

摘 要

由于无线信道的时变性和多径传输特性及各种噪声的干扰而导致无线通信系统具有较高的误码率。因此,有效的差错控制技术是无线通信中的一个关键问题。ARQ 技术是无线通信中实现数据高速可靠传输的最有效手段之一。3GPP 已把它作为第三代无线移动通信后期高速数据传输的关键技术之一。本文正是在此背景下研究了表征 ARQ 系统效率的时延性能指标。

本文通过构建基于基本 ARQ 的三模式自适应 ARQ 系统来提高 ARQ 系统的数据传输效率,并以此来克服基本 ARQ 系统的系统时延随着信道误差率的增大而迅速增长,系统吞吐量也随之急剧下降的缺点。首先简单介绍了 ARQ 技术的研究现状和最新发展,并对基本的 ARQ 协议的传输原理做了分析研究;其次建立了基于时变信道的自适应三模式多状态自动重传请求系统(TMGBN-ARQ)。系统中依据连续收到的应答帧 ACK 或 NAK 的个数对信道噪声状况进行估计,当信道噪声较低时用 SGBN-ARQ 模式,信道噪声较高时用 n copy GBN-ARQ 模式,信道噪声很高时用 CGBN-ARQ 模式;在考虑实际重传次数受限的情况下,建立了准确描述系统传输机制和原理的 Markov 模型,获得了以信道错误率表示的稳态概率和不同状态下分组发送次数的条件概率,求得了系统更加准确的时延解析式;在 MATLAB 环境下,对 TMGBN-ARQ 系统的时延性能进行了仿真分析。最后构建了重传次数有限的自适应 SW-ARQ 系统。系统中采用了自适应帧长技术,根据连续收到的应答帧 ACK 或 NAK 的个数将信道噪声状况区分为低、高和很高三种状态,并考虑在不同状态下发送不同帧长的数据帧,在信道噪声低的状态下发送帧长较长的数据帧,当信道噪声较高时发送帧长较短的数据帧,在信道噪声很高时发送帧长很短的数据帧。并对自适应 SW-ARQ 系统的时延性能做了数值模拟分析。通过理论与仿真分析都表明自适应 ARQ 系统较为有效的提高网络性能,能够提供较小的系统服务时延,尤其是在信道错误率较大的情况下更为明显。由于文中考虑了实际通信中数据帧的重传次数是受限的,这样更加贴近实际。且系统的物理实现也较为简单,应用于实际工程有一定的可行性。

关键词:自动重传请求 (ARQ); 信道噪声状况; TMGBN-ARQ; Markov 模型; 自适应帧长技术

Abstract

Wireless communication systems have a high error rate due to the time-varying nature and multi-path transmission characteristics of the wireless channel and a variety of noise interference. Therefore, effective error control technology is a key issue in wireless communication. ARQ (Automatic Repeat reQuest) is one of the most effective techniques to realize reliable packet data transmission for wireless communication. Recently, 3GPP has proposed it as one of the most pivotal techniques for the high speed packet transmission. For that this paper mainly refer to the delay performance which is one of the most important ARQ system efficiency indicators.

In order to improve the data transmission performance of the ARQ system, an adaptive three-mode ARQ system was constructed and the defect of the basic ARQ that it would quickly increase system time-delay when the channel packet error rate increased has been overcome effectively by the adaptive ARQ system. Firstly, research actuality and future progress of ARQ are introduced, the transmission principle of the basic ARQ was analysed. Secondly, an adaptive several-state TMGBN-ARQ (three-mode automatic-repeat-request) system was constructed in time-varying channel. In this scheme, channel state estimation is based on counting the contiguous ACK or NAK acknowledgements. When the noise level is low SGBN-ARQ is used, in the case of the high noise level the n copy GBN-ARQ is used, and if the noise level is very high CGBN-ARQ will be applied. Considering the limitation of retransmission in engineering, the Markov model to describe the system transmission mechanism and principle precisely was set up, and it was obtained the steady-state probability described by the channel error rate and the conditional probability of the times of packet sent. Furthermore, the more precise analytical model of system delay was obtained. The delay performance of the ARQ was simulated and analyzed by the MATLAB. Finally, a finite retransmission adaptive SW-ARQ system was built. The technology of adaptive frame size is used in the system, channel noise state is divided into low, high and very high based on counting the contiguous ACK or NAK acknowledgements. Taking into consideration of different size frame is transmitted in different states, when the noise level is low big size frame is transmitted, in the case of high noise level small size frame is transmitted, and if the noise level is very high more small size frame is transmitted. The delay performance of adaptive SW-ARQ system

was simulated and analyzed. Theoretical analysis and simulation studies show that the performance of wireless network is improved by adaptive ARQ system. The adaptive ARQ system can provide a small service delay, especially for the higher packet error rate. Taking into consideration of retransmission is finite in communication, so its closer to the actual. This system is of lower physical complexity and has a fine feasibility in engineering.

Key Words: ARQ; Channel noise state estimation; TMGBN-ARQ; Markov model; Adaptive frame-size

插图索引

图 1.1 无线通信网的组织结构	1
图 1.2 无线通信系统框图	2
图 1.3 FEC 系统基本组成图	8
图 2.1 ARQ 系统基本组成	15
图 2.2 ARQ 帧结构	16
图 2.3 无接收序号时 SW-ARQ 的工作过程	16
图 2.4 SW-ARQ 协议传输原理	17
图 2.5 SW-ARQ 协议中数据帧和确认帧的发送时间关系	18
图 2.6 SGBN-ARQ 协议传输原理	20
图 2.7 GBN-ARQ 的分组传送过程	21
图 2.8 信道利用率与数据长度的关系	24
图 2.9 nGBN-ARQ 协议传输原理	24
图 2.10 SR-ARQ 协议传输原理	25
图 2.11 ARPANET ARQ	27
图 2.12 混合 I 型 ARQ 协议的传输原理	28
图 2.13 混合 II 型 ARQ 协议传输原理	28
图 3.1 TMGBN-ARQ 系统传输原理	32
图 3.2 TMGBN-ARQ 系统状态转移图	33
图 3.3 不同的 α 、 β 、 γ 和 δ 对 TMGBN-ARQ 系统时延的影响	36
图 3.4 不同的 n 对 TMGBN-ARQ 系统时延的影响	36
图 3.5 不同的 T_1 、 T_2 和 T_3 对 TMGBN-ARQ 系统时延的影响	37
图 4.1 自适应 SW-ARQ 系统的状态转移图	40
图 4.2 不同的 α 、 β 、 γ 和 δ 对自适应 SW-ARQ 系统时延的影响	43
图 4.3 不同的 n 对自适应 SW-ARQ 系统时延的影响	43

兰州理工大学学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：所提交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：卢世军

日期：2009年5月30日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：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电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权兰州理工大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并通过网络向社会公众提供信息服务。

作者签名：卢世军

日期：2009年5月30日

导师签名：张锁平

日期：2009年5月30日

第 1 章 绪论

无线通信是当今通信领域内最为活跃和发展最为迅速的领域之一。无线通信技术的飞速发展，使得人们对通信的需求也随之不断提高，希望打破不同的地域或客观条件的制约，能够实现“任何人（Whoever）在任何时候（Whenever）任何地方（Wherever）与任何人（Whomever）进行任何方式（Whatever）的通信”的目标。然而，无线信道受多径效应、多普勒频移、阴影衰落及各种噪声的干扰而导致系统具有较高的误码率。因此，需要有效的差错控制技术来实现无线通信中数据传输的可靠性和有效性。自动重传请求（ARQ）技术无线通信中实现数据高速可靠传输的最有效手段之一。3GPP 已把它作为第三代无线移动通信后期高速数据传输的关键技术之一。因而，有效的 ARQ 技术及其应用日益成为通信领域致力研究的课题。

1.1 无线通信概述

现代无线通信始于 19 世纪末。1873 年，麦克斯韦提出电磁波辐射理论，奠定了无线通信的理论基础；1897 年 5 月 18 日，马可尼进行横跨布里斯托尔海峡的无线电通信试验取得成功，标志这无线电的诞生；1901 年，马可尼实现了隔着大西洋的无线电通信。从 20 世纪初以来巨大的市场需求、理论界的一次次跨越、微电子和半导体器件的进步，使无线通信技术日益成熟并得到飞速发展，无线通信进入了崭新的时代。

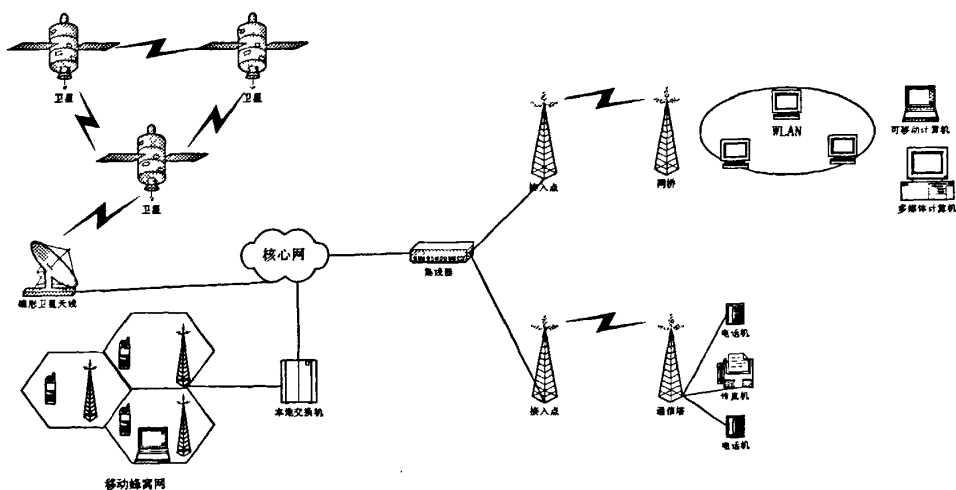


图 1.1 无线通信网的组织结构

20 世纪 80 年代以后，随着集成电路技术和微处理器的成熟，蜂窝系统的提出

以及无线接入技术的进展，商用的无线移动通信系统时代到来。先后经历了第一代模拟移动通信（1G）、第二代数字蜂窝移动通信（2G）、第三代宽带多媒体移动通信（3G），以及现在方兴未艾的第四代移动通信技术（4G）的大发展。

1.1.1 无线通信系统的组成

通信就是将信息从发送端传送到接收端的过程。通信系统可以看成是由发信设备、传输介质和收信设备三部分组成。其中，发信设备将原始的信源转换成适合在给定传输介质上传输的信号，其中包括放大、滤波、调制、编码等处理过程；收信设备完成相逆的功能，包括译码、解调、变换、放大等，将收到的信号还原成原来的信息送至接收端。传输介质也称为信道，在信道中还常常会引入干扰和噪声，而造成通信质量的下降。

无线通信系统，则是利用空间电磁波做为传输介质，在空中传递信号。在发信设备与收信设备上需要安装天线，完成电磁波的辐射与接收。如图 1.2 为无线通信系统的构成框图。由于原始的信息如语音、数据、图像等都是频率比较低的信号，例如音频信号在 300Hz~3400Hz，视频信号不超过 6MHz。这样的信号不利于天线的辐射和电磁波的传播，因此发信设备要将低频信息加载到高频载波信号上，这个过程叫做调制；频率变换器进一步将信号变换成发射电波所需要的频率（如短波频率、微波频率等），经过功率放大，再经过天线辐射出去进行传输。在接收设备中也要经过信号放大、频率变换，最后通过解调的过程再将原始信息恢复出来，从而完成无线通信的过程。

采用多路复用技术可以在一个传输信道上传送多个信号，提高信道的利用率。常用的多路复用技术有时分复用（TDM）、频分复用（FDM）、码分复用（CDM）等。如果多个信号产生于不同的地点，则称为多址技术，相应的有时分多址（TDMA）、频分多址（FDMA）和码分多址（CDMA）。这两种技术都被广泛的应用于无线通信中。



图 1.2 无线通信系统框图

1.1.2 无线通信的信道特点

无线通信信道的复杂性是造成无线通信系统复杂性的主要原因，综合来说，无线信道具有以下特点：

1、传播的开放性。无线信道完全不同于有线通信基于全封闭的传输线来实现信息传输，后者电磁波在约束的均匀介质中传播，数学模型是确定的。无线通信是基于电磁波在空间的传播来实现开放式的信息传输，路径的空间约束性差，不

确定因素多,呈现出多种不同形式的信道损伤,特别是多径时延扩展、多普勒频移、小区内干扰、衰落及周围环境的噪声等。

2、接收地理环境的复杂性和多样性。包括不同的地形、地貌、建筑、气候以及电磁干扰等情况。

3、用户的移动性。某些通信用户具有随机的移动性,如漫步移动用户,高速的车载台等。

这些原因都造成了无线信道的多样性与时变性。使得无线通信传输信息具有较高的错误率。因此,有效的差错控制技术是无线通信的一个关键问题。

1.1.3 现有无线系统

本节将对目前正在运行的各种无线系统进行概述。我们将看到,现有系统离人们对无线通信的要求还有一定的距离,尚有许多关键技术问题需要解决。这些系统的具体设计还在不断演进中,不断有新的系统出现、旧的系统退出。

1.1.3.1 蜂窝电话系统

第一代蜂窝系统是模拟的,它们基本上是在数字通信还未普及的 20 世纪 60 年代所设计的。由于数字技术的诸多优点,第二代蜂窝系统转向数字设计。数字电路的器件价格便宜、处理速度快、体积小、耗电也少。数字通信中可以采用纠错编码及信号处理技术提高话音质量。依靠高频谱效率的数字调制技术及高效的频谱共享技术,数字系统可以有更大的容量。数字系统可以采用先进的压缩技术并能利用话音激活因子。数字系统可以应用加密技术来防止窃听。数字系统还能提供除话音之外的其他数据业务,包括短消息、电子邮件、互联网接入和图像服务(如可拍照手机)。

1.1.3.2 无绳电话系统

无绳电话自 20 世纪 70 年代后期出现以来发展迅速。无绳电话的原设计目的是提供一种低成本、低移动性的无线连接公众电话交换网(PSTN)方式,即用无线连接来替代电话机机座和手持电话这两部分之间的那个绳。在欧洲和亚洲,第二代数字无绳电话系统(cordless telephone,second generation,CT-2)把覆盖范围扩展到了室外。无绳电话的另一个演进是欧洲的 DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications),它主要是针对办公楼设计的。

1.1.3.3 无线局域网

当用户在一个较小区域,如校园或不大的建筑物内移动时,无线局域网能提供高速数据传输。接入无线局域网的无线设备通常都是静止的或是慢速移动的。无线局域网即可以采用星型结构,也可以采用对等网络结构(P2P, peer to peer)。

在星型结构中,无线终端连接到覆盖区中的无线接入点或集线器,P2P 结构中无线终端以在组织方式组网。

20 世纪 90 年代初,由于人们对无线高速数据业务有着“压抑已久的渴望”,无线局域网公司和产品不断涌现。第一代无线局域网是专网性质的,协议互不兼容,大多工作在 900MHz ISM 频段内的 26MHz 宽带上,采用直序扩频技术,数据速率大约是 1Mbit~2Mbit/s,既有星型结构又有 P2P 结构。第一代无线局域网中,工作在 900MHz 频段之外的只有摩托罗拉的 Altair,它的工作频率是 18GHz 的授权频段。Altair 的数据速率大约是 6Mbits/s。18GHz 上的器件成本及路径损耗都很高,这使 Altair 的性能大受影响,它在问世几年之后就消失了。

美国的第二代无线局域网工作在 2.4GHz 的 ISM 频段上,占用 83.5MHz 的带宽。为了避免第一代无线局域网中出现过的不兼容问题,IEEE 专门制定了相应的无线局域网标准,即 IEEE802.11b 标准。802.11b 采用直序扩频技术,数据速率大约是 1.6Mbit/s (11Mbit 的原数据速率),覆盖范围约为 100m。网络多数是星型结构,也有少数是 P2P 结构。很多公司开发了基于 802.11b 的无线局域网产品。经过初期的缓慢增长后,基于 802.11b 的产品现在已经比较流行。许多笔记本电脑都已集成了 802.11b 无线网卡。许多公司和大学都建立了 802.11b 基站,许多咖啡厅、机场、酒店提供免费的无线局域网接入。

为了提供比 802.11b 更高的数据速率,802.11 系列中又新开发了两个标准:802.11a 和 802.11g。802.11a 工作在 5GHz 的 U-NII 频段上,占用带宽 300MHz,它通过多载波调制技术能在 30m 的覆盖范围内提供 54Mbit/s 的数据速率。802.11a 占用更宽的带宽,所以拥有更多的信道数,可支持更多的高速用户。起初人们还担心 802.11a 会比 802.11b 贵很多,但很快就发现 802.11a 的价格也相当有竞争力。802.11g 的设计与数据速率和 802.11a 相同,只是工作频段在 2.4GHz,覆盖范围是 50m。出于兼容性的考虑,许多无线网卡和接入点同时支持这 3 种标准。

无线局域网在欧洲的发展一直围绕着 HIPERLAN (high-performance radio LAN) 进行。HIPERLAN/2 标准和 IEEE802.11a 无线局域网标准很相似。两者的链路层设计很想像,HIPERLAN/2 也工作在 5GHz 的频段上,类似于 U-NII 频段。它的最大数据速率及覆盖范围也和 802.11a 一样,分别是 54Mbit/s 及 30m。它和 802.11a 在接入层协议及服务质量 (Quality-of-Service, QoS) 支持上有所不同。

1.1.3.4 广域无线数据业务

广域无线数据业务为高移动性的用户在广大的覆盖范围内提供无线数据传输。这些系统通过一个架设在高塔、屋顶或山顶之上的基站为特定的地理区域提供服务。这些基站即可以和有线骨干网相连,也可以形成一个多跳的无线自组织网络。

最初的广域无线数据业务提供的数据速率非常低，还不到 10kbit/s,之后逐渐增加到 20kbit/s。这项业务有两个主要提供商：Motient 和 Bell South Mobile Data（前身是 RAM Mobile Data）。Metricom 也提供相似的业务，但它用大量低成本小型基站覆盖整个服务区，每个基站只覆盖一个较小的范围。减小基站覆盖区提高了频谱效率。这使 Metricom 提供的数据速率可达 76kbit/s，大大超过了其他广域无线数据系统。然而，高昂的基础设施成本最终导致 Metricom 公司破产，系统也随之停止运行。部分基础设施被收购后以品牌 Ricochet 在少数地区运行。

CDPD（cellular digital packet data）系统是叠加在模拟蜂窝网上的一种广域无线数据业务。由于蜂窝系统快速增长，许多模拟蜂窝系统的话音信道处于空闲状态，因此 CDPD 可以共享这些 FDMA 话音信道。CDPD 业务能在全美范围内提供 19.2kbit/s 的分组数据传输。不过由于新一代蜂窝系统也能提供数据业务，传输速率甚至更高，因此 CDPD 几乎被完全替代。

除上述系统外，还新出现了一些能提供宽带接入的系统。总的来看，广域无线数据业务并不是很成功。

1.1.3.5 宽带无线接入

宽带无线接入可以在一个固定的接入点和若干终端之间提供高速无线通信。此类系统起初的设计目的是用来支持交互式家庭视频业务，后来业务的重点很快转移到高速（数十兆比特每秒）互联网接入及其他家庭或企业的高速数据网。

WiMax 是基于 IEEE802.16 的一种新的宽带无线技术。802.16 是一个宽带无线接入标准，工作在 2GHz~11GHz 的非视距传播条件，以及 10GHz~66GHz 视距传播条件。其数据速率对于固定用户约为 40Mbit/s，对于移动用户约为 15Mbit/s，覆盖范围可达几千米。WiMax 的竞争对手是无线局域网、3G 蜂窝系统，也可能包括有线业务，如有线电视和数字用户线路（digital subscriber line, DSL）。WiMax 能否和这些系统竞争甚至替代它们将取决于它的性能和成本，这一切还是未知数。

1.1.3.6 寻呼系统

寻呼以非常高的功率（几百瓦甚至上千瓦）从多个基站或卫星上同时广播简短的寻呼消息。采用陆地发射机的系统可以覆盖一个特定的地理区域，例如一个城市；采用 GEO 同步卫星进行发射的系统可以覆盖一个国家乃至全球。寻呼消息是广播发送到整个覆盖区域的，所以不需要位置管理和路由功能。寻呼系统的发射机功率很高、复杂度也相对较高，从而使接收机可以做到复杂度低、耗电小和体积小，用一个轻便的电池就可以有很长的待机时间。此外高发送功率也使得寻呼信号很容易穿透建筑物的墙壁。寻呼业务不论是购机费还是月使用费，都要比蜂窝电话便宜，不过近年来这种价格优势在不断消失，因为蜂窝电话的价格在不断下降。寻呼系统的主要优势是低廉的价格、小而轻便的寻呼机、电池工作时

间长、寻呼设备不受室内室外的限制。

1.1.3.7 卫星通信网

民用卫星通信是无线通信中的又一个重要分支，采用 GEO 卫星的系统有 Inmarsat 和 OmniTRACS。Inmarsat 主要用于偏远地区的模拟话音传输，例如新闻记者可以利用 Inmarsat 对战区进行实况报道。第一代 Inmarsat-A 系统的终端价格非常昂贵，体积也很大，它采用 1m 口径的碟形抛物面天线。新一代 Inmarsat 系统采用数字技术降低了终端的尺寸和成本，大小和公文包差不多。高通公司的 OmniTRACS 系统可提供定位功能及双向通信功能，主要用于传送文本消息以及车队的位置跟踪。通过 GEO 卫星传送话音和数据有很多困难。信号要想到达卫星就需要有很大的发射功率，这样手机免不了都是又大又笨的。另一个问题就是在话音通信中往返时延较大，这样大的时延能被用户明显感觉到。GEO 卫星的数据速率一般低于 10kbit/s。这些原因使人们认为轨道较低的 LEO 卫星更为适合语音及数据通信。

卫星系统最具吸引力的用途就是在发范围内广播视频和音频节目。在美国，每 8 个家庭中就有 1 个拥有卫星直播业务，卫星收音机也开始普及。类似的音频和视频卫星广播业务在欧洲也很普遍。卫星是广播的最好手段，因为它可以覆盖很大的区域，传播时延也不是问题。若考虑建设资金可以分期至多年，并可由众多用户分担，那么卫星系统在成本上和地面广播娱乐系统相比将非常有竞争力。

1.1.3.8 低成本、低功率的无线通信：蓝牙和紫蜂

随着成本和功率的不断降低，无线通信可以被嵌入到多种电子设备中，用来实现智能家居、传感器网络及其它应用。在这种趋势下出现了两种无线通信方式：蓝牙和紫蜂。

蓝牙 (Bluetooth) 依靠简易的网络功能为无线电子设备提供短距离无线连接。蓝牙标准把一块集成了无线收发信机的很小的芯片植入数字设备中，如手机、笔记本电脑、掌上电脑、打印机、投影仪、网络接入点等，用收发信机替代了这些数字设备原本需要的连线，例如笔记本电脑和打印机之间的连线、手机和无线耳机之间的连线。以 1mW 功率发射时，蓝牙的通信距离是 10m，若将功率增大到 100mW，通信距离可延伸到 100m。蓝牙系统工作在 2.4GHz 开放频段上，可在世界范围内使用而无需考虑许可问题。蓝牙提供一个速率为 723.2kbit/s 的异步数据信道以及一个数据速率为 57.6kbit/s 的反向信道，此模式称为异步无连接 (Asynchronous Connection-Less, ACL)。蓝牙也允许同时有 3 个速率为 64kbit/s 的同步信道，此模式称为同步面向连接 (Synchronous Connection Oriented, SCO)，主要用于支持耳机之类的话音传输，也可用于数据传输。这些不同频率的总比速率大约是 1Mbit/s。异步数据经由分组交换协议传输，该协议采用每秒 1600 跳

的调频技术。同步数据采用电路交换协议传送。

蓝牙采用频率间隔为 1MHz 的跳频多址接入技术, 80MHz 的总带宽分为 80 个不同的频率, 任一时刻的传输带宽都是 1MHz, 这个传输带宽可由 8 个蓝牙设备同时使用, 不同设备对应不同的逻辑信道, 也即不同的跳频序列, 它们共享这 80MHz 的带宽。处于不同微微网、不同逻辑信道上的蓝牙设备可能因为使用相同的跳频频率而发生频率碰撞。碰撞次数随微微网数目增加, 系统性能也相应下降。

紫蜂 (ZigBee) 的设计目标是要比蓝牙有更低成本和更低的功耗。紫蜂基于 IEEE802.15.4 标准, 它和蓝牙一样工作在 ISM 频段。每个紫蜂网络可容纳 255 个设备, 最大覆盖范围 30m, 最大数据速率是 250kbit/s。虽然紫蜂的数据速率比蓝牙低, 但它发射功率大大低于蓝牙, 同时覆盖范围也更大。紫蜂希望能做到几个月甚至几年不用充电。紫蜂的应用目标包括传感器网络、存货标签等。

1.1.3.9 超宽带无线通信

超宽带 (Ultrawideband, UWB) 无线通信的频谱非常宽, 因而在高速数据传输方面很有潜力。超宽带通信的概念源于马可尼的火花隙发射机, 其信号占用了很大的带宽。让单个低速率用户占用很大频段自然是很低效的, 所以这种宽带通信很快被效率更高的技术所取代。直到 2002 年人们对它的兴趣又重新燃起, 这是因为 FCC 允许 UWB 系统可以和原有用户重叠使用 3.1GHz~10.6GHz 的频段。从理论上来说, 重叠使用将会干扰这一频段上的所有系统, 其中包括安全和军事部门的系统、使用开放频率的 802.11 无线局域网和蓝牙等系统, 以及花巨资买到频率专用权的蜂窝系统。因为损害到原有用户的利益, FCC 的决策引起了很大的争议。为了尽量减小 UWB 系统对原有用户的影响, FCC 对 UWB 的发射功率做出了严格的限制, 使得 UWB 的收发设备只有靠得很近才能通信。

UWB 有一个独特之处是雷达和通信界非常喜欢的, 这就是其宽带特性拥有精确的测距能力。UWB 的宽频带使它在超高速数据传输方面很有潜力。UWB 系统的功率限制也使其设备的功耗和体积都能做得很小。

最初的 UWB 系统采用超窄脉冲进行简单的脉幅或脉位调制。多径效应会严重影响此类系统的性能但其影响可运用均衡及多载波调制来减弱。精确而快速的同步 UWB 技术所面临的一大挑战。尽管还有许多问题有待解决, UWB 在商业界和学术界都引起了人们很大的兴趣。

1.2 无线通信中的差错控制技术

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，以提高数据传输速率和增大吞吐量为目的。

在无线通信系统中，基本的差错控制方式有以下三种：向前纠错 FEC (Forward Error Correction) 方式、自动重传请求 ARQ (Automatic Repeat reQuest) 方式以及由 FEC 和 ARQ 结合的混合 ARQ 方式。

1、FEC 方式。

该系统中使用的是纠错码，发送端经过编码发出能够纠正错误的码，接收端收到这些码字后，通过纠错译码器能自动地发现并纠正传输中的错误。

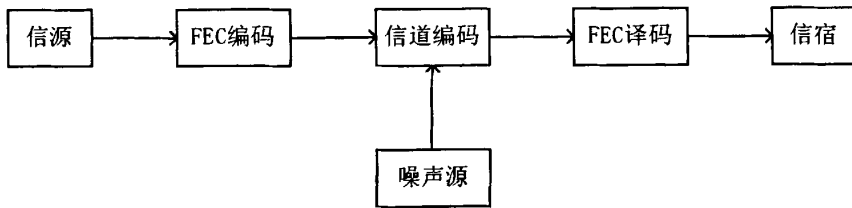


图 1.3 FEC 系统基本组成图

FEC 系统只有一个信道；系统传输效率高，等于码速率，与信道误码率无关；由于能自动纠错，不要求重发，因而时延小、实时性好。其缺点是：在接收端，不管译码结果如何都送给用户，很难达到高的系统可靠性；由于所选用的纠错码必须与信道干扰情况相匹配，使得编码效率降低，译码设备复杂，成本高。

2、ARQ 方式

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，知道正确接收为止。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误的，但不一定知道错码的准确位置。

ARQ 方式的主要优点是：只需要少量的多余码元（一般为总码元的 5%~20%）就能活动极低的输出误码率，可靠性高；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，有一定的自适应能力；其检错译码器与向前纠错法中的纠错译码器相比，成本和复杂性均低得很多。这种方法的主要缺点是：由于需要反馈信道，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；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；不宜提供实时服务。

3.混合 ARQ 方式

综上所述，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。当出现少量并在接收端能够纠正时，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 法纠正。这一方法被称为混合 ARQ (Hybrid ARQ) HARQ。HARQ 在一定程度上降低了 FEC 方法的译码复杂性，又避免了 ARQ

方式的信息传输连贯性差的特点，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。

1.3 ARQ 技术的研究现状及最新发展

1、对三种基本 ARQ 协议的研究情况^[7-25]

ARQ 技术是未来无线通信中实现高速数据可靠传输的有效差错控制技术之一，其包括三种基本类型：SW-ARQ、GBN-ARQ 和 SR-ARQ。由于在高速无线网络中，发送端在收到 ARQ 反馈信息之前要传输大量的数据帧，所以 SW-ARQ 方案工作效率较低。尽管 SR-ARQ 的重传效率比 GBN-ARQ 更高，但由于 SR-ARQ 的接收端需要将数据分组按顺序交付给上层，所以接收端需要很大的存储器，这就使得 SR-ARQ 的控制技术比 GBN-ARQ 复杂的多，使其不适应高速无线传输。为了获得较高的数据吞吐量，提高重传效率文献[8]在高速无线网络中将 GBN-ARQ 和 SR-ARQ 两种方案相融合并进一步完善，提出了基于 GBN 的部分选择重发 ARQ (PRIME ARQ) 和带部分位图的选择重传 ARQ (SRPB ARQ) 方案，分析表明重传效率可等同于 SR-ARQ，但优化了确认开销和延迟，算法简单有效，更适合在高速无线网络环境下使用。特别是 SRPB ARQ 已经被应用到 HiperLAN/2 标准中，作为其差错控制模式。文献[9]利用未来 IEEE802.11e 标准中增加的突发响应 (Burst Acknowledgment) 机制对 SW-ARQ 和 GBN-ARQ 的效率进行了比较，主要考虑了 MAC 数据协议单元 (MPDUS) 窗口大小、状态数 (STAs)、误帧率 (FER) 和信噪比 (SNR)。分析比较结果表明在某些情况下可以利用突发响应机制来提高信道传输效率，当窗口大小不超过 10 且误帧率大于 10^{-2} 时，GBN-ARQ 的性能接近或不及 SW-ARQ 性能；当窗口更大一些且误帧率小于 10^{-2} 时，GBN-ARQ 的性能优于 SW-ARQ 性能。

GBN-ARQ 因其效率高于 SW-ARQ 且传输设备比 SR-ARQ 简单而成为应用最广泛的 ARQ 协议，它已应用在 HDLC、SDLC、ADCCP 和 LAPB 等 DLC 协议中^[11]。但其缺点是随着信道误差率的增加而时延迅速增加，吞吐量也随之急剧下降。针对这一关键问题，最初由 Yao 提出了基于 SGBN-ARQ 和 nGBN-ARQ 自适应两模式 ARQ 系统，形成了著名的 Yao 协议^[10-16]。Yao 对无线信道状况的估计引进了一种简单而有效的判断方式，即根据连续收到的肯定应答 ACK 或否定应答 NAK 的个数来确定信道的好坏，对系统吞吐量进行了研究。结果表明，自适应两模式 ARQ 系统的吞吐量高于单模式 ARQ 系统^[10]。根据 Yao 的建议，部分文献对自适应 ARQ 系统做了改进和更加深入的研究^[11-16]。文献[11]研究了时变信道下自适应 SW-ARQ 系统的性能，对系统的吞吐量性能进行了优化分析，通过对系统参数的优化来达到提高系统吞吐量的目的。在 Yao 提出的自适应两模式 ARQ 的基础上，Ranko 等人根据信道噪声的高、中和低建立了自适应三模式 ARQ 系统，通过建模对该系

统的吞吐量做了分析,证明了自适应三模式 ARQ 系统的吞吐量性能较自适应两模式 ARQ 系统有所提高^[12]。Ranko 等人又在文献[13]中对自适应三模式 ARQ 系统做了改进,提出了基于传输周期的等效思想,通过建立多状态的 Markov 模型对系统进行了研究,得到了理论上更加完善和精确的吞吐量计算公式。

由于无线信道质量很差,需要大量的链路控制带宽用于传输错误帧的确认信息,导致确认效率很低。在无线数据通信系统中需要较高确认效率的自动请求重传机制。为此,3GPP 组织提出了一种多重抑制 (Multiple Reject) 传输 ARQ (MR-ARQ) 协议应用于无线数据通信的 RLC (Radio Link Control) 实体。MR-ARQ 协议相比传统 ARQ 协议在提高系统吞吐量、降低系统平均传输时延和时延抖动等方面具有优势^[17-20]。文献[17]、[18]在分析了 MR-ARQ 优势的基础上,针对不同业务传输时对误码率、传输时延和时延抖动的不同要求,研究了基于 MR-ARQ 协议的宽带无线接入系统 (BWA) 中多业务混合传输的服务质量保证 (QoS) 机制,提出了多速率重传策略、基于业务区分的多队列机制及上行集中宽带分配等系统性能优化方案。并对影响协议算法仿真性能的因素进行了分析。文献[19]在自适应调制和功率控制下研究了部分窗口多拒绝选择重传协议下的性能,并推导出吞吐量跟自适应调制关系的一般表达式。[20]中对 GBN-ARQ 协议和 SR-ARQ 协议的排队时延性能做了比较分析。文献[21]、[22]针对确认效率低的情况从 ARQ 确认方式方面对确认算法进行了改进,结果表明通过对确认算法的改进能够有效的提高系统的吞吐量减少时延。

TCP 协议是广泛应用于 Internet 上的可靠传输协议。在无线网络中,由于突发性噪声、多径衰落、移动性和干扰的影响,高误比特率成为无线信道固有的特点。过高的误比特率引起的分组丢失使得 TCP 协议认为丢包是由网络拥塞引起,从而启动拥塞控制处理与慢启动算法来降低传输速率,这使得传统的 TCP 在无线网络上的吞吐率很低,不能有效地利用带宽。通过无线链路层的选择性 ARQ 协议能有效改善 TCP 在无线网络中的性能。ARQ 协议能保证分组在高误帧率的无线链路上正确传输,使得 TCP 不受传输中分组出错的影响^[23-25]。

2、对混合 ARQ 协议的研究情况^[26-30]

文献[26]主要介绍了 FEC 和 ARQ 相结合的 H-ARQ,并且按照重传数据包所包含的内容不同可分为三种,即 I 型 (Type-I) H-ARQ、II 型 (Type-II) H-ARQ、III 型 (Type-III) H-ARQ。简述了 H-ARQ 技术在 3G 各个标准,如 WCDMA R99、HSDPA 和 CDMA2000 1X EV 中的应用,并与以往移动通信标准中的 H-ARQ 技术的运用进行了对比。Chadi Barakat 和 Alaeddine Al Fawal 在文献[28]中,对无线信道数据链路层 FEC 和 SR-ARQ 结合的 H-ARQ 的性能进行了分析研究。在假设信道误差率满足 Bernoulli 分布的情况下进行实例与仿真分析,研究结果证明,在发送差错率较低的情况,不需要 FEC 只用 SR-ARQ 进行差错控制就可以达到最大吞

吐量；在发送差错率较大的时候必须使用 FEC 来减少重传数据帧的次数，从而提高系统的吞吐量。虽然大部分信道都是时变的，如有线、无线和卫星信道等，但各种信道的实验表明：信道的参数在短时间内保持不变，因此信道可以等效为 Markov Chain 模型。文献[29]提出了一种基于线性预测的自适应冗余可变混合 ARQ (Variable Redundancy Hybrid- ARQ) 方案。由于时变信道的慢衰落特性，时变信道被等效为有限状态的 Markov 过程，每个 Markov 状态对应信道的不同信噪比 (ANR)，文献中还描述了吞吐量与误码率之间的数学关系，推导了每个 Markov 状态的最佳编码方案，然后系统采用自适应线性预测算法，根据当前个时段的信道状态来估计下一个时段信道的信噪比及其所对应的 Markov 状态，最后根据吞吐量最大原则选择合适的纠错编码方案。针对不同的编码方案进行了仿真分析，结果表明自适应线性预测 VR-HARQ 的性能明显优于传统的 VR-HARQ。文献[30]在无线信道条件下对 Type-III HARQ 的性能分别从理论分析和仿真分析进行研究，并且与 Type-I HARQ 和 Type-II HARQ 的性能进行比较，结果表明 Type-III HARQ 在 Rayleigh 衰落信道下的吞吐量最大，得到了 Type-I HARQ 和 Type-II HARQ 分别在 AWGN 和 Rayleigh 衰落信道下吞吐率的闭式解及 Type-III HARQ 积分形式的解。

3、ARQ 技术的最新发展

为了提高 ARQ 协议的效率，ARQ 协议被应用于单信道或多信道通信系统中。在 3 种传统的 ARQ 中，SR-ARQ 协议效率最高，但在具体实施时，存在存储需求大、实现复杂等问题。SW-ARQ 具有实现简单，所需缓存器少的优点，但在等待期间信道空闲，浪费了系统容量，效率较低。为了在无线高速数据传输中利用 SW-ARQ 的优势，同时克服其效率较低的缺陷，Motorola 于 2000 年提出了双信道 SW-ARQ 协议以提高信道的利用率。双信道或多信道 SW-ARQ 的实质是通过两个或多个 ARQ 信道复用 SW-ARQ 协议，从而提高 SW-ARQ 协议的信道利用率，但仍然保持了实现简单、所需缓存器少等优点，因此已被 3GPP (3rd generation partnership project) 采用为无线高速数据传输 HSDPPA (high speed downlink packet access) 的标准重传协议，并与分组重传合并进一步提高系统性能。文献[32]从信道数、合并方式、分组丢失率、传输延迟等方面分析了在 Rayleigh 衰落信道下具有分组合并的多信道 SW-ARQ 性能。分析结果说明，对于多信道 SW-ARQ，需根据分组传输时间和往返延迟时间合理安排 SW-ARQ 的信道数，以使 ARQ 系统性能达到最佳；根据信道质量，采用合适的分组合并方式可减少接收处理延迟；为获得恒定分组传输延迟和系统吞吐量，可根据分组丢失率要求和信道质量调整最大传输次数。文献[33]中分析了在多信道环境下的 3 种典型的 ARQ 协议的性能，表明相对单信道 ARQ，多信道下的 ARQ 能得到更好的性能，而且多信道 SR-ARQ 仍具有最好的性能。文献[34]中研究了在具有不同分集接收方案下的 SR-ARQ 性

能, 研究表明结合选择式合并和分组合并方式, 能获得较好的性能。

随着网络的不断发展, 跨层设计越来越多的受到了关注, ARQ 协议也同样适用于跨层设计方案中。无线网络信道易变化, 同时还有 QoS 的需求。传统的分层设计不能根据变化做动态调整。引入跨层设计的思想, 可以提高交互性。下一代无线通信系统必须能够与互联网实现信息交互, 这就需要利用通信协议来实现系统与其他通信系统间的互连互通。但是, 现有通信协议基于 OSI 标准, 其协议栈按照严格的分层方式工作, 很难适应快速变化的无线通信环境。文献[35]针对瑞利衰落信道提出了一种改进的自适应调制编码 (AMC) 与 SR-ARQ 相结合的无线网络跨层设计方案, 取消了现有 AMC/SR-ARQ 方案中完美的信道状态信息的假设, 不假设反馈信道无时延, 而是利用上一帧接收时信道状态的二阶统计特性来预测下一帧发送时信道情况, 并为信道状态进行建模, 提出 N-成功/N+1-失败系统吞吐模型, 在该模型的基础上对系统平均误包率、平均频谱效率和平均吞吐率进行了分析。仿真实验证明了改进的方案可以为具有 QoS 要求的用户提供满足平均误包率约束条件的服务, 并能够提高系统平均频谱效率。文献[36]提出了 LLE-TCP (link layer ARQ exploitation TCP) 跨层方案。该方案中避免了 ACK 帧在无线信道中的传输, 由此节省的时间可以用来对数据帧的分集。通过该方案的实施有效的减小了媒质的占用时间, 缩短了往返时延 RTT (round trip time)。

目前, 在研究比较前沿的协同 (Cooperative) 通信中也广泛使用 ARQ 协议。在无线网络中, 协同通信技术能够通过信号分集有效地提高系统的性能或吞吐量^[37-41]。协同通信容许用户共享彼此间的天线以获取空间分集增益。使得单入单出系统获得多入多出系统的好处, 同时避免了空间相关性对系统性能的影响。文献[37]、[38]对利用中继站在无线网络环境中的协同通信做了分析研究。利用中继节点代替发送节点传输出错的数据帧。通过建立分析模型比较了数据链路层不同 ARQ 协议的传输性能。结果表明协同 ARQ 能够提高系统性能。Isabella Cerutti 等人对协同 ARQ 在时隙无线网络中的应用做了分析研究^[39-41]。在具体的通信环境, 即数据帧是按泊松到达的, 建立了相应的排队模型, 在此基础上把协同 ARQ 和非协同 ARQ 的性能做了比较分析。从理论分析和仿真结果都表明, 有中继节点的协同 ARQ 能提高系统的吞吐量和时延性能。

1.4 本文的研究意义和各部分内容安排

本课题来源于甘肃省自然科学基金项目。本论文的研究内容是无线通信网络数据链路层的差错控制技术自动请求重传 (ARQ) 协议。基于基本的 ARQ 协议构建根据信道质量的好坏采用不同的 ARQ 传输机制的自适应 ARQ 系统, 减小了数据传输时延, 提高了无线通信网络性能。

本论文针对现代无线通信网络中的高速分组数据业务, 对 ARQ 技术进行了深

入细致的研究，通过建立自适应的 ARQ 系统，实现高速分组数据的可靠传输。

本论文的主要创新之处在于：

1、本文对于目前对自适应 ARQ 系统的研究是在数据分组的重传次数不受限制的情况做了改进与完善。在实际通信工程中，数据分组的重传次数是有限的，达到最大重传次数还未被成功接收的数据分组将被丢弃。本文在重传次数有限的情况下，对自适应 ARQ 系统重新建模分析系统的时延性能，这样也更加贴近工程实际。

2、建立准确描述自适应三模式多状态 ARQ 系统传输机制和传输原理的 Markov 模型。获得了以信道错误率表示的稳态概率和不同状态下分组发送次数的条件概率，求得了系统更加准确的时延解析式。

根据以上内容，本论文的章节结构安排如下：

- 第 1 章 绪论，首先简单介绍了无线通信概况及无线通信链路的差错控制技术。然后说明了 ARQ 技术的研究现状和最新发展。最后说明了本论文的研究意义和各部分内容安排。
- 第 2 章 本章对无线通信网络数据链路层的差错控制技术 ARQ/HARQ 的传输原理做了介绍与分析，为后面各章节的建模分析奠定了理论基础。
- 第 3 章 建立了基于时变信道的自适应三模式多状态 ARQ 系统，在重传次数有限的情况下，建立了准确描述系统传输机制和传输原理的 Markov 模型，对系统进行了时延分析。
- 第 4 章 采用了自适应帧长技术，建立了自适应 SW-ARQ 系统。根据不同的信道质量发送不同帧长的数据帧，以此来提高通信网络的性能。
- 第 5 章 本章给出了本论文的结论以及今后研究 ARQ 技术的可能发展方向。

第 2 章 ARQ/HARQ 协议传输原理的研究

目前, 通信技术正在高速发展, 其中增长最快的是 Internet 和移动通信。Internet 和移动通信使我们的生活非常方便, 将人们联系得更紧密, 但目前上网只能在相对固定的情况下进行, 移动通信也只能进行通话和低速数据通信, 人们感觉到局限性还是很大, 不是很方便。因此人们提出了更高的要求, 于是结合数据通信和高度移动性的第三代移动通信 (3rd Generation, 简称为 3G) 应运而生。有了第三代移动通信, 人们在移动环境下除了通话以外, 还可以方便进行 WWW 浏览, 收发 E-mail, 使用可视电话、视频点播等多媒体业务, 进行电子商务 (购物、交易、金融业务), Internet 和 3G 二者的结合将极大的促进彼此的发展。

第三代移动通信系统是指第一代和第二代之后的系统。第一代移动通信系统是模拟制式, 多址方式是频分多址 (FDMA), 典型的系统有: TACS, AMPS; 第二代移动通信系统是数字制式, 多址方式是时分多址 (TDMA), 提供数字化的话音业务及低速数据业务, 典型的系统有数字蜂窝系统, 如: GSM, DAMPS, IS-95 CDMA (即 cdmaOne, 窄带 CDMA); 提供的数据业务的速率是几 kbps 到十几 kbps。第三代移动通信系统则以提供移动环境下的多媒体业务和宽带数据业务为主, 是宽带数字系统, 采用码分多址或时分多址, 数据速率可达 2 Mbps, 第三代移动通信系统必将对人类社会的生活方式带来深远的影响。

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, 无线移动通信信道具有时变和多径导致的衰落特点, 有较高的误码率。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)。

近年来, ARQ 技术已被广泛的应用于无线移动通信中, 对 ARQ 技术的研究也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。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说明, 最后简单介绍了 ARQ 技术的最新进展。

2.1 传统的 ARQ 技术

数据通信在数据链路层采用帧做为基本的数据传输单元, 如果发送端只是将数据帧发送出去, 并不保证它们正确的到达接收端, 这种服务方式适合与非确认型无连接的业务, 其传输的可靠性较低。可靠传输数据的方法之一是向发送端提供有关接收端的反馈信息。

自动请求重传系统即 ARQ 系统, 其组成原理框图如图 2.1 所示。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。若未检出差错，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。若检出差错，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。

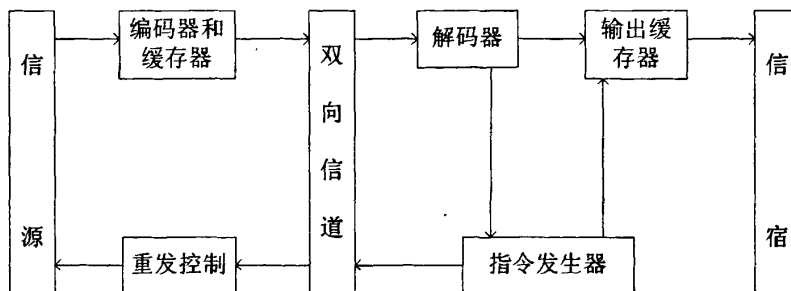


图 2.1 ARQ 系统基本组成

这就是最早的 ARQ 技术，体现了差错控制的思想，仅仅只是由接收端简单地根据收到的数据帧是否正确来控制重传。若收到的帧无错误，则发出正确应答帧 ACK；若是收到错帧，则发出错误应答帧 NAK，要求发送端重传上一数据帧，并等待这个数据帧的重传。如果重传任有错，则继续重传，直到重传的次數超过系统要求的最大次数，则放弃该帧的传输，继续下一帧的传送。

根据 ARQ 具体实现方案的不同，大致可分为以下三种基本类型：

2.1.1 停等式 ARQ (SW-ARQ)

SW-ARQ (Stop and Wait ARQ) 的基本思想是在开始下一个分组传送以前，必须确保当前分组被正确接收。假定 A 发，B 收。具体传送过程如下：A 发送一个分组后，B 如果接收正确，则 B 向 A 返回一个肯定应答帧 ACK；B 如果接收错误，则 B 向 A 返回一个否定应答帧 NAK。A 必须收到 B 的正确应答帧 ACK 后，方可发送下一个分组。如果 A 发送一个分组后（并给定时器设置一个初值），在一个规定的时间内（定时器溢出），没有收到对方的 ACK，则重发该分组；如果收到了 NAK，也要重发该分组。

SW-ARQ 运行方式简单，并且发送端需要较小的缓存器。但由于每发送一个分组后都要停下来等待应答帧，因而效率不会太高，信道利用率也很低。此外这种方案要能具体使用，还需解决下面两个问题：

(1) 丢帧之后的系统回复

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，因而也就不会发出应答帧。另一种情况是接收端已正确收到数据帧，并发出了肯定应答帧 ACK，但应答帧在传输过程中因破坏而丢失了。这样造成发

送端迟迟收不到应答帧，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个最常等待时间，一旦超过这个时间还没有收到某帧的应答帧的话，发送端就重发该帧。

(2) 防止重复帧

若接收端发送的 ACK 丢失了，发送端仍重发原来帧，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。

由于 A 到 B 之间的双向链路都有可能出错，如何保证该协议能够正确工作呢？基本的方法就是在传输的帧中增加发送序号 (SN) 和接收序号 (RN)，如图 2.2 所示。



图 2.2 ARQ 帧结构

假设没有发送序号 SN，看 ARQ 能否正常工作。A 发送一个分组给 B 后，B 接收正确，B 返回给 A 一个 ACK。如果 ACK 在传输过程中丢失或被时延，则 A 会重发刚才的分组。B 接收正确后，就会出现 B 接收到完全相同的分组。这时 B 将无法区分这两个分组是不同分组还是重复分组。这说明发送端必须增加一个发送序号。

假设没有接收序号 RN，看该 ARQ 能否正常工作。假设 B 返回的 ACK 被时延，可能出现的情况如图 2.3 所示。

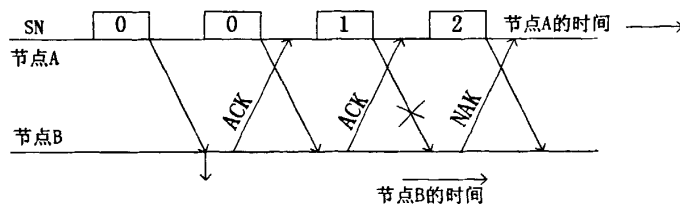


图 2.3 无接收序号时 SW-ARQ 的工作过程

A 发送的序号为 0 的分组被 B 正确接收后，由于在定时器溢出时，ACK 未到达 A，A 重发 SN=0 的分组。B 的第一次应答 ACK 到达 A 后，A 认为 SN=0 分组已被正确接收，发送 SN=1 的分组。B 对 SN=0 的第二次应答 ACK 到达 A 后，A 误认为 SN=1 的分组已被正确接收（无法区分是对 SN=0 或 SN=1 分组的应答）。A 将发送 SN=2 的分组。如果 SN=1 的分组传输出错，A 会在发送 SN=2 后收到 NAK 的应答，此时 A 端会认为 SN=2 的分组传输出错，因而会重发 SN=2 的分组。这就导致了 SN=1 的分组丢失。解决该问题的方法是：收端不是简单地回答 ACK 或 NAK，而是告诉对方正在等待接收的下一个分组的序号。（当然也可以是正确接收分组的最大序号。）通常 A 到 B 之间双方都有分组要传输，因而可将接收序号 (RN) 附带在反向传输数据的分组头中，以提高效率。

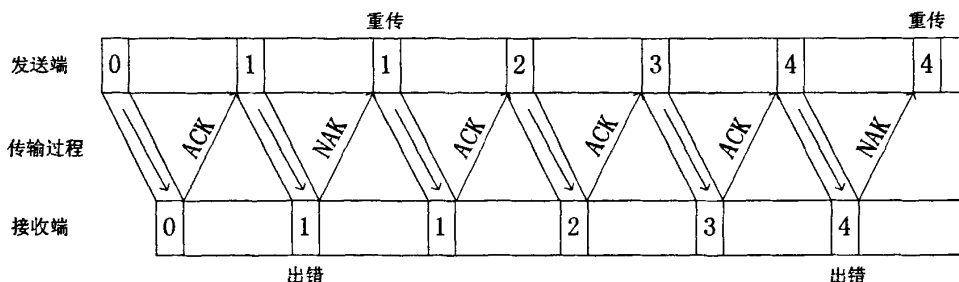


图2.4 SW-ARQ协议传输原理

综上所述，在 ARQ 帧中，必须有 RN 和 SN。SW-ARQ 协议传输原理如图 2.4 所示。SW-ARQ 协议的严格描述如下：

假定 A 向 B 发送分组 (A→B)，节点 A 的发送算法如下：

- (1) 置 SN=0。
- (2) 如果从高层接收到一个分组，将 SN 指配给该分组；如果没有高层分组则等待。
- (3) 将第 SN 个分组装入物理帧中发送给接收节点 B。
- (4) 如果从 B 接收的 RN>SN，则将 SN 加 1，返回 (2)。

如果在规定的有限长时间内，没有从 B 接收到 RN>SN 的帧（应答），则返回 (3)。

节点 B 的接收算法如下：

- (1) 置 RN=0。
- (2) 无论何时从 A 接收一个 SN=RN 的分组，将该分组送给高层，并将 RN 加 1。
- (3) 在接收到该分组的一个规定的有限长时间内，将 RN 放入一帧的 RN 域中发给 A。返回 (2)。

在上述算法中，规定时间通常是采用定时器来确定的。RN 通常是附带在数据帧中传送给对方的。如果节点 B 没有数据传送给对方，则应单独传送一个包含 RN 的无数据帧给 A。

SW-ARQ 因其设备简单而被应用于无线通信中，下面对 SW-ARQ 进行定量分析 (图 2.5)。分析模型中采用半双工通信模式。假设节点 A 向节点 B 发送数据帧，节点 B 只发送确认帧而不发送否认帧，也不发送自己的数据帧。

设 t_f 是一个数据帧的发送时间，且数据帧的长度是固定不变的。显然，数据帧的发送时间 t_f 是数据帧的长度 l_f (bit) 与数据的发送速率 C (bit/s) 之比，即

$$t_f = \frac{l_f}{C} = l_f / C \text{ (s)}$$

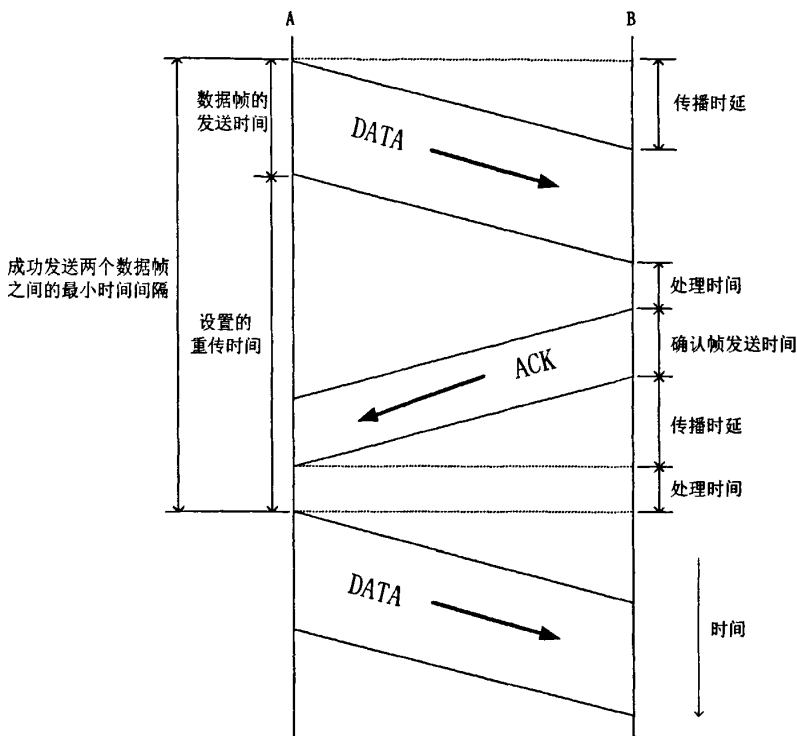


图 2.5 SW-ARQ 协议中数据帧和确认帧的发送时间关系

发送时间 t_f 也就是数据帧的发送时延。数据帧沿链路传到节点 B 还有经历一个传播时延 t_p ，它是信号(电磁波)在物理链路上传播所造成的时延。节点 B 收到数据帧要花费时间进行处理，此时间称为处理时间 t_{pr} 。节点 B 接着发送确认帧 ACK，其发送时间为 t_a ，传播时间为 t_p （假设信道的双向传播时间都是一样的）。节点 A 收到确认帧后要花费处理时间，设这个时间和处理数据帧的时间一样，都是 t_{pr} 。然后才接着发送下一个数据帧。为方便起见，设重传时间为

$$t_{out} = t_p + t_{pr} + t_a + t_p + t_{pr}$$

重传时间的作用是：数据帧发送完毕后若经过了这样长的时间还没有收到确认帧，就重传这个数据帧。为研究问题方便起见，设上式右端的处理时间 t_{pr} 和确认帧的发送时间 t_a 都远小于传播时延 t_p ，这样就可简单地将重传时间取为两倍的传播时延，即

$$t_{out} = 2t_p$$

因此，两个发送成功的数据帧之间的最小时间间隔 t_T 为

$$t_T = t_f + t_{out} = t_f + 2t_p$$

如遇发生差错，则成功发送一个数据帧所需的时间显然要超过 t_T 。

现在设数据帧出现差错（包括数据帧丢失）的概率为 p ，但假设确认帧不会出现差错（由于确认帧很短，所以确认帧出现差错的概率也就很小，可以忽略）。此外，允许重传的次数不受限制。这样，可以得出正确传送一个数据帧所需的平均

时间 t_{av} 来。推导的主要步骤如下：

$$t_{av} = t_T(1 + \bar{X})$$

其中 \bar{X} 为一个帧的平均重传次数，设 X 为重传次数，则

$$\begin{aligned} \bar{X} &= 1 \times P\{X=1\} + 2 \times P\{X=2\} + 3 \times P\{X=3\} + \dots \\ &= p(1-p) + 2p^2(1-p) + 3p^3(1-p) + \dots \\ &= (1-p) \sum_{i=1}^{\infty} ip^i \end{aligned}$$

这样就可得出正确传送一个数据帧所需的平均时间

$$t_{av} = t_T + (1-p) \sum_{i=1}^{\infty} ip^i t_T = t_T / (1-p)$$

不难看出，当传输差错率增大时， t_{av} 也随之增大。当无差错时， $p=0$ ， $t_{av}=t_T$ 。

每秒成功发送的最大帧数就是链路的最大吞吐量 λ_{max} 。显然

$$\lambda_{max} = 1/t_{av} = (1-p)/t_T$$

在发送端，设数据帧的实际到达率 λ （即每秒到达 λ 个数据帧），则 λ 不应超过最大吞吐量 λ_{max} ，即

$$\lambda \leq (1-p)/t_T$$

用时间 t_f 进行归一化，得到归一化的吞吐量 ρ 为

$$\rho \equiv \lambda t_f \leq (1-p)/\alpha < 1$$

其中参数 α 是 t_T 的归一化时间：

$$\alpha \equiv t_T/t_f \geq 1$$

当重传时间远小于发送时间时， $\alpha \approx 1$ ，此时的归一化吞吐量

$$\rho \leq 1 - \rho$$

2.1.2 回退 N 步 ARQ (GBN-ARQ)

由于 SW-ARQ 效率很低，人们想到发送端在等待对方应答时，应当做更多的事情，就提出了三种改进方案：GBN-ARQ、SR-ARQ 和 ARPANET ARQ。

为了减小占空比，提高传输效率，在 SW-ARQ 协议的基础上改进而成了 GBN-ARQ。GBN-ARQ 是一种应用最广泛的 ARQ 协议，它已被应用到 HDLC、SDLC、ADCCP 和 LAPB 等 DLC 协议中。它有三种形式：标准的 GBN-ARQ (Standard GBN)、n 副本 GBN-ARQ (n-copy GBN-ARQ) 和连续的 GBN-ARQ (Continuous GBN)。

GBN-ARQ (Go Back N ARQ) 的基本思路是：发送端在没有收到对方应答的情况下，可以连续发送 N 个分组。这里 N 是一个重要参数，它叫做（滑动）窗口宽度。接收端仅接收正确顺序的分组，其应答中的 RN 表示 RN 以前的所有分组都已正确接收。（这里接收端不需要每收到一个正确的分组就发出一个应答帧，可对

接收到的正确顺序的最大分组号进行应答。)

图 2.6 出了 SGBN-ARQ 协议的传输原理。发送端在发出一个数据帧后，不等待应答帧的到来，就接着发送下一个数据帧。在经过一个往返时间后，相应数据帧的应答帧才到达发送端，这时发送端已经发出了后继的 $N-1$ 个数据帧。当收到 ACK 帧后，就继续发送新数据帧。一旦收到 NAK 帧，发送端就要回退 N 步 (图 2.7 中 $N=4$) 重新发送那个出错的数据帧 (图 2.7 中的第 2 号、第 7 号数据帧)，以及后继的 $N-1$ 个已经发送过的数据帧。当然，发送端需要有一个能存储 N 个数据帧的缓冲区 (称为重发表)，以便随时准备重发。接收端对检测出有错的那个数据帧之后的 $N-1$ 个帧，不管其是否正确，都一律丢弃，所以接收端只需要能存储一个数据帧的缓冲就可以了。

从图 2.7 中可以看出，如果接收端能及时返回应答帧，则发送端可连续不断地全速连续发送分组。(如果我们减缓应答返回的速率，则可以控制发送端发送分组的速率，从而达到速率控制的目的。)

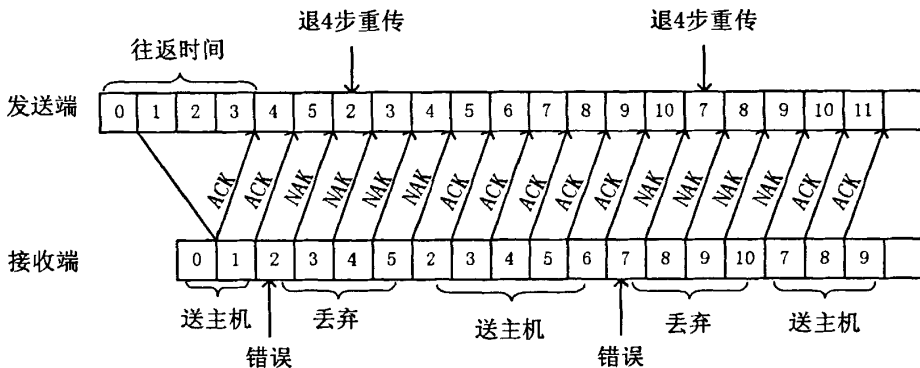


图 2.6 SGBN-ARQ 协议传输原理

下面考察双向都有数据传输并且分组长度不等长时，发送端滑动窗口的情况。见图 2.7(a)-2.7(c)所示。

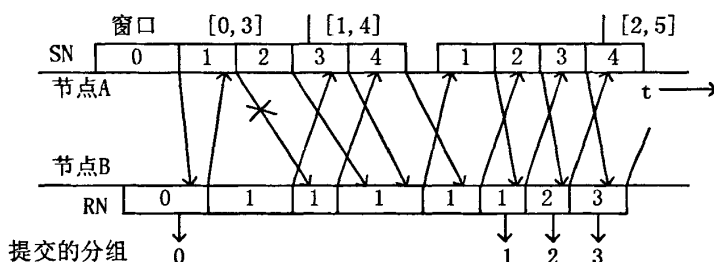
图 2.7(a)显示了传输错误对发送窗口的影响，窗口长度为 4。在该图的上面是发送端发送的分组及其序号，下面是反向传输的分组，RN 嵌入在反向业务分组流中，因而 RN 的传输时延受反向业务流的限制。发送端窗口开始时为 $[0, 3]$ ，当收到对 $RN=1$ 的应答分组后 (表示 $SN=0$ 已经正确接收) 时，发送窗口变为 $[1, 4]$ 。由于 $SN=1$ 分组出错，在发送完 $SN=4$ 的分组后将等待对 $SN=1$ 的应答。在定时器溢出后，发送端将从 $SN=1$ 的分组开始重发。当发送端收到 $RN=2$ 的应答后，将窗口变为 $[2, 5]$ 。在该图中，尽管 2, 3, 4 号分组传输正确，但仍需要重传。

图 2.7(b)显示了反向帧长对发送端窗口的影响，图中的窗口长度仍为 4。由于对 $SN=1$ 和 2 的应答包括在 $RN=3$ 的反向分组中，该分组被发送端正确接收时刻晚

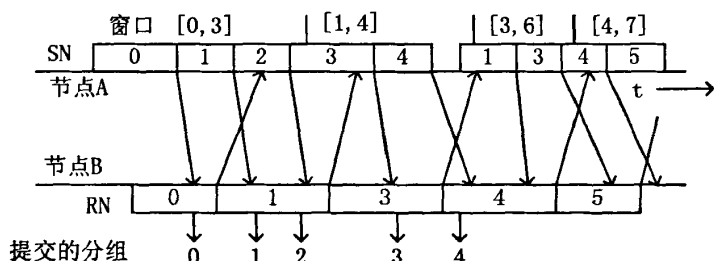
于发送端对分组 1 设置的等待应答时限，这导致发送端重传 SN=1 的分组。由于在重传 SN=1 的分组过程中已收到了对 SN=2 分组的应答，因而发送端在重发 SN=1 的分组后，接着发送 SN=3 的分组，且发送窗口从 [1, 4] 变为 [3, 6]。

图 2.7(c) 显示了反向分组出错对发送端的影响。反向分组出错可能对发送端无影响。如图中反向 RN=1 的传输出错，被反向 RN=2 分组的正确所补救，因而未对发送端产生影响，发送端收到反向 RN=2 的分组后，将窗口从 [0, 3] 变为 [2, 5]。反向分组出错也可能对发送端有影响。如图中反向 RN=3 分组的出错将导致发送端的传输停顿，并在定时器溢出后重传 SN=2 的分组。

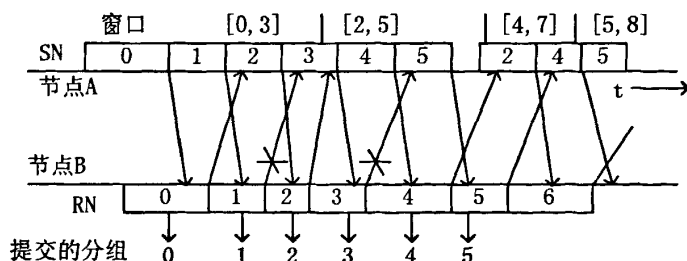
从上面的讨论可以看出，应答的超长时延或出错会导致发送端重发。当然重发过程不一定是连续重发从某一需要重发的分组开始的窗口内的所有分组，它取决于重发过程中收到应答的情况。



(a)



(b)



(c)

图 2.7GBN-ARQ 的分组传送过程

(a) 正向传输错误对发送端窗口的影响；(b) 反向帧长对发送端窗口的影响；

(c) 反向传输出错对发送端的影响

这里 SGBN-ARQ 是最典型的，下面我们分析一下其算法以及效率性能。

对于 SGBN-ARQ 随着传输的不断进行，其发送序号 SN 以及接收序号 RN 也在不断的增加，为了方便，其序号可以用模 L ($L > N$) 整数来表示。例如取模 8 则可用 3 比特来表示序号，此时最大的窗口取值为 7。如果 $N=L$ ，则系统无法正常工作。现假设 $N=L=8$ 。发送端发送 8 个分组后，收到了对方的所有确认，则将发送新的 8 个分组，其序号为 0~7。如果发送端发送 8 个分组后，接收端发送的应答未能到达发送端，发送端将重发这 8 个分组，其序号仍为 0~7。由于这两种情况对接收端而言是无法区分的，因而在接收到第二次数号为 0~7 的分组时，接收端无法区分是新的分组还是重发分组。

在序号取模 L ($\text{mod } L$) 的情况，SGBN-ARQ 的算法如下： $(L > N)$

假设发送端使用 SN_{\min} 表示目前没有收到应答的分组中序号最小的分组（即发送端窗口的低端）， SN_{\max} 表示它将从高层接收的分组序号。节点将试图传送 SN_{\min} 到 $SN_{\max}-1$ 之间的分组。

发送端的算法：

(1) 置模 L 变量 SN_{\min} 和 SN_{\max} 等于 0。

(2) 算法以任意顺序重复执行第 (3)、(4)、(5) 步。但在每步的条件满足时刻到该步被执行的时刻之间的时延是任意的，但该时刻是一个有限的值。

(3) 如果 $(SN_{\max} - SN_{\min}) \text{ mod } L < N$ ，且上层有一个分组到达，则将 SN_{\min} 指定给该分组，并将 SN_{\max} 增加至 $(SN_{\max} + 1) \text{ mod } L$ 。

(4) 如果收到的 RN 满足 $(RN - SN_{\min}) \text{ mod } L \leq (SN_{\max} - SN_{\min}) \text{ mod } L$ ，则置 $SN_{\min} = RN$ 。

(5) 如果 $SN_{\min} \neq SN_{\max}$ ，且当前没有帧传输，选择一个满足 $(SN - SN_{\min}) \text{ mod } L < (SN_{\max} - SN_{\min}) \text{ mod } L$ 的 SN 进行传输。当 SN_{\min} 不再改变时， SN_{\min} 分组的重传间隔应当小于一个规定的有限值。

接收端的算法：

(1) 置模 L 的变量 $RN=0$ 。重复执行第 (2) 和 (3) 步。

(2) 当接收到的 $SN=RN$ ，将分组呈送给高层，并将 RN 增加至 $(RN+1) \text{ mod } L$ 。

(3) 在接收到发送端的任何一个正确分组后，在一个有限时间内，将接收端的 RN 发给发送端。

下面简要的分析窗口长度 N 对 SGBN-ARQ 效率的影响。

经分析可知，导致 SGBN-ARQ 系统效率下降（重传或等待应答）有三个方面的原因。第一原因是反向帧长过长，这就要求增加 N 。在常用的标准 DLC 中，通常取 L 为 8， $N=7$ 。假设双向传输的帧长为指数分布的情况，在规定的窗口内，分组未被应答的概率为 $P_N = 2^{-N}(1+N)$ 。如 $N=7$ ， $P_N = 1/16$ 。因此，如果反向帧长

较长, $N=7$ 的效率很低, 可以选用 $L=128$ 。第二个原因是反向应答出错, 这也要求增加 N 以降低出错对效率的影响。第三个原因是正向传输出错。如果根据前两个原因的要求增加 N , 这将导致正向传输出错后, 需要重传的分组数大大增加, 这反而导致系统的效率下降。解决这一问题的办法就是加快出错的反馈速度。即接收端一旦接收到一个错误帧, 立即发送 (返回) 一个短的应答帧 (监控帧), 使发送端尽快地返回重发。

假设帧长是一个固定值, 现在讨论 SGBN-ARQ 的通过量及最佳的帧长。

设一帧的传输时间为 t_f , 重传一个数据帧所需的时间为 t_r (它包括一帧的传输时间, 处理时间, 传播时延和等待应答的时间), 一帧的错误传输的概率为 p , 则正确传送一个数据帧所需要的平均时间为

$$t_{av} = t_f + \sum_{i=1}^{\infty} i(1-p)p^i t_r = \frac{t_f [1 + (\alpha - 1)p]}{1 - p} \quad (2.1)$$

式中 $\alpha = t_r / t_f$

在发送节点处于饱和的状态下, 吞吐量的最大值为

$$\lambda_{max} = \frac{1}{t_{av}} = \frac{1 - p}{t_f [1 + (\alpha - 1)p]} \quad (2.2)$$

$$\text{归一化的最大吞吐量为 } \rho_{max} = \lambda_{max} \cdot t_f = \frac{1 - p}{1 + (\alpha - 1)p} \quad (2.3)$$

在实际中。每一帧数据 (长为比特) 通常包括 l_d 比特的数据和 l_h 比特的控制信息 (即 $l_f = l_d + l_h$)。如果帧长较短, 控制比特所占用的比例较大, 因而信道利用率下降; 如果帧长较长, 在数据帧传输过程中, 因信道误码的存在而导致帧传输错误的概率较大, 重传的次数将增大, 这也会导致信道利用率的下降。因此存在一个最佳帧长, 使信道利用率最高。

设信道的误比特率为 p_b , 在随机错误的信道 (如卫星信道) 条件下, 数据帧的差错率或误帧率 p 为 $p = 1 - (1 - p_b)^{l_f}$ (2.4)

当 p_b 很小时, 上式可近似为 $p \approx l_f p_b \ll 1$ (2.5)

当差错率较低时, 该公式也适用于具有突发错误的陆地信道。

设信道容量为 C , 根据式 (2.5) 可得信道真正用于有用信息传输的效率为

$$U = \frac{\lambda_{max} \cdot l_d}{C} = \frac{l_d}{l_d + l_h} \frac{1 - p}{1 + (\alpha - 1)p} = \frac{l_d}{l_d + l_h} \frac{1 - (l_d + l_h)p_b}{1 + (\alpha - 1)(l_d + l_h)p_b} \quad (2.6)$$

这里设 $l_h = 48 \text{ bit}$, $p_b = 10^{-5}$, 可得 U 与 l_d 的关系曲线如图 2.8 所示。

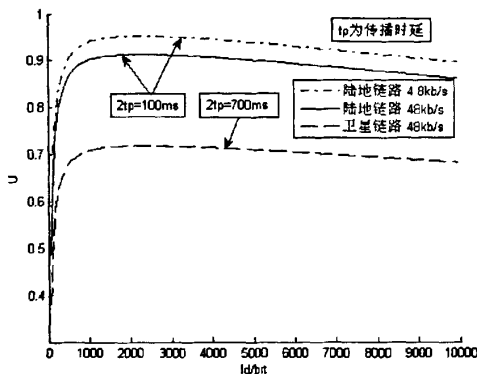


图 2.8 信道利用率与数据长度的关系

从图中可以看出最佳数据帧长大致在 1000 到 2000bit 之间。当 $(\alpha - 1)p \ll 1$ 时，

$$式 (2.6) 可以近似地表示为 U \approx \frac{l_d}{l_d + l_h} [1 - (l_d + l_h)p_b]$$

对上式关于 l_d 求导，并令其为零，可得到最佳数据帧长度为

$$l_{d_{opt}} = \sqrt{\frac{l_h}{p_b}} - l_h$$

CGBN-ARQ 协议的传输原理与 SGBN-ARQ 不同的是它没有传输定时器，发送端在没有收到对方应答的情况下，可以连续发送 N 个分组。接收端仅接收正确顺序的分组，其应答中的 RN 表示 RN 以前的所有分组都已正确接收。

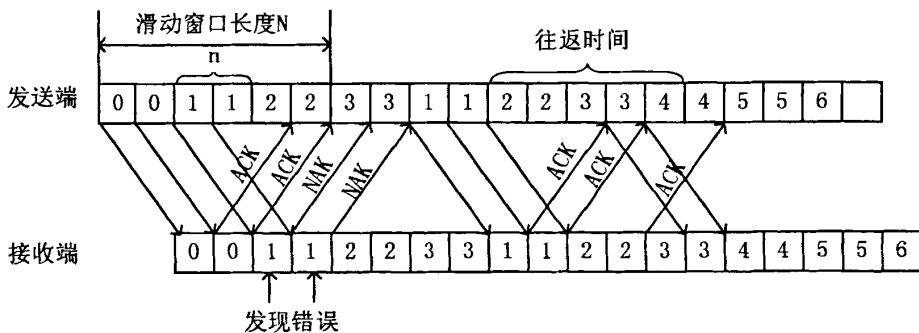


图 2.9 nGBN-ARQ 协议传输原理

n GBN-ARQ 协议的传输原理与 SGBN-ARQ 机制基本一样，不同的是发送端每次对一个数据帧传输 n 个副本而不是一个。只有 n 个副本全部出错接收端才会向发送端发送一个 NAK。图 2.9 给出了在 $N=6, n=2$ 往返时延为 $N-1$ 情况下 CGBN-ARQ 协议传输原理图。

2.1.3 选择式 ARQ (SR-ARQ)

SR-ARQ (Select Repeat ARQ) 是在 GBN-ARQ 的基础上改进而成的，也是一

种连续 ARQ 方案。当发送端收到包含出错帧序号的 NAK 帧时，据此序号从重发表中选出相应帧的备份，插入到发送帧队列的前面给予重发，也就是说对重发帧有个选择。因此，避免了对后继正确数据帧的多余重发，使得传输效率明显提高了。

图 2.10 示是 SR-ARQ 协议的传输原理图。接收端检测出编号为 2 的数据帧出错了，返回 NAK (2) 帧。发送端收到 NAK (2) 帧时正好发送完第 5 号帧，立即从重传表中取出第 2 号帧的备份，插入到发送队列的最前面进行重发，随后接着发送第 6 号帧，而不是如同 GBN-ARQ 中那样还将第 3、4... 等帧也重发出去。在接收端，发出 NAK (2) 帧后，应将后继到达的正确数据帧存储到缓冲区中，待收到正确的第 2 号帧后，才迅速将本来缓存的数据帧 (3、4 号) 紧随其后顺序提取出来，一次性的处理并上交给网络层。

不难理解，SR-ARQ 在效率上获得的增加，是以复杂的接收控制机制和缓冲容量为代价的。在链路质量较差以致较多出现多个错误或单个帧连续错的情况下，重发帧和接收帧的缓存提取及接收后的排序问题是比较复杂的操作，会花费较多的处理时间。因此，SR-ARQ 在应用方面尚不如 GBN-ARQ 那么广泛。

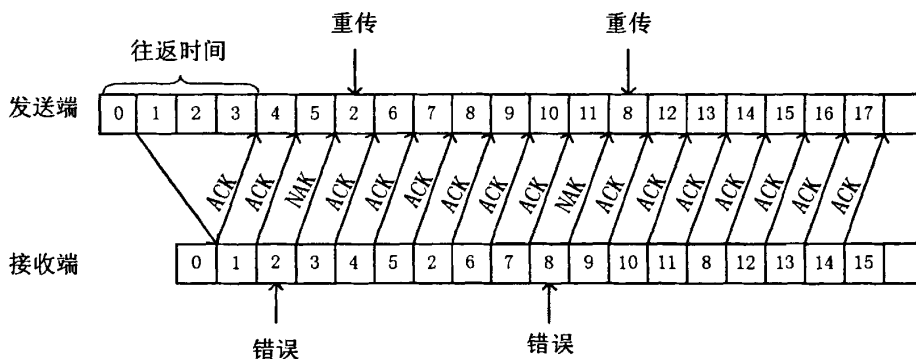


图 2.10 SR-ARQ 协议传输原理

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容量的存储器，以保证不会有溢出。SR-ARQ 方式的接收端可以接收乱序帧，而 GBN-ARQ 方式的接收端只能接收顺序帧。

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，发送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通信系统中的。

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 更为复杂的实现做为代价的。SR-ARQ 在等

待响应的时候，为了充分的利用信道容量，发送端要发送大量的数据分组。接收端可能要组合那些分隔重传的数据分组，为此必须要用序列号识别数据分组。序列号和数据分组分别编码，且序列号需用更可靠的编码以克服任何时候出现在数据分组里的错误，这样就增加了对信令要求的带宽。

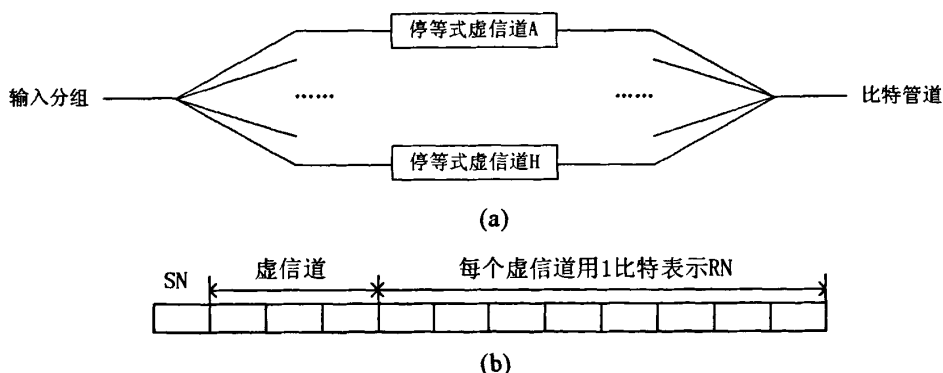
现在，3G 的 HSDPA 信道采用 N 信道停等协议，希望能结合 SW-ARQ 最小复杂度和 SR-ARQ 的高效吞吐量的特点，通过设置并行停等协议的信道数 N 来提高通过率。

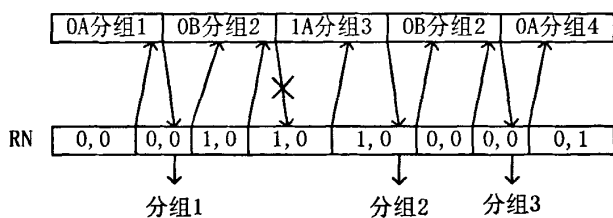
2.1.4 并行等待式 ARQ (ARPANET ARQ)

ARPANET ARQ 采用了 8 个并行等待式 ARQ，如图 2.11(a)所示。每一个 SW-ARQ 对应于一个虚拟信道，8 个虚拟信道分别为 A~H。输入分组可以任意分配到空闲的虚拟信道 A~H 上。如果所有虚信道忙，分组将在 DLC (Data Link Control) 层外等待。处于忙状态的虚拟信道上的分组被复接到物理比特管道上传输。可以采用轮询的方法来循环查询各个虚拟信道，当轮询到某一信道忙时，如果应答还没有收到，则将该虚拟信道的分组再次发送到物理信道上。因此，该复接方式就不需要设置定时器来计算等待应答的时间。

该协议的收发序号的表示方法如图 2.11(b)所示。由于采用 mod2 方式，仅需一位就可以表示 SN 和 RN。为了区分不同的虚拟信道，在帧头中还增加了 3 比特的虚拟信道号。由于发送发送采用了轮询的方式，因而反向信道的应答也是重复发送的。因此，在反向信道的传输错误仅会引起很少的重发，而只有前向信道的传输错误时采需要重发。图 2.11(c)中给出了仅 A、B 两个信道时的传输过程。

使用该协议的一个问题是 DLC 层不负责排序，因而高层应当具有分组排序功能。





(c)

图 2.11 ARPANET ARQ

(a)并行等待式 ARQ; (b)收发序号的表示方法; (c)数据传输过程

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,以减少重发的次数,从而即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。林舒等教授基于编码解码提出了针对卫星通信的 H-ARQ。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,丁智提出了将混合 ARQ 和物理层相结合进行考虑的研究课题。

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。

2.2.1 混合 I 型 ARQ

混合 I 型 ARQ 实际上就是单纯的将 FEC 和 ARQ 结合。当接收端发现收到的数据帧检测有错时,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,则丢弃该帧,同时要求发送端重传一个相同的数据帧。当收到的重发帧有错时,仍是试图开始纠错,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校验码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,从而较好的提高了系统性能。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通信），传输非常稳定，几乎不需要或很少需要纠错，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，由于不用保留传错的数据帧，所以无论发送端、接收端均不需要很多的存贮器，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，例如：分组码、卷积码、Turbo 码和级联码。

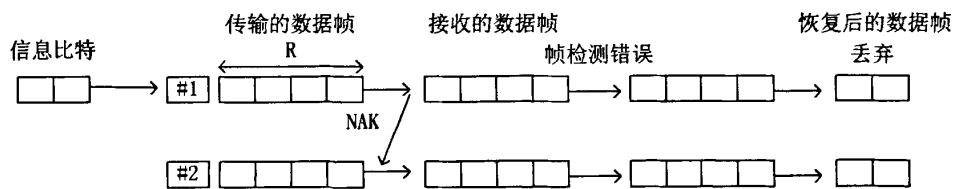


图 2.12 混合 I 型 ARQ 协议的传输原理

2.2.2 混合 II 型 ARQ

如上节所述，混合 I 型 ARQ 不保存错误的分组，因此不能利用出错分组的有用信息，只能单纯利用 FEC 的纠错能力；其次对信道基本没有适应能力，导致吞吐量无法提高。因此，若对混合 I 型 ARQ 加以改进，使它能够利用信道信息，根据信道变化调整纠错能力，就可以极大的提高系统的吞吐量。混合 II 型 ARQ 就是基于这种思想产生的。

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。

混合 II 型 ARQ 属于增加冗余（IR）的 ARQ 机制，混合 II 型 ARQ 重发请求的产生与混合 I 型 ARQ 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；重发帧与已发帧的内容一般不同。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。

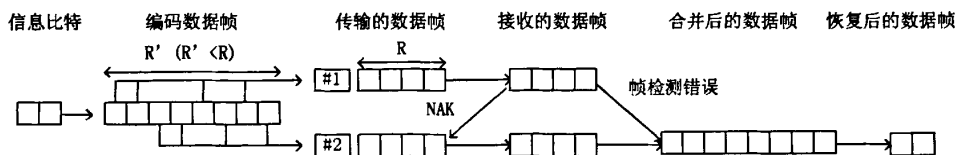


图 2.13 混合 II 型 ARQ 协议传输原理

2.2.3 混合 III 型 ARQ

混合 III 型 ARQ，又叫部分冗余 HARQ，也属于增加冗余机制。它与混合 II 型

ARQ相似，接收错误的数数据帧不会被丢弃，接收端将其存储起来与后续的重传数据帧合并后进行解码。混合 II 型 ARQ 有个缺点就是重传数据中只包含冗余信息，不包含系统比特，因而重传数据不能自解码。如果系统中噪声和干扰比较大，对第一次传输的数据破坏非常严重，那么即使增加冗余信息，数据帧也难以解码，因为系统比特对解码的影响是非常大的。在这种情况下，如果重传数据可以自解码，将会使系统性能得到提高。混合 III 型 ARQ 可以看成是混合 I 型 ARQ 和混合 II 型 ARQ 的结合。编码时生成编码数据帧是不同的，第一次传输的数据帧通常与混合 I 型 ARQ 的编码数据帧相同；重传时所传输的数据帧中包含有不同的打孔比特。当第一次传输不能正确接收时，就发送后续的重传数据帧。由于重传数据帧是可自解码的，因此可能由重传数据帧直接解码出用户信息，如果仍然不能正确解码，则将多次传输的数据帧合并，再进行解码，如果仍然不能正确解码，则继续传输后续重传数据帧。如果所有的传输数据帧版本发送完一遍后数据帧仍不能正确解码，则重复发送这些版本的传输数据帧。

与混合 II 型 ARQ 相比，混合 III 型 ARQ 在实现上更为复杂，所有接收到的传输数据帧和所有它们之间的组合都需要进行解码，而混合 II 型 ARQ 中，由于重传数据帧不包含系统比特，因而每次传输只需要解码一次。

综上，混合 ARQ 相对于传统 ARQ 具有较高的系统实现复杂度，其系统维护费用也是相对比较高的。

2.3 本章总结

本章较为全面的介绍了无线通信网络中数据链路层采用的差错控制技术 ARQ/HARQ 的传输机制和基本原理。分析说明了它们的优缺点，并对 SW-ARQ 系统的传输效率做了简要的算法说明和理论分析。

第 3 章 自适应三模式多状态 ARQ 系统性能研究

本章基于 GBN-ARQ 的三种基本形式 SGBN-ARQ、nGBN-ARQ 和 CGBN-ARQ 为基础构造了一种自适应三模式 GBN-ARQ 系统(TMGBN-ARQ)。该系统在信道噪声区分为低、高和很高的不同情况下,分别采用上述三种机制传输数据分组。针对系统的时延性能等问题,在考虑工程实际中重传次数受限的情况下,建立了准确描述系统传输机制和传输原理的三模式多状态的 Markov 模型,获得了相应的以信道错误率表示的稳态概率和不同状态下分组发送次数的条件概率,从而求得了通常难于获得的系统更加准确的时延解析式。首先对文献[13]即发表在国际期刊 Wireless Personal Communications 17:3-20, 2001. 上的文章 An Efficient ARQ Protocol for Adaptive Error Control over Time-Varying Channels (HLAING MINN, MAO ZENG, ANNAMALAI JR et al.) 中的关于时变信道数据分组时延分析的失误之处作了分析纠正。

3.1 文献[13]中关于时延计算的失误之处分析改正

文献[13]中在没有考虑重传次数限制的条件下建立的自适应三模式 ARQ 系统是对 Yao 提出的自适应两模式 ARQ 系统^[10]的改进和发展,对系统的吞吐量作了较为深入的研究,并且对系统的参数做了优化分析,以提高系统的传输效率,但文中在分析推导过程中存在多处较为严重的失误和疏漏,如式(4)、(5)、(6)等式中均存在错误。下面我们文中的错误之处进行分析改正。

文献[13]中的(4)式为:

$$\begin{aligned}
 T_L &= \sum_{k \leq \beta} k(n_1 + R\tau)P(f = k | L_1) + \sum_{\alpha < k \leq \alpha + \gamma} [\alpha(n_1 + R\tau) + k(n_2 + R\tau)]P(f = k | L_1) \\
 &+ \sum_{k > \alpha + \gamma} [\alpha(n_1 + R\tau) + \gamma(n_2 + R\tau) + k(n_3 + R\tau)]P(f = k | L_1) \\
 &= (1 - P_{1e}^\alpha) \frac{n_1 + R\tau}{1 - P_{1e}^\alpha} + P_{1e}^\alpha (1 - P_{2e}^\gamma) \frac{n_2 + R\tau}{1 - P_{2e}^\gamma} + P_{1e}^\alpha P_{2e}^\gamma \frac{n_3 + R\tau}{1 - P_{3e}}
 \end{aligned}$$

文献[13]中(4)式包含三种情况:当 $k \leq \alpha$ 时,表示数据分组在 L 发送模式下经过 k 次传输被成功接收;当 $\alpha < k \leq \alpha + \gamma$ 时,表示数据分组在 L 发送模式下经过 α 次的传输未被成功接收到,并在切换到 M 模式下经过 $k - \alpha$ 次的传输才被成功接收。当 $k > \alpha + \gamma$ 时,表示数据分组在 L 模式和 M 模式下分别被传输了 α 和 γ 次均接收失败,然后切换到 H 模式下经过 $k - \alpha - \gamma$ 次传输后被正确接收到。文中对后两种情况中均错误地以 k 表示了 $k - \alpha$ 和 $k - \alpha - \gamma$ 。(4)式应改为

$$\begin{aligned}
 T_{L_i} &= \sum_{k \leq \beta} k(n_1 + R\tau)P(f = k | L_i) + \sum_{\alpha < k \leq \alpha + \gamma} [\alpha(n_1 + R\tau) + (k - \alpha)(n_2 + R\tau)]P(f = k | L_i) \\
 &\quad + \sum_{k > \alpha + \gamma} [\alpha(n_1 + R\tau) + \gamma(n_2 + R\tau) + k(n_3 + R\tau)]P(f = k | L_i) \\
 &= (1 - P_{1e}^\alpha) \frac{n_1 + R\tau}{1 - P_{1e}^\alpha} + P_{1e}^\alpha (1 - P_{2e}^\gamma) \frac{n_2 + R\tau}{1 - P_{2e}^\gamma} + P_{1e}^\alpha P_{2e}^\gamma \frac{n_3 + R\tau}{1 - P_{3e}}
 \end{aligned}$$

文献[13]中的(6)式为:

$$\begin{aligned}
 T_{M_i} &= \sum_{k \leq \gamma} k(n_2 + R\tau)P(f = k | M_i) + \sum_{k > \gamma} [\gamma(n_2 + R\tau) + k(n_3 + R\tau)]P(f = k | M_i) \\
 &= (1 - P_{2e}^\gamma) \frac{n_2 + R\tau}{1 - P_{2e}^\gamma} + P_{2e}^\gamma \frac{n_3 + R\tau}{1 - P_{3e}}
 \end{aligned}$$

(6)式包含两种情况:当 $k \leq \gamma - (i - 1)$ 时,表示数据分组从 M_i 状态开始发送,在M模式下经过 k 次传输后被成功接收;当 $k > \gamma - (i - 1)$ 时,表示数据分组从 M_i 状态开始发送,在M模式下经过 $\gamma - (i - 1)$ 次传输后未被成功接收,然后切换到H模式下经过 $k - [\gamma - (i - 1)]$ 次传输后才被正确接收。(6)式中对两种情况下 k 的范围的界定表示有误,用 $k \leq \gamma$ 和 $k > \gamma$ 代替了 $k > \gamma - (i - 1)$ 和 $k > \gamma - (i - 1)$,且(6)式中还有类似于(4)式的错误,即用 γ 和 k 表示了在M和H模式下的传输次数 $\gamma - (i - 1)$ 和 $k - [\gamma - (i - 1)]$ 。改正后的(6)式应为:

$$\begin{aligned}
 T_{M_i} &= \sum_{k \leq \gamma - (i - 1)} k(n_2 + R\tau)P(f = k | M_i) \\
 &\quad + \sum_{k > \gamma - (i - 1)} [(\gamma - (i - 1))(n_2 + R\tau) + (k - (\gamma - (i - 1)))(n_3 + R\tau)]P(f = k | M_i) \\
 &= (1 - P_{2e}^\gamma) \frac{n_2 + R\tau}{1 - P_{2e}^\gamma} + P_{2e}^\gamma \frac{n_3 + R\tau}{1 - P_{3e}}
 \end{aligned}$$

虽然(4)式和(6)式的分析思路和推导过程有错误,但最后结果都是正确的,这是由于文中的最大重传次数是无限的,当重传次数 k 趋于无穷大时, k 减去有限的几次,即 $k - \alpha$ 、 $k - \alpha - \gamma$ 、 $\gamma - (i - 1)$ 、 $k - [\gamma - (i - 1)]$ 等对结果没有影响。

文献[13]中的(5)式为:

$$P(f = k | X = M_i) = \begin{cases} P_{2e}^{k-1}(1 - P_{2e}) & k \leq \gamma \\ P_{2e}^\gamma P_{3e}^{k-\gamma-1}(1 - P_{3e}) & k > \gamma \end{cases}$$

文中(5)式表达的是数据分组从 M_i 状态开始发送经过 k 次传输接收成功的条件概率。当 $k \leq \gamma - (i - 1)$ 时,在M模式下经过 k 次传输后被成功接收,即前 $k - 1$ 次均接收失败,第 k 次接收成功,又由于在M模式下的一次传输错误的概率为 P_{2e} ,则条件概率为 $P_{2e}^{k-1}(1 - P_{2e})$;当 $k > \gamma - (i - 1)$ 时,在M模式下经过 $\gamma - (i - 1)$ 次传输后未被成功接收,然后切换到H模式下经过 $k - [\gamma - (i - 1)]$ 次传输后才被正确接收。即在

M 模式下的 $\gamma - (i - 1)$ 传输和 H 模式下的前 $k - [\gamma - (i - 1)] - 1$ 次传输均接收失败, 第 $k - [\gamma - (i - 1)]$ 次接收成功, 所以条件概率为 $P_{2e}^{\gamma - (i - 1)} P_{3e}^{k - [\gamma - (i - 1)] - 1} (1 - P_{3e})$ 。由上述分析可知 (5) 应改为:

$$P(f = k | X = M_i) = \begin{cases} P_{2e}^{k-1} (1 - P_{2e}) & k \leq \gamma - (i - 1) \\ P_{2e}^{\gamma - (i - 1)} P_{3e}^{k - [\gamma - (i - 1)] - 1} (1 - P_{3e}) & k > \gamma - (i - 1) \end{cases}$$

$$= \begin{cases} P_{2e}^{k-1} (1 - P_{2e}) & k \leq \gamma - i + 1 \\ P_{2e}^{\gamma - i + 1} P_{3e}^{k - \gamma + i - 2} (1 - P_{3e}) & k > \gamma - i + 1 \end{cases}$$

文献[13]在分析讨论 (c) 情况的时疏漏了从 H_i 状态开始发送数据分组经过 k 次传输被正确接收的条件概率, 对其补充如下:

$$P(f = k | X = H_i) = P_{3e}^{k-1} (1 - P_{3e})$$

3.2 TMGBN-ARQ 系统及其 Markov 模型的建立与分析

无线信道具有时变性, 针对信道不同噪声状况需要采取不同的传输机制。借鉴文献[11-13]思路构建三模式多状态的 TMGBN-ARQ 系统, 其传输机制为: 在发送端用计数器统计一个传输间隔内连续收到的肯定应答 (ACK) 和否定应答 (NAK) 数将信道噪声状况区分为低(Low)、高(High)和很高(Very high)三种状态, 分别采用 L、H 和 V 三种传输模式进行数据发送。即 L 模式下采用 SGBN-ARQ 方式, H 模式下采用 nGBN-ARQ 方式, V 模式下采用 CGBN-ARQ 方式。虽然理论上自适应的运行模式越多, 系统的性能会越好, 但也会使其物理装置更复杂, 反而降低了系统的可行性。由于 TMGBN-ARQ 系统的三种模式都是基于基本 GBN-ARQ 机制, 所以该系统的装置也较为简单, 易于实现。TMGBN-ARQ 系统采用哪一种模式传输分组取决于其连续收到的 ACK 或 NAK 的个数: 若发送端处于 L 模式下连续收到 α 个 NAK, 则切换到 H 模式下; 在 H 模式下连续收到 γ 个 NAK, 则切换到 V 模式下; 反之, 若在 H 模式下连续收到 β 个 ACK, 则切换到 L 模式下传输。同样若在 V 模式下连续收到 δ 个 ACK 则切换到 H 模式下传输 (如图 3.1 所示)。

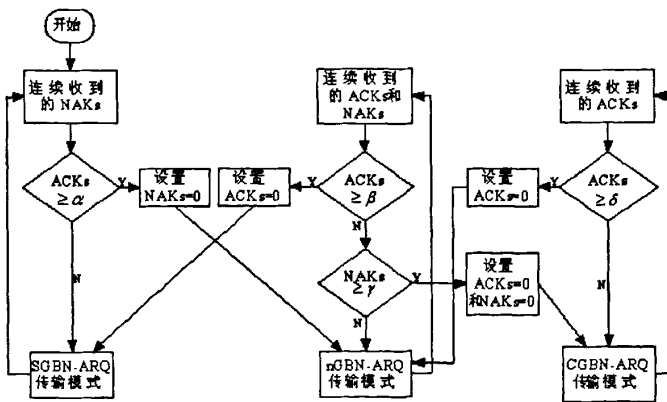


图 3.1 TMGBN-ARQ 系统传输原理

与文献[13]不同的是本文是在重传次数有限的情况下进行分析的，并且所采用基本传输机制比其单一的 SW-ARQ 更为有效。另外，本文假设所有的应答信息在发送端可以无差错地的接收到，即系统的反馈信道是无噪的。由于在这种自适应传输机制下，传输模式及信道状况完全依赖于连续收到的 ACK 或 NAK 的个数，因此，对自适应 TM-ARQ 系统可以用 $(\alpha + \beta + \gamma - 1 + \delta)$ 状态的 Markov 链来表示，如图 3.2 所示。

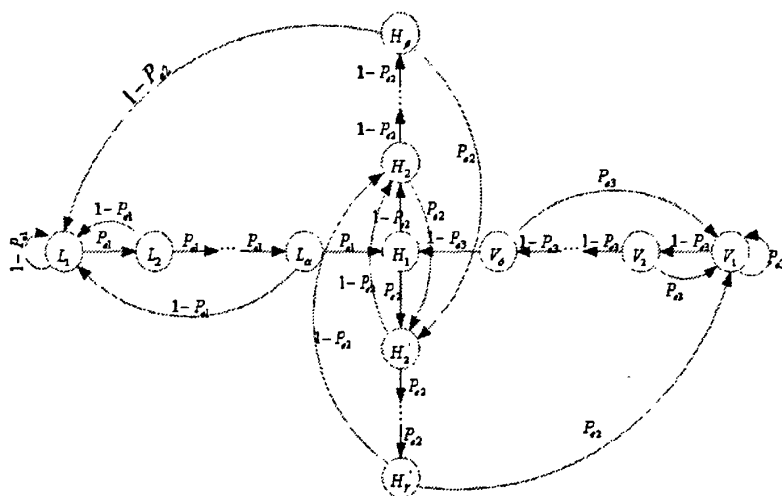


图 3.2 TMGBN-ARQ 系统状态转移图

1) 状态 1、2、...、 α 用 L_i 表示，其中 $i=1, 2, \dots, \alpha$ 。此时发送端处于 L 传输模式且连续收到 $i-1$ 个 NAK 应答，信道分组错误率为 P_{e1} 。

2) 状态 $\alpha+1, \alpha+2, \dots, \alpha+\beta$ 用 H_i 表示，其中 $i=1, 2, \dots, \beta$ 。此时发送端处于 H 传输模式且连续收到 $i-1$ 个 ACK 应答，信道分组错误率为 P_{e2} 。

3) 状态 $\alpha+\beta+1, \alpha+\beta+2, \dots, \alpha+\beta+\gamma-1$ 用 H'_i 表示，其中 $i=2, \dots, \gamma$ 。此时发送端处于 H 传输模式且连续收到 $i-1$ 个 NAK 应答，信道分组错误率为 P_{e2} 。

4) 状态 $\alpha+\beta+\gamma, \alpha+\beta+\gamma+1, \dots, \alpha+\beta+\gamma-1+\delta$ 用 V_i 表示，其中 $i=1, 2, \dots, \delta$ 。

此时发送端处于 H 传输模式且连续收到 $i-1$ 个 NAK 应答，信道分组错误率为 P_{e3} 。

因此，可以得出状态转移矩阵如下。其中 $p_{i,j}$ 为由状态 i 转移到状态 j 的转移概率， p_j 为状态 j 的稳态概率。

1) 当 $j=1, 2, \dots, \alpha-1$ 时， $p_{j,1}=(1-P_{e1})p_j, p_{j,j+1}=P_{e1}p_j$;

2) 当 $j=\alpha$ 时， $p_{j,1}=(1-P_{e1})p_j$;

3) 当 $j=\alpha+1, \alpha+2, \dots, \alpha+\beta-1$ 时， $p_{j,j+1}=(1-P_{e2})p_j, p_{j,\alpha+\beta+1}=P_{e2}p_j$;

4) 当 $j=\alpha+\beta$ 时， $p_{j,j+1}=P_{e2}p_j, p_{j,1}=(1-P_{e2})p_j$

5) 当 $j=\alpha+\beta+1, \dots, \alpha+\beta+\gamma-2$ 时， $p_{j,j+1}=P_{e2}p_j, p_{j,\alpha+2}=(1-P_{e2})p_j$;

6) 当 $j=\alpha+\beta+\gamma-1$ 时， $p_{j,\alpha+2}=(1-P_{e2})p_j, p_{j,j+1}=P_{e2}p_j$;

7) 当 $j = \alpha + \beta + \gamma, \alpha + \beta + \gamma + 1, \dots, \alpha + \beta + \gamma - 1 + \delta - 1$ 时, $p_{j,j+1} = (1 - P_{e3})p_j$, $p_{j,\alpha+\beta+\gamma} = P_{e3}p_j$;

8) 当 $j = \alpha + \beta + \gamma - 1 + \delta$ 时, $p_{j,\alpha+1} = (1 - P_{e3})p_j$ 。

由稳态分布 $\pi = (p_1, p_2, \dots, p_{\alpha+\beta+\gamma+\delta-1})$ 所满足的稳态方程 $\pi P = \pi$, 即

$$\left\{ \begin{array}{l} p_1 p_{12} = p_2 p_{21} + \dots + p_\alpha p_{\alpha,1} + p_{\alpha+\beta} p_{\alpha+\beta,1} \\ p_j p_{j,j+1} = p_{j+1} \quad 1 \leq j \leq \alpha - 1 \\ p_\alpha p_{\alpha,\alpha+1} + p_{\alpha+\beta+\gamma-1+\delta} p_{\alpha+\beta+\gamma-1+\delta,\alpha+1} = p_{\alpha+1} \\ p_{\alpha+1} p_{\alpha+1,\alpha+2} + \sum_{j=\alpha+\beta+1}^{\alpha+\beta+\gamma-1} p_j p_{j,\alpha+2} = p_{\alpha+2} \\ \sum_{j=\alpha+1}^{\alpha+\beta} p_j p_{j,\alpha+\beta+1} = p_{\alpha+\beta+1} \\ p_j p_{j,j+1} = p_{j+1} \quad \alpha + 3 \leq j \leq \alpha + \beta - 1 \\ p_j p_{j,j+1} = p_{j+1} \quad \alpha + \beta + 2 \leq j \leq \alpha + \beta + \gamma - 2 \\ \sum_{j=\alpha+\beta+\gamma-1}^{\alpha+\beta+\gamma-1+\delta} p_j p_{j,\alpha+\beta+\gamma} = p_{\alpha+\beta+\gamma} \\ p_j p_{j,j+1} = p_{j+1} \quad \alpha + \beta + \gamma \leq j \leq \alpha + \beta + \gamma + \delta - 2 \end{array} \right.$$

及 $\sum_{k=1}^{\alpha} p_{L_k} + \sum_{k=1}^{\beta} p_{H_k} + \sum_{k=2}^{\gamma} p_{H'_k} + \sum_{k=1}^{\delta} p_{V_k} = 1$ 可解得:

$$p_i = p_{L_i} = K P_{e1}^{i-1} P_{e2} (1 - P_{e2})^{\beta-1} (1 - P_{e2}^\gamma) (1 - P_{e3})^\delta, \quad i=1, 2, \dots, \alpha;$$

$$p_{\alpha+1} = p_{H_1} = K P_{e1}^\alpha [P_{e2}^\gamma - P_{e2}^\gamma (1 - P_{e2})^{\beta-1} + P_{e2} (1 - P_{e2}^\gamma)^{\beta-1}] (1 - P_{e3})^\delta;$$

$$p_{\alpha+i} = p_{H_i} = K P_{e1}^\alpha P_{e2} (1 - P_{e2})^{i-2} (1 - P_{e2}^\gamma) (1 - P_{e3})^\delta, \quad i=2, 3, \dots, \beta;$$

$$p_{\alpha+\beta+i-1} = p_{H'_i} = K P_{e1}^\alpha P_{e2}^{i-1} (1 - (1 - P_{e2})^\beta) (1 - P_{e3})^\delta, \quad i=2, 3, \dots, \gamma;$$

$$p_{\alpha+\beta+\gamma+i-1} = p_{V_i} = K P_{e1}^\alpha P_{e2}^\gamma (1 - (1 - P_{e2})^\beta) (1 - P_{e3})^{i-1}, \quad i=1, 2, \dots, \delta;$$

$$\text{其中 } K = \frac{1}{P_{e1}^4 P_{e2}^4}.$$

根据文献[13]提出的等效时延思想, 一个数据分组传输的等效时延为一个传输周期, 一个数据分组传输成功即为一个传输周期结束, 也即开始一个新的数据分组的传输。根据 TMGBN-ARQ 的传输机制, 一个新的数据分组开始传输时发送端只能处于状态 L_i, H_i ($i=1, 2, \dots, \beta$) 和 V_j ($j=2, 3, \dots, \delta$) 之一。假设 T_1, T_2 和 T_3 分别为模式 L、H 和 V 下发送一个分组的往返时延。定义 X 为描述新数据分组开始传输时发送端所处状态的状态变量, 用 f 表示一个数据分组从开始传输到传输成功总的传输次数。考虑到实际工程中一个分组的传输次数是有限的, 当超过规定的次数时该数据分组将被丢弃, 假设一个数据分组的最大传输次数为 n 。当传输超过 n 次后尽管该分组还未被正确接收, 但仍然会被丢弃。根据一个新

数据分组开始发送时发送端所处的状态，可出现如下三种情况：

(1)发送端从状态 L_1 开始传输一个新的数据分组，传输次数不超过 α 时处于 L 模式，超过 α 但不超过 $\alpha+\gamma$ 时处于 H 模式，超过 $\alpha+\gamma$ 时处于 V 模式。其条件概率为：

$$P(f=k|X=L_1)=\begin{cases} P_{e1}^{k-1}(1-P_{e1}) & k \leq \alpha \\ P_{e1}^\alpha P_{e2}^{k-\alpha-1}(1-P_{e2}) & \alpha < k \leq \alpha+\gamma \\ P_{e1}^\alpha P_{e2}^\gamma P_{e3}^{k-\alpha-\gamma-1}(1-P_{e3}) & k > \alpha+\gamma \end{cases}$$

从状态 L_1 开始发送数据分组的时延为：

$$\begin{aligned} T_{L_1} &= \sum_{k=1}^{\alpha} kT_1 P(f=k|X=L_1) + \sum_{k=\alpha+1}^{\alpha+\gamma} (\alpha T_1 + (k-\alpha)T_2) P(f=k|X=L_1) + \\ &\quad \sum_{k=\alpha+\gamma+1}^n (\alpha T_1 + \gamma T_2 + (k-\alpha-\gamma)T_3) P(f=k|X=L_1) \\ &= (1-P_{e1}^\alpha) \frac{T_1}{1-P_{e1}} + P_{e1}^\alpha (1-P_{e2}^\gamma) \frac{T_2}{1-P_{e2}} + \\ &\quad P_{e1}^\alpha P_{e2}^\gamma (T_3 \frac{1-P_{e3}^{n-\alpha-\gamma}}{1-P_{e3}} - P_{e3}^{n-\alpha-\gamma} ((n-\alpha-\gamma)T_3 + \alpha T_1 + \gamma T_2)) \end{aligned}$$

(2)发送端从状态 H_i ($i=1, 2, \dots, \beta$) 开始传输一个新的数据分组，若传输次数不超过 $\gamma-i+1$ 时处于 H 模式，超过 $\gamma-i+1$ 时处于 V 模式。其条件概率为：

$$\begin{aligned} P(f=k|X=H_i) &= \begin{cases} P_{e2}^{k-1}(1-P_{e2}) & k \leq \gamma-(i-1) \\ P_{e2}^{\gamma-(i-1)} P_{e3}^{k-[\gamma-(i-1)]-1}(1-P_{e3}) & k > \gamma-(i-1) \end{cases} \\ &= \begin{cases} P_{e2}^{k-1}(1-P_{e2}) & k \leq \gamma-i+1 \\ P_{e2}^{\gamma-i+1} P_{e3}^{k-\gamma+i-2}(1-P_{e3}) & k > \gamma-i+1 \end{cases} \end{aligned}$$

从状态 H_i 开始发送数分组的时延为：

$$\begin{aligned} T_{H_i} &= \sum_{k=1}^{\gamma-i+1} kT_2 P(f=k|X=H_i) + \\ &\quad \sum_{k=\gamma-i+2}^n ((\gamma-i+1)T_2 + (k-\gamma+i-1)T_3) P(f=k|X=H_i) \\ &= (1-P_{e2}^{\gamma-i+1}) \frac{T_2}{1-P_{e2}} + P_{e2}^{\gamma-i+1} (T_3 \frac{1-P_{e3}^{n-\gamma+i-1}}{1-P_{e3}} \\ &\quad - P_{e3}^{n-\gamma+i-2} ((\gamma-i+1)T_2 + (n-\gamma+i-1)T_3 P_{e3})) \end{aligned}$$

(3)发送端从状态 V_i ($i=1, 2, \dots, \delta$) 开始传输一个新的数据分组，则处于 V 模式。其条件概率为：

$$P(f=k|X=V_i) = P_{e3}^{k-1}(1-P_{e3})$$

从状态 V_i 开始发送数据分组的时延为：

$$T_{V_i} = \sum_{k=1}^n k T_3 P(f=k | X=V_i) = T_3 \left(\frac{1-P_{e3}^n}{1-P_{e3}} - n P_{e3}^n \right)$$

因此, TMGBN-ARQ 系统数据分组的平均时延为:

$$T = T_L P_L + \sum_{i=1}^{\beta} T_{H_i} P_{H_i} + \sum_{j=2}^{\delta} T_{V_j} P_{V_j}$$

3.3 数值模拟分析

为了验证本文所构造 TMGBN-ARQ 系统的有效性, 我们利用所建 Markov 模型在 MATLAB 环境下对其进行了仿真, 结果见图 3.3—图 3.5。由图 3.3 可见, 参数 α 、 β 、 γ 和 δ 对时延的影响, 当信道分组错误率 Pe 很大 (大于 0.8) 时, 虽然 α 、 β 、 γ 和 δ 的取值不同, 但系统的时延趋于相同, 这说明当 Pe 很大 (大于 0.8) 时, 参数 α 、 β 、 γ 和 δ 对时延影响甚微。由图 3.4 可见, 在 Pe 较小 (小于 0.5) 的情况下, 尽管最大传输次数 n 的取值不同, 但时延相同, 当 Pe 较大 (大于 0.5) 时最大传输次数 n 的不同取值对应的时延不同。这是由于 Pe 较小时, 分组的传输次数相对于最大传输次数 n 较小时就已经传输成功, 因而最大传输次数 n 对时延几乎没有影响; 当 Pe 较大时, 分组的传输次数要接近或达到最大传输次数 n 时才传输成功, 这时最大传输次数 n 对时延有较大的影响。此时, 如果最大传输次数 n 的取值较小, 则可能使有些分组因为传输次数达到最大传输次数 n 时还未传输成功而被丢弃, 这将导致平均时延较大。由图 3.5 可见, 参数 T_1 、 T_2 和 T_3 取不同的值时对应的时延不同, 且时延随着取值的增大而增加。因此, 可以通过改进发送设备和接收设备的处理能力来降低时延。

虽然系统时延曲线的走势大致相同, 都是时延随着 Pe 的增大而增加, 但系统参数的不同取值对应的系统时延不同。所以, 可以得出, 能够通过选取最佳的系统参数值使时延达到最小, 从而使整个网络的性能达到最优。

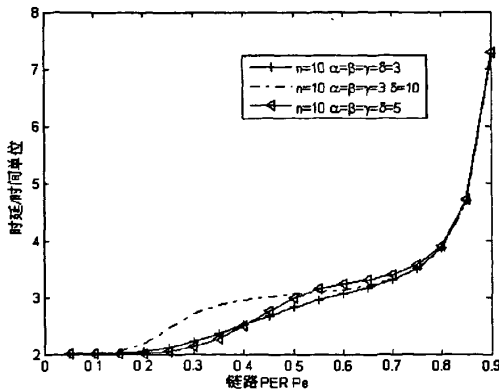


图 3.3 不同的 α 、 β 、 γ 和 δ 对 TMGBN-ARQ 系统时延的影响

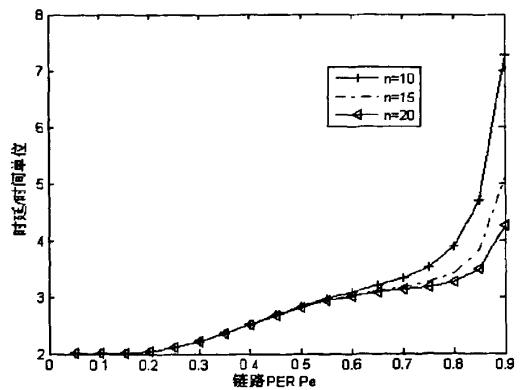


图 3.4 不同的 n 对 TMGBN-ARQ 系统时延的影响

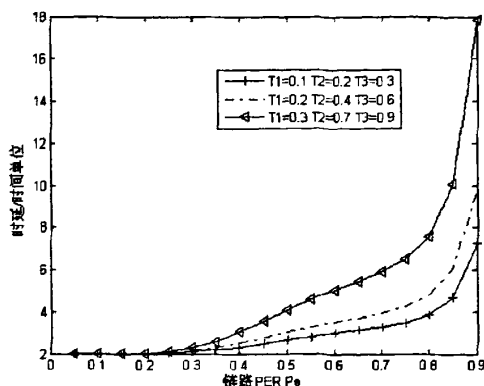


图 3.5 不同的 T_1 、 T_2 和 T_3 对 TMGBN-ARQ 系统时延的影响

3.4 结论与分析

针对无线通信中信道的时变特性,基于三种基本的 GBN-ARQ 传输机制和前向链路不同的噪声状况,建立了一个新的自适应 TMGBN-ARQ 系统及其 Markov 分析模型,从解析分析和仿真分析两方面对该系统的时延性能进行了较为深刻的研究。虽然无线信道中分组错误率在一个较大的范围内变化,但由于系统自适应地采用不同的传输模式传输数据分组,因而系统能够有效的降低其服务时延,提高网络的吞吐量,使整个网络的性能得到改善。

文中所建的三模式 $\alpha+\beta+\gamma-1+\delta$ 状态的自适应 ARQ 系统是对两模式自适应 ARQ 系统的发展和完善。这样尽管系统复杂度相对于两模式自适应 ARQ 系统有所增加,但有效的提高了 ARQ 系统的传输效率。三模式 $\alpha+\beta+\gamma-1+\delta$ 状态的自适应 ARQ 系统对系统的运行状态比两模式自适应 ARQ 系统分得更加细致,因而所得结果也更加精确,更加符合实际。还启迪我们今后可以把系统的运行模式可以分得更细、更多,系统的状态分得更细、更多,这样使得 ARQ 系统的传输效率不断提高。

在实际工程中系统参数的选取与发送端和接收端设备的处理能力、信道错误率的时变情况等诸多因素有关,仿真中所选的系统参数虽然不一定是实际中的最佳参数,但本文的研究对于实际工程中合理选择最佳的系统参数具有一定的指导意义。由于考虑重传次数受限的实际情况,这样更加贴近工程实际,使得研究具有实际意义。文中的研究思路和方法对于研究 SW-ARQ 及 SR-ARQ 等同类问题提供了可借鉴的思想。

3.5 本章总结

本章基于 3 种基本的 GBN-ARQ(即 SGBN-ARQ、nGBN-ARQ 和 CGBN-ARQ)构建了自适应的 GBN-ARQ 系统,建立了准确描述其传输机制和原理的 Markov 模型,获得了时延解析式,并分析了各个参数对系统时延的影响。本模型可以应

用于对其它的自动重传系统进行的时延性能分析，为找到降低系统时延提高系统传输效率提供了可借鉴的模型基础。

第 4 章 基于自适应帧长技术的

SW-ARQ 系统时延性能分析

在无线移动通信中，由于多径效应和阴影衰落等引起的突发错误使无线信道具有时变性，信道的状况时好时坏。显然在这样的时变信道下，单一的差错控制技术难以达到较高的系统性能。只有根据信道噪声状况的不同采取自适应的差错控制技术，才能实现数据可靠、有效的传输。停等式 ARQ (SW-ARQ) 由于其设备简单且能够达到很低的差错率而被广泛应用于无线通信数据链路层进行差错控制。

考虑到实际通信中数据帧的重传次数是受限的，构建了重传次数有限的自适应 SW-ARQ 系统。在系统中采用了自适应帧长技术，根据连续收到的应答帧 ACK 或 NAK 的个数将信道噪声状况区分为低、高和很高三种状态，且根据不同的信道状态发送不同帧长的数据帧，信道噪声处于低状态时发送帧长较长的数据帧，信道噪声处于高状态时发送帧长较小的数据帧，信道噪声处于很高的状态是发送更小的数据帧。用发送相邻两帧间的时延 τ 和数据率 R 表示不同状态下发送一帧的等效时延，在此基础上建立了描述自适应 SW-ARQ 系统传输机制和原理的 Markov 模型，对其时延性能进行了分析研究。

4.1 三模式下 SW-ARQ 系统描述与建模

根据无线信道具有时变性，针对信道不同噪声状况采取了不同的传输机制，其传输机制为：发送端 SW-ARQ 机制采用 L、H 和 V 三种模式进行数据发送，这三种模式分别对应信道的噪声状况低(Low)，高(High)和很高(Very high)。在这种自适应机制下信道状况信息由接收端连续收到的 ACK 和 NAK 数来反应，即采用那一种模式由连续收到的 ACK 或连续收到的 NAK 数确定：若发送端处于 L 模式下连续收到 α 个 NAK 则切换到 H 模式下，在 H 模式下连续收到 γ 个 NAK 则切换到 V 模式下，反之，若在 H 模式下连续收到 β 个 ACK 则切换到 L 模式下传输，同样若在 V 模式下连续收到 δ 个 ACK 则切换到 H 模式下。文中假设反馈信道是无差错的，即应答帧不会出错。

由于在这种自适应传输机制下，传输模式及对信道状况的估计完全依赖于连续收到的 ACK 或 NAK 的个数，因此，对自适应 SW-ARQ 系统可以建立 $(\alpha + \beta + \gamma - 1 + \delta)$ 状态的 Markov 模型，如图 4.1 所示。

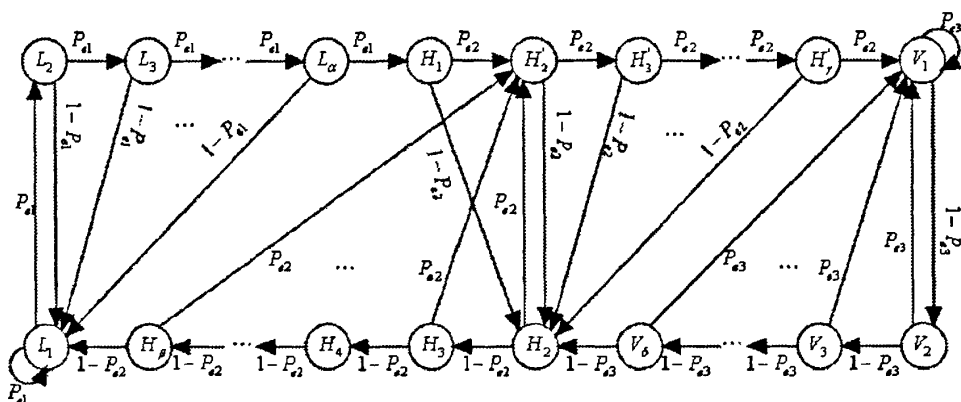


图 4.1 自适应 SW-ARQ 系统的状态转移图

1) 状态 1、2、 \dots 、 α 用 L_i 表示，其中 $i=1, 2, \dots, \alpha$ 。此时发送端处于 L 传输模式且连续收到 $i-1$ 个 NAK 应答帧，链路的错误率为 P_{e1} 。

2) 状态 $\alpha+1, \alpha+2, \dots, \alpha+\beta$ 用 H_i 表示，其中 $i=1, 2, \dots, \beta$ 。此时发送端处于 H 传输模式且连续收到 $i-1$ 个 ACK 应答帧，链路的错误率为 P_{e2} 。

3) 状态 $\alpha+\beta+1, \alpha+\beta+2, \dots, \alpha+\beta+\gamma-1$ 用 H'_i 表示，其中 $i=2, \dots, \gamma$ 。此时发送端处于 H 传输模式且连续收到 $i-1$ 个 NAK 应答帧，链路的错误率为 P_{e2} 。

4) 状态 $\alpha+\beta+\gamma, \alpha+\beta+\gamma+1, \dots, \alpha+\beta+\gamma-1+\delta$ 用 V_i 表示，其中 $i=1, 2, \dots, \delta$ 。此时发送端处于 H 传输模式且连续收到 $i-1$ 个 NAK 应答帧，链路的错误率为 P_{e3} 。

因此，可以得出状态转移矩阵如下。其中 $p_{i,j}$ 为由状态 i 转移到状态 j 的转移概率， p_j 为状态 j 的稳态概率。

1) 当 $j=1, 2, \dots, \alpha-1$ 时， $p_{j,1}=(1-P_{e1})p_j$ ， $p_{j,j+1}=P_{e1}p_j$ ；

2) 当 $j=\alpha$ 时， $p_{j,1}=(1-P_{e1})p_j$ ；

3) 当 $j=\alpha+1, \alpha+2, \dots, \alpha+\beta-1$ 时， $p_{j,j+1}=(1-P_{e2})p_j$ ， $p_{j,\alpha+\beta+1}=P_{e2}p_j$ ；

4) 当 $j=\alpha+\beta$ 时， $p_{j,j+1}=P_{e2}p_j$ ， $p_{j,1}=(1-P_{e2})p_j$ ；

5) 当 $j=\alpha+\beta+1, \dots, \alpha+\beta+\gamma-2$ 时， $p_{j,j+1}=P_{e2}p_j$ ， $p_{j,\alpha+\beta+2}=(1-P_{e2})p_j$ ；

6) 当 $j=\alpha+\beta+\gamma-1$ 时， $p_{j,\alpha+\beta+2}=(1-P_{e2})p_j$ ， $p_{j,j+1}=P_{e2}p_j$ ；

7) 当 $j=\alpha+\beta+\gamma, \alpha+\beta+\gamma+1, \dots, \alpha+\beta+\gamma-1+\delta-1$ 时， $p_{j,j+1}=(1-P_{e3})p_j$ ，

$p_{j,\alpha+\beta+\gamma}=P_{e3}p_j$ ；

8) 当 $j=\alpha+\beta+\gamma-1+\delta$ 时， $p_{j,\alpha+1}=(1-P_{e3})p_j$ 。

由稳态分布 $\pi=(p_1, p_2, \dots, p_{\alpha+\beta+\gamma+\delta-1})$ 所满足的稳态方程 $\pi P=\pi$ ，即：

$$\begin{cases}
 p_1 p_{12} = p_2 p_{21} + \dots + p_\alpha p_{\alpha,1} + p_{\alpha+\beta} p_{\alpha+\beta,1} \\
 p_j p_{j,j+1} = p_{j+1} \quad 1 \leq j \leq \alpha-1 \\
 p_\alpha p_{\alpha,\alpha+1} + p_{\alpha+\beta+\gamma-1+\delta} p_{\alpha+\beta+\gamma-1+\delta,\alpha+1} = p_{\alpha+1} \\
 p_{\alpha+1} p_{\alpha+1,\alpha+2} + \sum_{j=\alpha+\beta+1}^{\alpha+\beta+\gamma-1} p_j p_{j,\alpha+2} = p_{\alpha+2} \\
 \sum_{j=\alpha+1}^{\alpha+\beta} p_j p_{j,\alpha+\beta+1} = p_{\alpha+\beta+1} \\
 p_j p_{j,j+1} = p_{j+1} \quad \alpha+3 \leq j \leq \alpha+\beta-1 \\
 p_j p_{j,j+1} = p_{j+1} \quad \alpha+\beta+2 \leq j \leq \alpha+\beta+\gamma-2 \\
 \sum_{j=\alpha+\beta+\gamma-1}^{\alpha+\beta+\gamma-1+\delta} p_j p_{j,\alpha+\beta+\gamma} = p_{\alpha+\beta+\gamma} \\
 p_j p_{j,j+1} = p_{j+1} \quad \alpha+\beta+\gamma \leq j \leq \alpha+\beta+\gamma+\delta-2
 \end{cases}$$

及 $\sum_{k=1}^{\alpha} p_{L_k} + \sum_{k=1}^{\beta} p_{H_k} + \sum_{k=2}^{\gamma} p_{H'_k} + \sum_{k=1}^{\delta} p_{V_k} = 1$ 可解得:

$$p_i = p_{L_i} = K P_{e1}^{i-1} P_{e2} (1-P_{e2})^{\beta-1} (1-P_{e2}^\gamma) (1-P_{e3})^\delta, \quad i=1, 2, \dots, \alpha;$$

$$p_{\alpha+1} = p_{H_1} = K P_{e1}^\alpha [P_{e2}^\gamma - P_{e2}^\gamma (1-P_{e2})^{\beta-1} + P_{e2} (1-P_{e2}^\gamma)^{\beta-1}] (1-P_{e3})^\delta;$$

$$p_{\alpha+i} = p_{H_i} = K P_{e1}^\alpha P_{e2} (1-P_{e2})^{i-2} (1-P_{e2}^\gamma) (1-P_{e3})^\delta, \quad i=2, 3, \dots, \beta;$$

$$p_{\alpha+\beta+i-1} = p_{H'_i} = K P_{e1}^\alpha P_{e2}^{i-1} (1-(1-P_{e2})^\beta) (1-P_{e3})^\delta, \quad i=2, 3, \dots, \gamma;$$

$$p_{\alpha+\beta+\gamma+i-1} = p_{V_i} = K P_{e1}^\alpha P_{e2}^\gamma (1-(1-P_{e2})^\beta) (1-P_{e3})^{i-1}, \quad i=1, 2, \dots, \delta;$$

$$\text{其中 } K = \frac{1}{P_{e1} P_{e2}^\alpha}.$$

4.2 三模式下 SW-ARQ 系统时延性能分析

在 SW-ARQ 中, 发送端发送一帧后等待应答帧。如果接收端正确接收则返回一个 ACK 帧, 否则返回一个 NAK 帧请求重传。因此一个新的数据帧只有在其前面的帧被正确接收后才能开始发送。即一个新的数据帧开始发送时发送端只能处于状态 L_i 、 H_i , $i=1, 2, \dots, \beta$ 和 V_j , $j=2, 3, \dots, \delta$ 。根据一个新数据分组开始发送时发送端所处的状态, 可分如下三种情况:

(1) 发送端从状态 L_i 开始传输一个新的数据分组, 传输次数不超过 α 时处于 L 模式, 超过 α 但不超过 $\alpha+\gamma$ 时处于 H 模式, 超过 $\alpha+\gamma$ 时处于 V 模式。其条件概率为:

$$P(f = k | X = L_1) = \begin{cases} P_{e1}^{k-1}(1 - P_{e1}) & k \leq \alpha \\ P_{e1}^\alpha P_{e2}^{k-\alpha-1}(1 - P_{e2}) & \alpha < k \leq \alpha + \gamma \\ P_{e1}^\alpha P_{e2}^\gamma P_{e3}^{k-\alpha-\gamma-1}(1 - P_{e3}) & k > \alpha + \gamma \end{cases}$$

从状态 L_1 开始发送数据帧的时延为:

$$\begin{aligned} T_{L_1} &= \sum_{k=1}^{\alpha} k(n_1 + R\tau)P(f = k | X = L_1) \\ &\quad + \sum_{k=\alpha+1}^{\alpha+\gamma} (\alpha(n_1 + R\tau) + (k - \alpha)(n_2 + R\tau))P(f = k | X = L_1) \\ &\quad + \sum_{k=\alpha+\gamma+1}^n (\alpha(n_1 + R\tau) + \gamma(n_2 + R\tau) + (k - \alpha - \gamma)(n_3 + R\tau))P(f = k | X = L_1) \\ &= (1 - P_{e1}^\alpha) \frac{n_1 + R\tau}{1 - P_{e1}} + P_{e1}^\alpha (1 - P_{e2}^\gamma) \frac{n_2 + R\tau}{1 - P_{e2}} + P_{e1}^\alpha P_{e2}^\gamma ((n_3 + R\tau) \frac{1 - P_{e3}^{n-\alpha-\gamma}}{1 - P_{e3}} \\ &\quad - P_{e3}^{n-\alpha-\gamma} ((n - \alpha - \gamma)(n_3 + R\tau) + \alpha(n_1 + R\tau) + \gamma(n_2 + R\tau))) \end{aligned}$$

(2) 发送端从状态 $H_i (i=1, 2, \dots, \beta)$ 开始传输一个新的数据分组, 若传输次数不超过 $\gamma - i + 1$ 时处于 H 模式, 超过 $\gamma - i + 1$ 时处于 V 模式。其条件概率为:

$$\begin{aligned} P(f = k | X = H_i) &= \begin{cases} P_{e2}^{k-1}(1 - P_{e2}) & k \leq \gamma - (i - 1) \\ P_{e2}^{\gamma-(i-1)} P_{e3}^{k-[\gamma-(i-1)]-1}(1 - P_{e3}) & k > \gamma - (i - 1) \end{cases} \\ &= \begin{cases} P_{e2}^{k-1}(1 - P_{e2}) & k \leq \gamma - i + 1 \\ P_{e2}^{\gamma-i+1} P_{e3}^{k-\gamma+i-2}(1 - P_{e3}) & k > \gamma - i + 1 \end{cases} \end{aligned}$$

从状态 H_i 开始发送数据帧的时延为:

$$\begin{aligned} T_{H_i} &= \sum_{k=1}^{\gamma-i+1} k(n_2 + R\tau)P(f = k | X = H_i) \\ &\quad + \sum_{k=\gamma-i+2}^n ((\gamma - i + 1)(n_2 + R\tau) + (k - \gamma + i - 1)(n_3 + R\tau))P(f = k | X = H_i) \\ &= (1 - P_{e2}^{\gamma-i+1}) \frac{(n_2 + R\tau)}{1 - P_{e2}} + P_{e2}^{\gamma-i+1} ((n_3 + R\tau) \frac{1 - P_{e3}^{n-\gamma+i-1}}{1 - P_{e3}} \\ &\quad - P_{e3}^{n-\gamma+i-2} ((\gamma - i + 1)(n_2 + R\tau) + (n - \gamma + i - 1)(n_3 + R\tau) p_{e3})) \end{aligned}$$

(3) 发送端从状态 $V_i (i=1, 2, \dots, \delta)$ 开始传输一个新的数据分组, 则处于 V 模式, 其条件概率为:

$$P(f = k | X = V_i) = P_{e3}^{k-1}(1 - P_{e3})$$

从状态 V_i 开始发送数据帧的时延为:

$$T_{V_i} = \sum_{k=1}^n k(n_3 + R\tau)P(f = k | X = V_i) = (n_3 + R\tau) \left(\frac{1 - P_{e3}^n}{1 - P_{e3}} - n P_{e3}^n \right)$$

因此, 自适应三模式下 SW-ARQ 系统数据分组的平均时延为:

$$T = T_L p_L + \sum_{i=1}^{\beta} T_{H_i} p_{H_i} + \sum_{j=2}^{\delta} T_{V_j} p_{V_j}$$

4.3 数值模拟分析

为了验证重传次数受限的自适应 SW-ARQ 系统的有效性，我们在 MATLAB 环境下对所建系统模型进行了仿真分析，结果见图 4.2 和图 4.3。图 2 体现的是参数 α 、 β 、 γ 和 δ 对系统时延的影响，当信道错误率 Pe 很大时，虽然这些参数的取值不同，但系统的时延趋于相同，这说明当 Pe 很大时，参数 α 、 β 、 γ 和 δ 对时延影响甚微。由图 3 可见，在 Pe 较小（小于 0.5）的情况下，尽管最大传输次数 n 的取值不同，但时延相同，当 Pe 较大（大于 0.5）时最大传输次数 n 的不同取值对应的时延不同。这是由于 Pe 较小时，分组的传输次数相对于最大传输次数 n 较小时就已经传输成功，因而最大传输次数 n 对时延几乎没有影响；当 Pe 较大时，分组的传输次数要接近或达到最大传输次数 n 时才传输成功，这时最大传输次数 n 对时延有较大的影响。此时，如果最大传输次数 n 的取值较小，则可能使有些分组因为传输次数达到最大传输次数 n 时还未传输成功而被丢弃，这将导致平均时延较大。

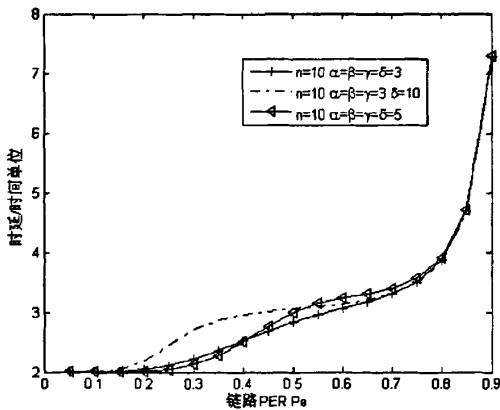


图 4.2 不同的 α 、 β 、 γ 和 δ 对自适应 SW-ARQ 系统时延的影响

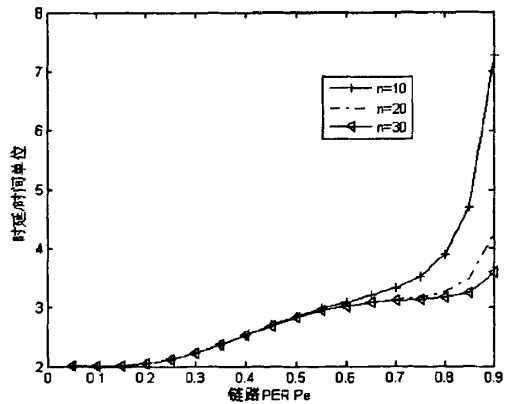


图 4.3 不同的 n 对自适应 SW-ARQ 系统时延的影响

4.4 结论与分析

本文对目前多数文献中对自适应 ARQ 系统的研究是在重传次数不受限制情况做了改进与完善。由于实际工程中重传次数是要受到限制的，所以文中在重传次数有限的情况下，对自适应 ARQ 系统重新建立了 Markov 模型，对系统的时延性能做了分析。最后利用 MATLAB 软件对改进前后的系统性能做了仿真分析，结果表明该系统性能明显提高，能够提供较小的系统时延，从而有利于提高整个网络的性能。

由于本文是在重传次数有限的情况下进行研究的，这样更加贴近工程实际，使得研究具有实际意义。文中所采用的研究方法思路可以借鉴到其他同类问题的研究中。在以后的工作中，我们将要对系统参数进行优化分析，通过优化得到最佳参数使得系统性能达到最高。

4.5 本章总结

在基本的 ARQ 协议中 SW-ARQ 因发送和接收设备简单易于实现而被广泛应用。本章采用了自适应帧长技术，建立了自适应 SW-ARQ 系统，根据无线信道质量的不同而发送不同帧长的数据帧，信道质量好时发送帧长较长的数据帧，信道质量变差时则发送帧长较小的数据帧，以此来提高系统的数据传输效率。

第 5 章 结论与展望

衡量网络传输能力的重要标志之一是将一个分组从源节点传到目的节点的时延。本文研究的重点是围绕无线网络数据链路层重要的差错控制技术 ARQ 的时延模型展开的。首先介绍了无线通信系统的基本概况及 ARQ 技术的研究现状和最新发展。其次构建了自适应三模式多状态的 ARQ 系统，通过建立 Markov 模型和仿真分析对系统的时延性能作了研究。最后根据无线信道的时变特性利用自适应帧长技术，建立自适应的 SW-ARQ 系统模型，对系统时延作了研究。论文的主要内容如下：

1、深入分析和比较说明了传统 ARQ 协议以及三种混合型 ARQ 协议的传输机制和传输原理。对传输设备简单实现复杂度最小的 SW-ARQ 协议传输效率进行了简洁准确的分析。还对单模式 GBN-ARQ 协议的传输效率及数据帧帧长对传输效率的关系进行了理论推导和仿真分析。如果帧长较长，在数据帧传输过程中，因信道错误率的存在而导致传输错误的概率较大，重传次数将增大，这也会导致系统传输效率下降。因此，存在一个最佳帧长使得系统传输效率最高。基于此推导获得了最佳帧长的数学表达式。

2、根据无线信道的时变特性，针对不同的信道噪声状况采取不同的传输机制，构建了基于 SGBN-ARQ、nGBN-ARQ 和 CGBN-ARQ 三种基本的 GBN-ARQ 自适应三模式多状态的 ARQ 系统，系统中在信道噪声较低时采用 SGBN-ARQ 传输模式，信道噪声较高时采用 nGBN-ARQ 传输模式，信道噪声很高时采用 CGBN-ARQ 传输模式。考虑到工程实际中数据帧的最大重传次数是有限制的，在重传次数受限的条件下建立了准确描述系统传输原理的 Markov 模型，求得了用信道错误率表示的各个状态的稳态概率和不同状态下分组发送次数的条件概率，在此基础上获得了准确的时延解析式。由于考虑了数据帧的重传次数受限，这样更加贴近实际工程，为解决同类问题提供了既有理论价值又有工程意义的随机模型。

3、在无线时变信道中利用自适应帧长技术建立了基于 SW-ARQ 的自适应系统。在信道噪声较低时发送的数据帧较长，信道噪声较高是发送的数据帧较短，信道噪声很高时发送的数据帧最短。同样考虑了重传次数受限的实际情况，并建立了能够评价系统时延性能的 Markov 模型。最后在 Matlab 环境下对系统时延性能进行了仿真分析，结果表明系统性能较好，能够提供较小的系统时延，有效的提高网络性能。

对 ARQ 关键技术的研究具有重要的理论价值和实际意义，有关 ARQ 技术的研究和应用的内容还有很多，本文只是解决了其中一小部分问题。随着 ARQ 技术的不断发展，其未来的研究空间还很大。鉴于目前所研究的内容，今后将从以下

几方面对本课题作更加深入的研究：

1、SR-ARQ 虽然由于发送端和接收端需要较大的缓存器而导致设备复杂但其传输效率高于 GBN-ARQ 和 SW-ARQ，可以用文中所建立的自适应模型来研究 SR-ARQ。

2、文中研究自适应 GBN-ARQ 系统时认为缓存器是无限的，可以在缓存器有限的情况下进一步研究 GBN-ARQ 和 SR-ARQ 系统的时延性能。

3、可以对文中建立的自适应 ARQ 系统的传输状态参数 α 、 β 、 γ 、 δ 和 n 进行最优化研究，从而使系统的传输效率达到最佳。

4、文中的研究只是针对单向传输信道进行的，对多路并行信道情况下 ARQ 系统的研究还很少，有待于进一步深入的研究。

5、下一代无线通信中，采用了多种关键技术，如 OFDM、MIMO、高阶调制等，如何将其与 ARQ 结合起来，实现数据的高效传输，以适应下一代通信的需求，已成为一个重要的研究课题。

参考文献

- [1] 李建东. 信息网络理论基础. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001, 1-25
- [2] 谢希仁. 计算机网络. 第四版. 北京: 电子工业出版社, 2003, 75-83
- [3] 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. 南京: 东南大学], 2004: 6-16
- [4] 鲁艳萍. 无线通信中的高效混合 ARQ 研究: [北京邮电大学博士学位论文. 北京: 北京邮电大学], 2005: 1-7
- [5] 钱敏平 龚光鲁. 随机过程论 (第二版). 北京: 北京大学出版社, 2000, 13-45
- [6] Andrea Goldsmith. Wireless Communications. 杨鸿文, 李卫东, 郭文彬等. 北京: 人民邮电出版社, 2007, 8-20
- [7] 唐应辉, 唐小我. 排队论——基础与分析技术. 北京: 科学出版社, 2006: 137-142
- [8] 李涛. 高速无线网络通信中的 ARQ 方案综述. 成都信息工程学院学报, 2005, 20(5): 582-586
- [9] Evagelos G. Varthi, Dimitrios I. Fotiadis. A comparison of stop-and-wait and go-back-N ARQ schemes for IEEE802.11e wireless infrared networks, Computer Communications, 29(2006): 1015-1025
- [10] Yu-Dong Yao. An Effective Go-Back-N ARQ Scheme for Variable-Error-Rate Channels. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43(1): 20-23
- [11] Haling Minna, Mao Zeng, Annamalai Jr, et al. An Efficient ARQ Protocol for Adaptive Error Control over Time-Varying Channels. Wireless Personal Communications, 2001, 17: 3-20
- [12] Ranko Vojinovic, Zoran Petrocic. A Novel Three-State ARQ Scheme for Variable Error-Rate Channels. Int. J. Electron. Commun. (AEU), 2002, 56(6): 389-395
- [13] Ranko Vojinovi'c, Grozdan Petrovi'c, Zoran Petrovi'c. The analysis of the adaptive three-mode ARQ GBN scheme using retransmission cycles mechanism. Int. J. Electron. Commun. (AEU) 2006, 60:190-198
- [14] Isabella Cerutti, Andrea Fumagalli, Puja Gupta. Delay Models of Single-Source Single-Relay Cooperative ARQ Protocols in Slotted Radio Networks With Poisson Frame Arrivals. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(2):371-382
- [15] LI Suoping, Liu Cunming. Delay Performance Analyses for GBN-ARQ and SR-ARQ Protocols, The 3rd international conference on wireless communications, networking and mobile computing, IEEE Communications Society, 2007,

1788-1791

- [16] 刘存明, 黎锁平. 基于噪声信道的三种单模式 GBN-ARQ 系统时延性能分析与比较. 兰州理工大学学报, 2008, 34(3): 95-99
- [17] 程娟, 周宗仪, 吴伟民. 基于 MR-ARQ 协议的多业务 QoS 保证机制研究. 信息传输与接入技术, 2006, 32 (2): 32-35
- [18] 王绪国, 杨杰. 多重抑制自动重传请求协议的实现与仿真. 计算机应用, 2006, 26 (3): 534-536
- [19] 张守云, 刘应状. 衰落信道下部分窗口多拒绝选择重传协议下的性能分析. 计算机与数字工程, 2006, 34 (11): 21-23
- [20] 黎锁平, 刘存明, 何志鹏. 无线数据传输的 GBN-ARQ 和 SR-ARQ 系统时延性能研究. 信号处理, 2008, 25 (3): 384-388
- [21] 朱光喜, 徐宁. 无线信道 ARQ 算法的一点改进. 计算机与数字工程, 2006, 34 (1): 31-34
- [22] 解元, 朱光喜, 周楠. 针对混合应用业务的 ARQ 改进方案. 工程实践及应用技术, 2006, 32 (5): 51-55
- [23] 刘芳, 孔健, 王文博等. 通过链路层 ARQ 提高无线环境中的 TCP 吞吐量. 北京邮电大学学报, 2005, 28 (1): 10-14
- [24] 朱光喜, 周楠, 吴伟民等. 基于 ARQ 信息的 TCP 代理确认方法. 华中科技大学学报, 2006, 34 (11): 52-54
- [25] Jin Yanliang, Yang Yuhang. Modeling TCP performance with proxy and ARQ. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2006, 7 (2): 164-171
- [26] 程宇新, 项海格. 无线数据传输中的混合 ARQ. 电信科学, 2006, 20 (2): 42-47
- [27] 黎锁平, 刘存明. 基于噪声信道的 ARQ 系统时延及最小滑动窗口控制研究. 信息与控制, 2008, 37 (6): 697-702
- [28] Chadi Barakat, Alaeddine Al Fawal. Analysis of link-level hybrid FEC/ARQ-SR for wireless links and long-lived TCP traffic. Performance Evaluation 57(2004)453-476
- [29] 黄忠虎, 沈连丰, 李文峰等. 时变信道中自适应 VR-HARQ 研究. 电子学报, 34 (4): 690-694
- [30] 王亚峰, 杨鸿文, 杨大成. 采用 Turbo 码的 Type-III HARQ 性能分析. 通信学报, 2004, 25 (6): 126-130
- [31] 尹小玲, 邓永录等. 具有第二次多选择服务的 $M^{[X]}/G/1$ 排队系统. 应用数学与计算数学学报, 2003, 1(12): 41-53
- [32] 陈红, 范志平. 基于分组合并的多信道停等 ARQ 性能. 西南交通大学学报,

- 2007, 42 (5): 589-594
- [33] Chang Jinfu, Yang T. Multichannel ARQ protocols. *IEEE Trans. on commun.*, 1993, 41 (4): 592-598
- [34] Chakraborty S S, Liinajarja M, Ruttik K. Diversity and packet combining in Rayleigh fading channels. *IEEE Proc. Commun.*, 2005, 152 (3): 353-356
- [35] 郝丹丹, 肖峻峰, 邹仕洪. 瑞利衰落信道下改进的 AMC/SR-ARQ 跨层设计方案. *高技术通讯*, 2007, 17 (7): 686-692
- [36] Dzmitry Kliazovich, Fabrizio Granelli, Mario Gerla. Performance improvement in wireless networks using cross-layer ARQ. *Computer Networks*, 51 (2007): 4396-4411
- [37] Guangding Yu, Zhaoyang Zhang, Peiliang Qiu. Efficient ARQ protocols for exploiting cooperative relaying in wireless sensor networks. *Computer Communications*, 30 (2007): 2765-2773
- [38] Guangding Yu, Zhaoyang Zhang, Peiliang Qiu. Cooperative ARQ protocol for correlated wireless channel. *Journal of Electronics*, 2006, 23 (4): 594-597
- [39] Isabella Cerutti, Andrea Fumagalli, Puja Gupta. Cooperative ARQ Protocols in Slotted Radio Networks. Technical report, The University of Texas at Dallas, 2005. UTD/EE-12/2005: 1-29
- [40] Marco Tacca, Paolo Monti, Andrea Fumagalli. Cooperative and non-cooperative ARQ protocols for microwave recharged sensor nodes. Technical report, The University of Texas at Dallas, 2004. UTD/EE-02/2004: 1-20
- [41] Isabella Cerutti, Andrea Fumagalli, Puja Gupta. An Automatic Repeat Request Protocol for Cooperative Slotted Radio Networks. Technical report, The University of Texas at Dallas, 2004. UTD/EE-02/2004: 1-19
- [42] 顾昕钰. 链路自适应与混合 ARQ 技术的研究: [北京邮电大学博士学位论文. 北京: 北京邮电大学], 2005: 37-57
- [43] SumHur, Seung-JinRaik. The effect of different arrival rate on the N-policy of M/G/1 with server setup. *Applied mathematical modeling*. 1999, 23: 289-299
- [44] Soren Asmussen, Claudia Kluppelberg, Karl Sigman. Sampling at subexponential times with queuing applications. *Socialistic Process and Applications*. 1999, 19: 265-286

致 谢

在此论文完稿之际，三年的研究生生活即将结束。在三年的学习期间，得到了许多人的帮助，本文的完成和他们的无私帮助也是分不开的。我将永远铭记每一位给予我关心与帮助的师长、同学、家人和朋友，在此向他们致以最诚挚的谢意！

首先感谢我的导师黎锁平教授，我是在黎老师的指引下进入无线通信领域的学习和研究。在三年的研究生学习生活中，黎老师给予了我专业上的悉心指导和生活上的热情关怀。从我进入课题组开始，包括专业课的学习、研究方向的选择、研究重点的把握、论文的撰写等各个方面，都凝结着老师的辛苦、教诲和帮助。文中的许多想法和思路都得益于老师的启发，文章的措辞造句等细节都经过了老师的反复推敲和锤炼。黎老师一直坚持高标准严要求的学术风范，严谨的治学态度、渊博的专业知识、踏实认真的工作作风必将使我终生受益。所有这些，点点滴滴我将永远铭记！

最后，衷心的感谢我的家人。感谢他们二十多年来对我的培养与照顾，正是他们对我的关心和鼓励，给予了我克服困难的勇气和力量。同时感谢我的师弟师妹以及所有一直默默关心和帮助过我的好朋友们！

附录 A 攻读学位期间所发表的学术论文目录

- [1] 黎锁平, 卢世军. 基于自适应帧长技术重传次数受限的 SW-ARQ 系统时延性能(已被《兰州理工大学学报》录用)
- [2] 黎锁平, 卢世军. 基于信道噪声状况估计的自适应三模式多状态 ARQ 系统 Markov 建模分析(已投《电子与信息学报》)