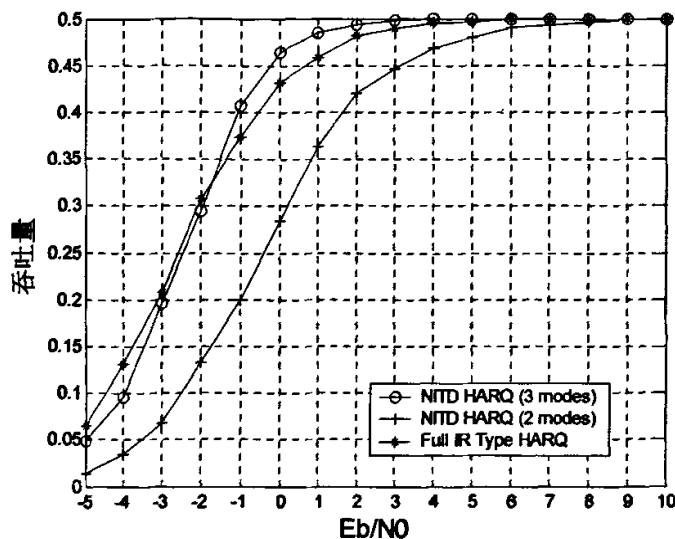


图 4.12 传统的全递增冗余的 HARQ 和本方法中重传门限为 1，重传门限为 2 吞吐量的性能比较

4.5 本章小结

本章提出了一种解决重传时延抖动的技术方案是：如果传输的数据帧不能正确解码，发射机将根据反馈信息将传输错误的数据和待传输的新数据按照设定的规定重新组成新数据帧发送。该方法在高信噪比的条件下保证每次传输的数据帧中始终可以包含固定长度的新信息，在低信噪的条件下也可以尽可能的降低重传得次数和中断率。我们用重传某一帧的次数是否超过传输门限来判断信道是否持续恶劣，当信道持续恶劣时，发送端采用传统 HARQ 方式，不再传输新数据只传输已传的错误帧信息。该方法在传统的自动重传请求的基础上在发送端和接收端采用了 RCPT（码率匹配截短 Turbo）[4][5][6]的编码器和解码器，我们可以根据需求调整新信息的编码速率来匹配不同的传输模式，充分利用了 RCPT 码的打孔特性和 ARQ 的重传性能以提高系统吞吐量。

4.6 参考文献

- [1] 杨大成等，“CDMA2000 1x 移动通信系统”，机械工业出版社，2003 年 1 月，第一版。
- [2] H. Holma and A. Toskala, WCDMA for UMTS, John Wiley & Sons, 2004.
- [3] 3GPP, Technical Specification Group Services and System Aspects, Qos Concept

- and Architecture (3G TR 23.107).
- [4] Third Generation Partnership Project (3GPP), "High speed downlink packet access (HSDPA): Overall Description," 3G TR TS 25.858 v5.0.0, December 2002.
 - [5] D. N. Rowitch and L. B. Milstein , "On the performance of hybrid FEC/ARQ systems using rate compatible punctured Turbo (RCPT) codes," IEEE Trans. Commun., vol. 48, no. 6, pp. 948 – 959, June 2000.
 - [6] R. Mantha and F. Ksch Ischang, "A capacity-approaching hybrid ARQ scheme using Turbo codes," IEEE Globecom'99, pp. 2341-2345, 1999.
 - [7] Gang Xie, Zhengya Yan, et al, "ARQ -BLAST system with adaptive error control," IEEE ISCIT 2005, pp. 840-843, Oct. 2005.

第五章一种具有混合编码器结构的自适应混合 ARQ

本章提出了一种具有混合编码器结构的自适应 HARQ 方案。该方案的基本原理是利用 Turbo 码是由两个卷积码编码器构成的特点,根据先前接收机反馈信息估计时变衰落信道当前状态选择不编码,可调速率的卷积码和可调速率的 Turbo 码作为前向纠错码。本方法只利用了一套 Turbo 编码器和译码器的资源,实现了卷积码和 Turbo 码联合作为前向纠错码的自适应 HARQ 系统,在保证系统性能的前提下,减小了硬件实现中所需的资源,节约了成本,而且本方法根据反馈信息选择不同打孔方式和不同编码方式,易于实现自适应编码。

5.1 技术背景

由于无线信道时变和高误码的特性,要求信道编码方式不仅具有较强的抗误码能力,而且能够自适应的调整码率来适应信道的变化。从 GSM 系统、基于 IS - 95 的窄带 CDMA 系统到 W-CDMA 系统,卷积编码做为一种有效的前向纠错码得到广泛的应用[1]。而 1993 年法国人 Berrou 等首次提出了 Turbo 码的概念以来,Turbo 码就以其接近 Shannon 极限的性能得到了众多专家的好评,成为近年来纠错码研究的一个重大突破。Turbo 码不仅具有低信噪比下的优异译码性能,还有很好的抗衰落和抗干扰能力,因此在移动通信信道编码上有很大的应用潜力,并且已经被 3GPP 正式采纳为 IMT-2000 高速数据通信的信道编码标准之一。Turbo 码的优异的性能和信道对自适应调整码率的需求,促使了两者的融合。A.S.Barbulescu 在文献[2]中提出了利用 Turbo 码代替卷积码实现码率可变的 RCPT(Rate Compatible Punctured Turbo)码,RCPT 码从 Turbo 码发展而来,继承了 Turbo 码优异的纠错能力,而且能够自适应调整码率,于是成为当前无线通信中的研究热点。

最新的 3G 系统已开始采用递增冗余(IR, incremental redundancy)型方法来实现物理层的差错控制。IR 方法是以重传递增的冗余回应接收端译码失败的重传请求。根据重传数据的构成,IR 可分为部分 IR 和全 IR 两种方法。部分 IR 方法中,重传数据由信息比特和新增加的冗余构成,收端将其与先前的接收数据合并成低码率码字,从而提高系统的纠错能力。全 IR 方法的重传数据则完全由递增冗余构成,因而每次接受到的数据结合后可构成更低码率的码字,最大程度地提高系统的性能。递增冗余的混合 II 型 ARQ 系统常用码率匹配打孔 Turbo 码(RCPT 码)或码率匹配打孔卷积码(RCPC 码)来实现。开始时,RCPT(或 RCPC)码的码率较高,递增的冗余依据信道条件的变化决定是否重传,逐渐减

低码率。

5.2 新方法的技术方案

5.2.1 基本的 RCPT-混合 II 型 ARQ 协议

目前基本的 RCPT-混合 II 型 ARQ 协议[3][4]如下:

- (1.) K 个信息比特首先进行 (N, K) 分组检错编码, 得到 N 个符号;
- (2.) N 长码字送往 $1/M$ RCPT 码编码器, 保存所有编码后的系统位/校验位;
- (3.) 初始化 l 的值 (如设 $l=1$);
- (4.) 发送 $a(l)$ 所对应的符号 (仅发送那些还未被发送的数据);
- (5.) 接收端对码率为 R_l 的接收序列进行 MAP 译码。在每次迭代译码的过程中:
 - a) 计算各个信息位的对数似然比值, 再进行硬判决;
 - b) 对 (N, K) 分组码进行校验;
 - c) 如果检验无错退出循环, 输出 K 比特信息, 发送 ACK 给发送端。否则, 继续迭代解码循环直到预设的最大迭代次数。如果此时检验仍旧有错, 退出循环并发送 NACK 给发端。
- (6.) 发送端收到 ACK 则返回步骤 (1);
- (7.) 发送端收到 NACK 则增加 l 的值, 并返回步骤 (4)。

如果已将所有的系统位、校验位的输出都发送 (即 $l=(M-1)P$ 、 $R_l=1/M$), 译码仍然有错, 我们允许系统返回步骤 (3), 此时接收端可清空它的缓存器, 或者保留原来接收到的值并采用分组合并的方法。这里我们假设 $N-K$ 校验比特足够检验出所有可能的帧错误。

5.2.2 新方法的创新方案

RCPT 码能够根据当前的信道状况删除部分比特来实现码率的可伸缩性 [4][5]。删除的比特在译码器端赋为 0, 送入 Turbo 码译码器进行译码。在 HARQ 机制中, 第一次传输的数据在接收端无法正确的译码, 在重传中发送在 RCPT 编码时被删除的校验比特, 重传的比特和原来接受的比特合并作为下一次译码的输入, 进行二次译码, 保证最后的译码结果优于最低要求, 有时候还需要多次重传才能达到要求。

在 HARQ 的 FEC 子系统中, 由于 RCPT 码的迭代译码算法延迟比较大, 而

卷积码纠错性能又无法满足日益提高的通信性能的要求。因此本方法提出一种具有混合编码器结构的自适应 HARQ 方案。这种新方案可以在保证系统性能的前提下,减小了硬件实现中所需的资源,节约了成本。而且本方法根据反馈信息选择不同打孔方式和不同编码方式,易于实现自适应编码。

新方法的基本原理如下:该方法根据时延敏感性采取两种不同的机制,如果针对时延敏感的系统,则本方法发送新帧以前 N 帧的平均步长发送,如果针对非时延敏感系统,则本方法发送新帧以未编码方式发送。发送采用本方法提出的混合编码器,该编码器可以支持未编码,卷积码和 Turbo 码,首先发送端以未编码方式发送,在接收端接收信号后先检测解调,解调输出的是软信息,因为首先采用的是未编码的系统,所以软信息可以直接判决,判决后的信息通过 CRC 检测,如检测无误,则发送 ACK,发送端继续发送新帧,如检测有误,则根据设定本方法所提出的混合编码器以卷积码方式编码,发送端以递增冗余的方式发送卷积编码后的部分校验位,接收端以 Turbo 码的串行迭代 MAP 译码器译码,但迭代次数设为 1,如果检测正确,则发送端发送新帧,如果检测有误,则发送端继续发送卷积码的校验位直到卷积码的校验位发送完毕,如仍然检测有误,则发送端本方法提出的混合编码器则实现 Turbo 码的编码,仍以递增冗余的方式发送 Turbo 码译码所需的另一路校验位,接收端以 Turbo 码的串行迭代 MAP 译码器译码,迭代次数设为 8 次。如果 Turbo 码的校验位发送完毕仍然无法正确译码,那么发送端以 HARQ Type III 的方式发送 1/2 的卷积码或 Turbo 码,如果仍然不能正确译码,那么发送方式以上述的递增冗余卷积码或 Turbo 码的方式发送。

本方法中无论是卷积码还是 Turbo 码都采用相同的 MAP 译码器[6][7],不同的是卷积码的译码不需要迭代, Turbo 码需要迭代译码。译码后的信息经过 CRC 检测,如无错就发送 ACK 通知发送方发送新信息,有错则发送 NACK 通知发送方,发送方发送冗余信息以提高纠错性能。

本方法的优势在于,发送端的编码方式多样,可以根据不同的信道自适应调整最合适的编码方式。接收端只有一套 Turbo 码的串行迭代 MAP 译码器,但同时实现了卷积码, Turbo 码的译码,在多编码的条件并没有提高系统的复杂度并提高了传统的卷积码 MAP 译码性能,并且减小了硬件实现中所需的资源,节约了成本。本方法所提出的这种 HARQ 机制可以应用于两种不同的环境,在时延敏感的系统可以利用反馈信道反馈的 ACK 与 NACK 信令调整编码方式,不需要额外的信道信息,同时降低了重传次数与时延;在时延不敏感的系统可以最大化吞吐量,减少冗余信息的传输。

5.3 新方法的具体实施方案

图 5.1 示出了本方法提出的具有混合编码器结构的自适应 HARQ 方案的系统框图。该方法系统以单天线为例,并且根据不同的要求有两种不同的机制,如果针对时延敏感的系统,则本方法发送新帧以前 N 帧的平均 step (该参数为编码方式参数,在后文中有详细介绍) 发送,如果针对非时延敏感系统,则本方法发送新帧以 step=1 的方式发送。

发送信号首先经过 CRC 编码。CRC 编码的数据再经过本方法提出的混合编码器,该编码器可以支持未编码,卷积码和 Turbo 码,首先发送端由 step 决定的编码方式进行编码,编码后的数据先存储在存储器中以备重传时使用,将发送数据经过调制后送往发射机,设定发送天线数和接收天线数都为 1,本系统也可以映射到多天线系统中,在本文就不介绍了。

接收端接收信号后先检测解调,解调输出的是软信息,软信息根据当前 step 的值选择相适应的解码方式,如果 step=1,采用的是未编码的系统,那么软信息可以直接判决;如果 step=2~4,采用的是卷积码的系统,那么软信息就进入 Turbo 码的串行迭代 MAP 译码器,迭代次数设为 1;如果 step=5~8,采用的是 Turbo 码系统,那么软信息就进入 Turbo 码的串行迭代 MAP 译码器,迭代次数设为 8。判决后的信息通过 CRC 检测,如检测无误,则发送 ACK,发送端继续发送新帧,如检测有误,则更新 step 值,向发送端发送 NACK 与更新后的 step 值,发送端根据更新后的 step 选择相对应的编码方式,并以递增冗余的方式发送编码后的部分校验位,接收端接收到部分校验位合并后以 Turbo 码的串行迭代 MAP 译码器译码,如果检测正确,则发送端发送新帧,如果检测有误,则发送端继续发送校验位直到该编码方式的校验位发送完毕,如仍然检测有误,则发送端本方法提出的混合编码器则更新后的 step 决定的编码,仍以递增冗余的方式发送校验位,接收端接收到这部分校验位合并后以 Turbo 码的串行迭代 MAP 译码器译码,迭代次数设为 8 次。如果所有的校验位发送完毕仍然无法正确译码,那么发送端以 HARQ Type III 的方式发送 1/2 的卷积码或 Turbo 码,如果仍然不能正确译码,那么发送方式以上述的递增冗余卷积码或 Turbo 码的方式发送。

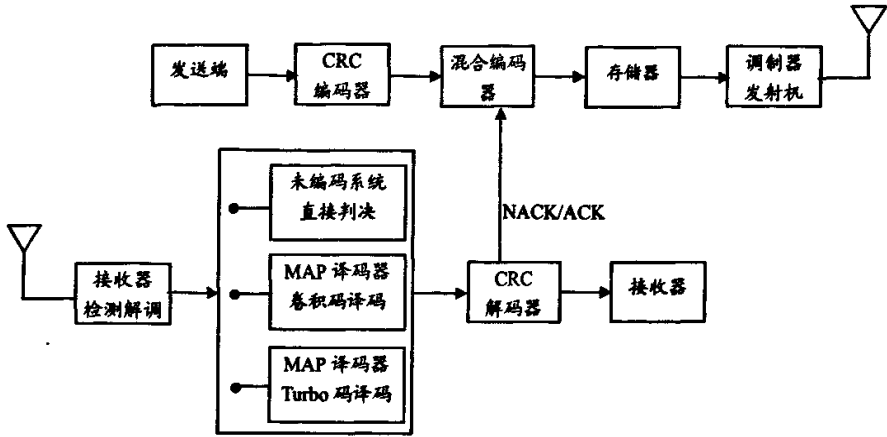


图 5.1 新方法提出的具有混合编码器结构的自适应 HARQ 方案的系统框图

图 5.2 示出了本方法提出的具有混合编码器结构的自适应 HARQ 方案中的混合编码器结构图。该混合编码器的结构类似 Turbo 码的结构[7]，但是编码的机制不同，可以同时支持未编码，卷积码和 Turbo 码。在本方法中，step 代表编码的方式，同时应用 step 来控制编码器的编码方式，step=1 表示未编码系统，

$\sum_{\alpha=1}^{\beta} \text{step } \alpha$ (if $\beta=2\sim4$) 表示卷积码系统， $\sum_{\alpha=1}^{\beta} \text{step } \alpha$ (if $\beta=5\sim8$) 表示 Turbo 码

系统。在发送新帧的时候，由当前的 step 控制编码方式，删除矩阵为

$P = \sum_{\alpha=1}^i \text{step } \alpha$ (step α 表示当前的 step 值)，如果 step=1，那么编码控制器则直接

控制 X_i 进入第一路，将 X_i 直接传递给复合器，实现未编码方式；如果 step=2~4，

那么编码控制器就控制 X_i 进入第一，第二路，在第二路实现递归系统卷积码编

码，编码后的卷积码在经过删除矩阵，删除矩阵根据 step 的要求进行不同码率的删除，实现 RCPC(Rate Compatible Punctured convolutional)码，然后将 X_i ，删

除后的第二路编码产生的校验位 Y_i 送入复合器，实现所需的卷积码方式；如果

step=5~8，那么编码控制器就控制 X_i 进入第一，第二，第三路，在第二路实现递

归系统卷积码编码，在第三路先进行交织后在实现递归系统卷积码编码，同样，编码后的校验位需要根据 step 的要求进行删除得到，这样三路数据 X_i, Y_i, Z_i 进入

复合器进行合并发送。

如果是重传的时候，编码控制器的控制方式是不同的。在重传时，step 是大

于 1 的, 所以不会出现未编码的方式。当 $\text{step}=2\sim 4$ 时, 编码控制器则控制 X_i 进入第二路递归系统卷积码编码, 然后将编码后的校验位按 step 的要求删除后送入复合器, 复合器将校验位 Y_i 送入发射机以递增冗余的方式发送; 当 $\text{step}=5\sim 8$ 时, 编码控制器则控制 X_i 进入第三路先交织在送入递归系统卷积码编码, 然后将编码后的校验位按 step 的要求删除后送入复合器, 复合器将校验位 Z_i 送入发射机以递增冗余的方式发送。这时混合编码器的工作方式不同是由于在重传的过程时, 接收端已经有了部分校验位, 那么发送方就不需要进行完整的编码了, 只需要根据 step 的控制完成相应的编码和删除就可以实现要求的编码方式, 卷积码或 Turbo 码。

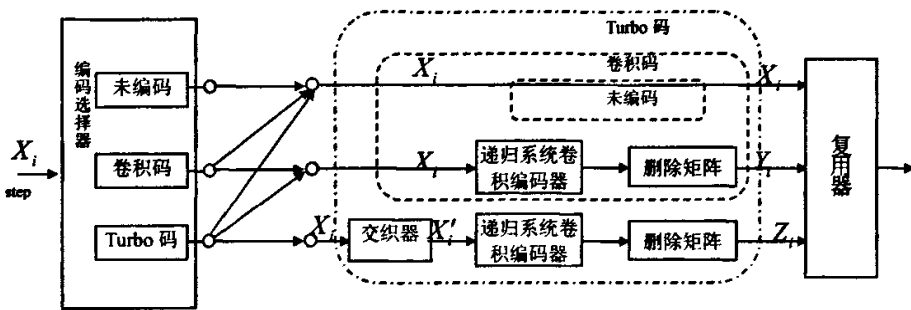


图 5.2 新方法提出的具有混合编码器结构的自适应 HARQ 方案中的混合编码器结构图

图 5.3 示出了具有混合编码器结构的自适应 HARQ 方案的流程图。该流程说明本方法的具体实施过程, 从流程开始, 发送端开始发送新数据, 系统判断是否属于时延敏感系统, 本方法对时延敏感和不敏感系统有不同的应对方式, 如果针对时延敏感系统, 那么发送新帧的 step 值设为前 N 帧的平均 step 值 (N 值设定为在一个多普勒频移中可以发送的帧数), 这样可以有效地调整当前帧的编码方式, 减少因重传引起的时延; 如果针对非时延敏感系统, 那么发送新帧是以 step 值设为 1, 即为未编码方式发送。发送端采用本方法提出的新的混合编码器, 该编码器可以支持未编码, 卷积码和 Turbo 码, 接收端接收信号后先检测解调, 解调输出的是软信息, 首先判断 step 值, 如果编码方式是未编码, 那么在未编码译码器中对解调后的软信息直接判决, 如果编码方式是卷积码, 那么在卷积译码器中对解调后的软信息进行 MAP 译码; 如果编码方式是 Turbo 编码, 那么在 Turbo 译码器中对解调后的软信息进行迭代 MAP 译码。译码后的数据通过 CRC 检测, 如检测无误, 则发送 ACK, 发送端重新开始继续发送新帧, 如检测有误, 则根据设定判断所有的校验比特是否都被重传 ($\text{step}<8$ 表示所有的校验比特

还没有重传完毕, 反之那么所有的校验比特都已经重传完毕了), 如果校验比特没有传输完, 那么就在就设定需要重传的校验比特, 以全递增冗余的方式进行重传, 在接收端合并重传的校验比特, 降低了码速率后可以提高码的纠错能力。如果校验比特已经传输完毕, 那么重传的方式变为以可以自解码的 Type III 的方式重传, 重传的信息包括信息位和校验位, 接收端将原始数据和重传的数据作 Chase 合并后再译码。

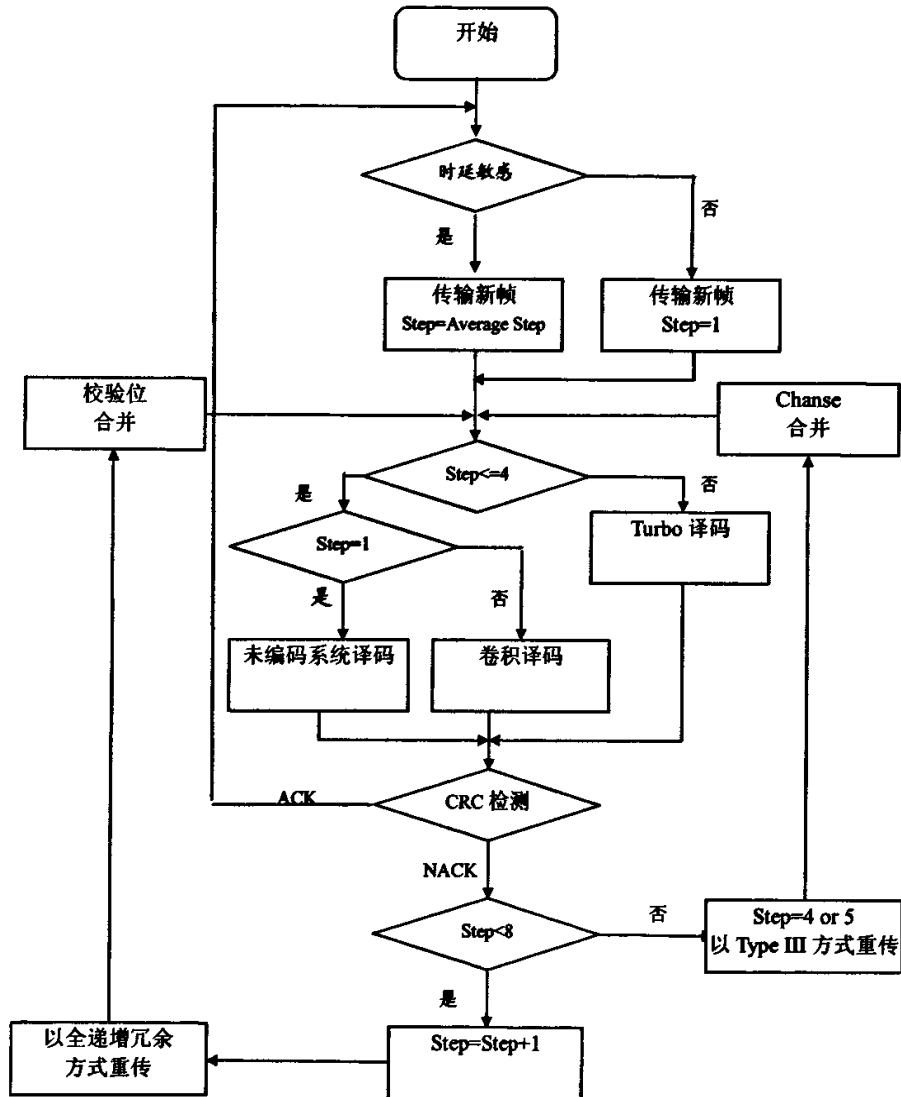


图 5.3 具有混合编码器结构的自适应 HARQ 方案的流程图

图 5.4 示出了本方法编码的冗余传输方式图。本方法所设置的冗余传输方式分为 8 个 step, 不同的 step 对应不同的编码方式和删除方式。图中的删除矩阵是以 3 个比特 X_i, Y_i, Z_i 为单位, X_i 对应信息比特, Y_i 对应第二路卷积码编码后的

校验位, Z_i 对应第三路交织后的卷积码编码后的校验位, 图中的删除矩阵是以 12 个比特 ($X_i, Y_i, Z_i, X_{i+1}, Y_{i+1}, Z_{i+1}, X_{i+2}, Y_{i+2}, Z_{i+2}, X_{i+3}, Y_{i+3}, Z_{i+3}$) 为周期, 1 代表保留该位, 0 代表删除该位。如图, $\text{step}=1$ 时表示保留 $X_i, X_{i+1}, X_{i+2}, X_{i+3}$, 映射为未编码系统, 不包含校验位, $\text{step}=2\sim4$ 时表示对混合编码器第二路的校验位进行删除和保留, $\text{step}=5\sim8$ 表示对混合编码器第三路的校验位进行删除和保留, 其对应的编码速率也如图所示。图中的冗余传输方式在发送新帧和重传是有区别的, 如果是传输新帧, 删除矩阵就是 $P = \sum_{\alpha=1}^i \text{step } \alpha$ ($\text{step } \alpha$ 表示当前的 step 值), 如 $\text{step}=3$ 时, 对应的删除矩阵为 (110110110100), 表示保留的是 $X_i, Y_i, X_{i+1}, Y_{i+1}, X_{i+2}, Y_{i+2}, X_{i+3}$, 即为 4/7 的卷积码; 如果是重传, 那么 step 控制编码器的方式如图 1 的说明, $\text{step}=2\sim4$, 只对第二路编码后的校验位进行删除, 接收端合并后实现了不同速率的卷积码, $\text{step}=5\sim8$, 对第三路编码后的校验位进行删除, 接收端合并后实现了不同速率的 Turbo 码。

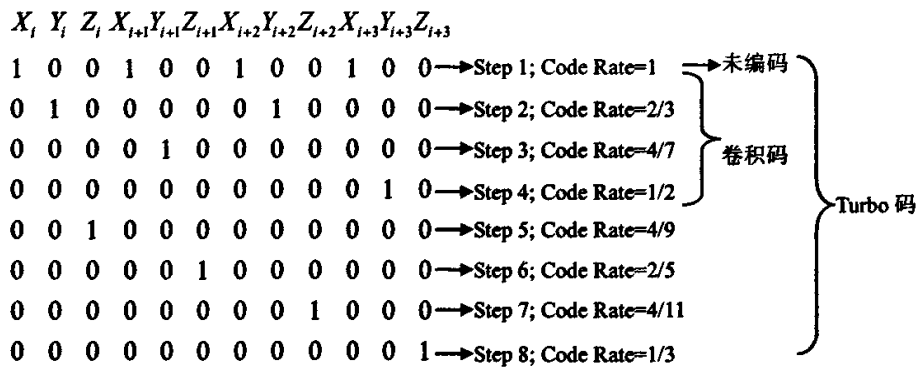


图 5.4 具有混合编码器结构的自适应 HARQ 方案的冗余传输方式图

5.4 新方法的仿真性能比较

为了证明本方法的性能优势, 本节将通过仿真和比较说明本方法的特性。仿真参数设定如下表:

表 1 仿真参数说明

模式	编码率	编码方式	信息 bit 数	码字长度
Step 1	1	未编码	256	256
Step 2	2/3	卷积码	256	384
Step 3	4/7	卷积码	256	448

Step 4	1/2	卷积码	256	512
Step 5	4/9	Turbo 码	256	576
Step 6	2/5	Turbo 码	256	640
Step 7	4/11	Turbo 码	256	704
Step 8	1/3	Turbo 码	256	768

仿真中采用了两种信道做比较, 分别是高斯白噪声信道和衰落信道。高斯白噪声信道中只是添加了高斯白噪声, 信道增益为 1; 衰落信道是根据 Clarke 模型建立的, 选择参数为多普勒频移为 90Hz, 载波频率为 900MHz。

图 5.5 示出了在 AWGN 信道中本方法和递增冗余 Turbo 码编码 HARQ[9] 的吞吐量的比较。图中 Turbo 码编码的递增冗余重传的系统是以 Turbo 码为系统编码, 重传方式和本方法的重传方式相同, 同时也包括时延敏感和非时延敏感的系统。因为 Turbo 码的迭代译码性能要好于卷积码, 所以在吞吐量要高于本方法所提出的方案。因为本方法应用于两种不同的系统: 时延敏感和非时延敏感系统。在时延敏感系统中, 传输新帧采用的传输方式是由当前的信道条件决定的, 减少了重传次数和时延, 但吞吐量比非时延敏感系统低; 在非时延敏感系统中, 传输新帧仍然采用未编码系统, 因此吞吐量比时延敏感系统高。在图中可以看出本方法在非时延敏感系统的吞吐量与传统的全递增冗余混合 ARQ 方案的吞吐量基本一致, 说明该方案相对全递增冗余混合 ARQ 并没有增加多余的冗余信息。

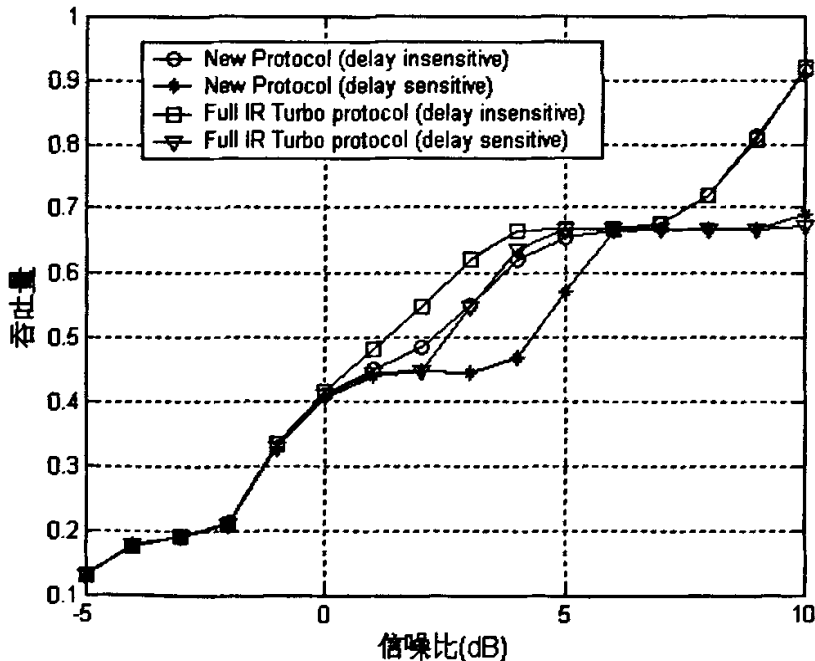


图 5.5 在 AWGN 信道中本方法和递增冗余 Turbo 码编码 HARQ 的吞吐量的比较

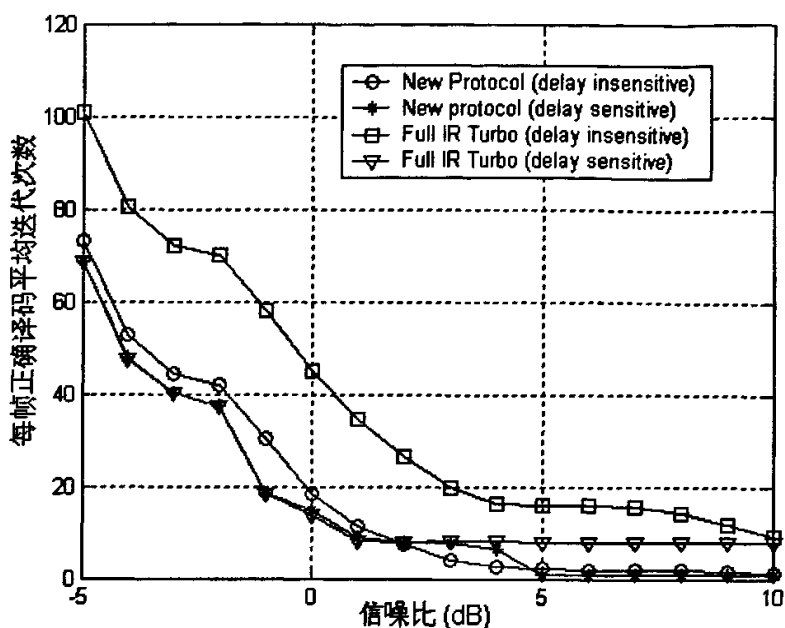


图 5.6 示出了在 AWGN 信道中本方法和递增冗余 Turbo 码编码 HARQ 的每帧平均迭代次数的比较。平均每帧迭代次数定义为平均正确传输一帧接收端需要迭代译码的次数。平均每帧迭代次数越少，译码时间与功耗越小，传输时延也越小。在图中可以看出，本方法所提出的方案迭代次数要远少于 Turbo 递增冗余重传的 HARQ 系统，而针对时延敏感系统的方案迭代次数也要低于非时延敏感系统。

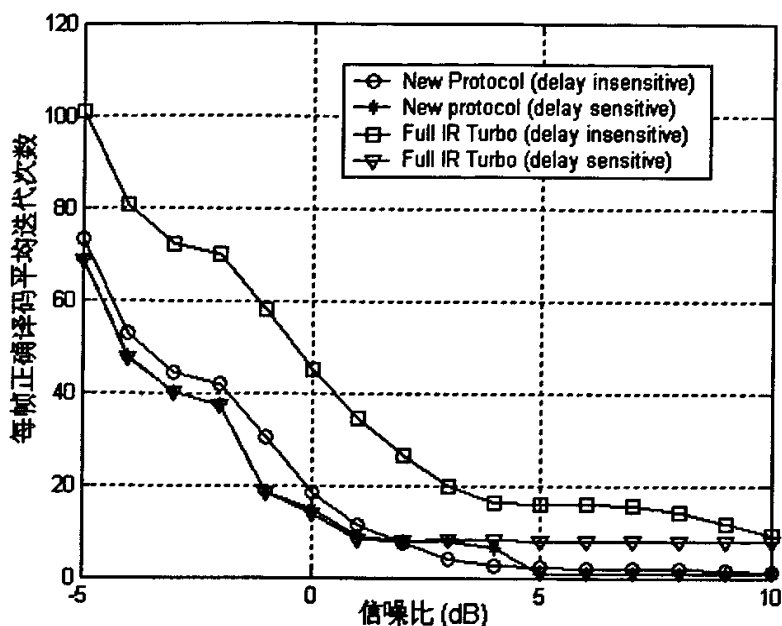


图 5.6 在 AWGN 信道中本方法和递增冗余 Turbo 码编码 HARQ 的每帧平均迭代次数的比较

图 5.7 在衰落信道中本方法和 Turbo 码编码的递增冗余重传 HARQ 的吞吐量的比较。图中显示 Turbo 码编码的递增冗余重传的系统吞吐量要高于本方法方案的吞吐量，同时也显示时延敏感系统的吞吐量要低于非时延敏感的系统。

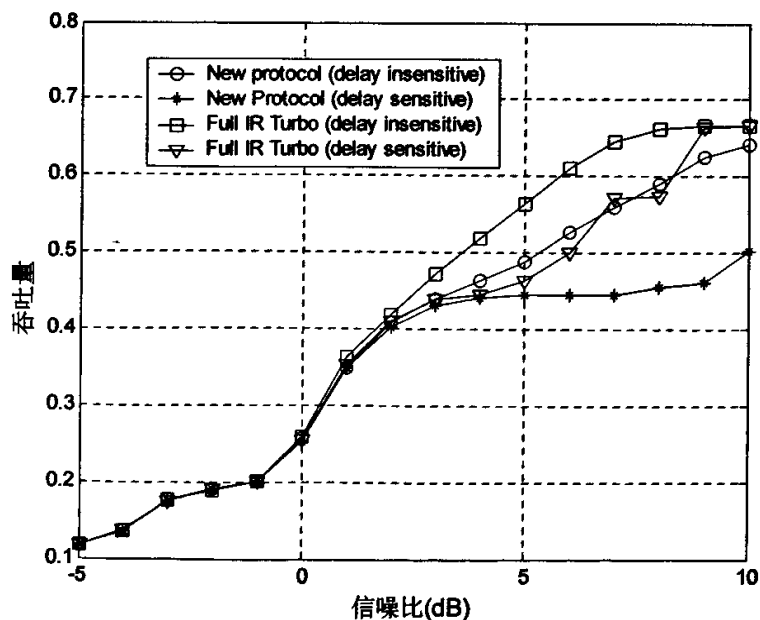


图 5.7 在衰落信道中本方法和递增冗余 Turbo 码编码 HARQ 的吞吐量的比较

图 5.8 在衰落信道中本方法和递增冗余 Turbo 码编码 HARQ 的每帧平均迭代次数的比较。图中显示本方法的方案的每帧平均迭代次数要小于 Turbo 码编码的递增冗余重传 HARQ 系统。同时时延敏感系统的每帧平均迭代次数要小于非时延敏感系统的每帧平均迭代次数。

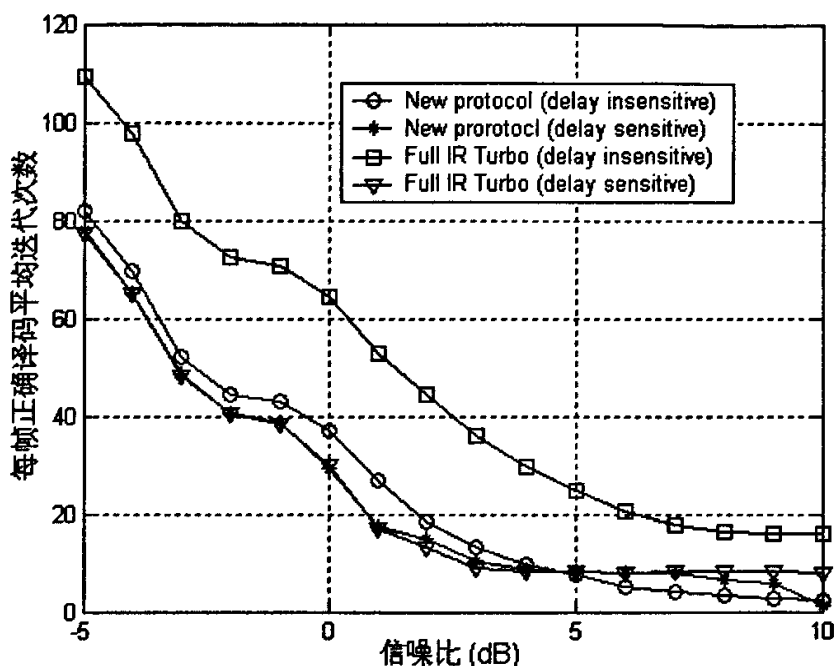


图 5.8 在衰落信道中本方法和递增冗余 Turbo 码编码 HARQ 的每帧平均迭代次数的比较

5.5 本章小结

本章提出一种具有混合编码器结构的自适应 HARQ 方案，新方案可以在保证系统性能的前提下，减小了硬件实现中所需的资源，节约了成本。而且该方法根据反馈信息选择不同打孔方式和不同编码方式，易于实现自适应编码。该方法根据时延敏感性采取两种不同的机制，如果针对时延敏感的系统，则该方法发送新帧以前 N 帧的平均步长发送，如果针对非时延敏感系统，则该方法发送新帧以未编码方式发送。发送首先以未编码方式发送，在接收端接收信号后先检测解调，解调输出的是软信息，因为首先采用的是未编码的系统，所以软信息可以直接判决，判决后的信息通过 CRC 检测，如检测无误，则发送 ACK，发送端继续发

送新帧,如检测有误,则根据设定本方法所提出的混合编码器以卷积码方式编码,发送端以递增冗余的方式发送卷积编码后的部分校验位,接收端以 Turbo 码的串行迭代 MAP 译码器译码,但迭代次数设为 1,如果检测正确,则发送端发送新帧,如果检测有误,则发送端继续发送卷积码的校验位直到卷积码的校验位发送完毕,如仍然检测有误,则发送端本方法提出的混合编码器则实现 Turbo 码的编码,仍以递增冗余的方式发送 Turbo 码译码所需的另一路校验位,接收端以 Turbo 码的串行迭代 MAP 译码器译码,迭代次数设为 8 次。如果 Turbo 码的校验位发送完毕仍然无法正确译码,那么发送端以 HARQ Type III 的方式发送 1/2 的卷积码或 Turbo 码,如果仍然不能正确译码,那么发送方式以上述的递增冗余卷积码或 Turbo 码的方式发送。通过仿真证明,本章提出的方案可以在保证系统性能的前提下,减小了硬件实现中所需的资源,节约了成本。而且本方法根据反馈信息选择不同打孔方式和不同编码方式,易于实现自适应编码。

5.6 参考文献

- [1] 张平等,“第三代蜂窝移动通信系统——WCDMA”,北京邮电大学出版社,2000 年 11 月,第一版。
- [2] 张忠培、王艺、周世东,“截断 Turbo 混合 ARQ 及衰落信道下的性能”,清华大学学报(自然科学版),2002 年第 42 卷第 7 期。
- [3] H.Bruneel and M.Moenclaey,“On the Throughput Performance of Some Continuous ARQ Strategies with Repeated TRansmissions”,IEEE Transactions on Communications, COM-34, No.3:244-249, March 1986
- [4] S.B.Wicker,“Adaptive Rate Error Control Through the Use of Diversity Combining and Majority Logic Decoding in a Hybrid-ARQ Protocol”,IEEE Transactions on Communications, Vol.39, No.3, pp.380-385, March 1991.
- [5] D.Chase,“Code Combining – A Maximum-Likelihood Decoding Approach for Combining an Arbitrary Number of Noisy Packets”,IEEE Transactions on Communications, COM-33, No.5, May 1985.
- [6] H.Krishna and S.D.Morgera,“A New Error Control Scheme for Hybrid ARQ Systems”,IEEE Transactions on Communications, COM-35, No.10, pp.981-989, October 1987.
- [7] S.kallel,“Analysis of a Type-II Hybrid-ARQ Scheme with Code Combining”,IEEE Trans. on Communications, COM-38, No.8, pp.1133-1137, August 1990.
- [8] D.N.Rowitch and L.B.Milstein,“Rate Compatible Punctured Turbo(RCPT) Codes in a Hybrid FEC/ARQ System”,in Proc. Communications Theory Mini-Conf.ofGLOBECOM'97, Phoenix, AZ, Nov 1997, pp.55-59.
- [9] 杨鸿文,肖璇,郭文彬,杨大成,一种基于ACK 的AMC/HARQ 算法,北京邮电大学学报,2004.04

第六章 结束语

通过本次硕士论文研究工作,我对下一代移动通信系统的原理,特别是混合 ARQ 技术和信道编码部分有了深刻的理解和体会,对现行的 ARQ 机制和在未来移动通信中的应用,对于 Turbo 码的原理和实现也有了更深一步的认识。同时,在 C、Matlab 语言编程方面积累了更多的经验。

本文介绍了传统的 ARQ 中的等停,选择性重传,回退 N 步 ARQ 机制,介绍了 I 型, II 型和 III 型 ARQ 机制。介绍了 V-BLAST 系统中基于 Turbo 码的混合自动重传请求 I 型, II 型和 III 型的性能比较。本文还提出了一种接近恒定传输时延的混合自动重传请求,该方法结合了 V-BLAST 系统和 RCPT 码的特性,可以达到减少因为重传产生的时延。本文还提出一种具有混合编码器结构的混合自动重传请求,该方案采用 RCPT 码的特性,在只采用一个编码器的条件下实现卷积码,卷积码和 Turbo 码三种不同的编码方式,而接收端只采用一个译码器就实现了译码。该方法可以减少硬件的损耗和功耗,也可以实现自适应编码。

由于时间和精力的有限,对于混合 ARQ 技术的研究还有许多需要进一步完善和改进的地方。主要包括以下几个方面:

1. 第二章里,作者曾经提到过混合 III 型 ARQ,并初步指明这种类型的混合 ARQ 技术适用于存在深衰落的信道。本文未对它进行具体分析,下一步,我们可以对它进行适当地研究和讨论。
2. 就第三章的 V-BLAST 系统下基于 Turbo 码的混合 ARQ 而言,我们分析了该系统下的 I 型, II 型和 III 型 ARQ 的性能差距。但如何更好的利用 BLAST 系统的特性,它还有进一步研究的余地。
3. 第四章里,我们提出了一种新的接近恒定传输时延的 ARQ 方案,本文只给出了方案在物理层的性能仿真和分析,对于该方案在网络层和协议层的性能仿真和分析都有待进一步地仿真分析,从而进一步完善我们的结论。
4. 第五章里,我们提出了一种具有混合编码器结构的混合 ARQ 方案,本文只给出了该方案通过仿真的性能比较,对于他在硬件上的性能分析还有待进一步的研究。
5. 目前在对混合 ARQ 技术的研究中,还有一类重要的方法就是考虑调制技术在混合 ARQ 系统中的作用。具体的实现办法有重传时改变调制方式或调制时的映射对应关系,自适应调制和编码等。特别是自适应编码和调制,可以想象它将比单纯的改进编解码方式提供更多的灵活性和研究空间,是下一步研究的重点。

致 谢

岁月如梭，两年的研究生生活即将逝去。在论文即将完成之际，我深深地感到自己所取的每一点成绩都是与老师、同学和家人的支持和帮助是分不开的，在此向他们致以最诚挚的谢意！

首先，衷心感谢恩师唐碧华教授。两年多来，我从论文选题到方案论证都得到了唐老师的耐心指点和精心帮助。唐老师广博而扎实的学识、敏锐的洞察力、精益求精的治学态度、兢兢业业的工作作风、求实创新的开拓精神让我无限钦佩。在唐老师的悉心指导、言传身教之下，我不仅在理论知识和实践经验方面得到了提高，而且开拓了眼界与思路，培养起了较系统的思维和工作方法，锻炼了独立进行科研的能力。

对于刘元安，高景春教授给予我的指导、关心和帮助深表感谢。特别感谢罗振东博士、刘隽诗博士、谢刚博士、赵毅博士，刘凯明博士等在课题研究期间给与我的关怀和大力帮助。感谢实验室的刘思扬、王亚琛、李非非、张然然，陈佳锐等同学，与他们在一起讨论学术、互相帮助的经历是令人难忘的。

最后，衷心感谢我的父母和家人，感谢他们对我多年地培养与照顾。正是他们对我的关心和鼓励，给了我克服困难的勇气和力量。

攻读硕士学位期间参与发表的论文及参与申请的专利

- [1] 严振亚, 一种新的交替卷积码/Turbo 码编码的 HARQ 系统, 2006 年北京地区研究生学术交流会——信息与通信技术, 2006. 10
- [2] 谢刚, 严振亚, ARQ-BLAST system with adaptive error control, IEEE ISCIT 2005, pp. 840-843, Oct. 2005.
- [3] 谢刚, 严振亚, 一种接近恒定传输时延的 HARQ 系统
- [4] 谢刚, 严振亚, 一种具有混合编码器结构的自适应 HARQ 系统