

自适应调制混合 ARQ 系统中低时延冗余递增策略的研究

程宇新 项海格

(北京大学电子学系 北京 100871)

摘要 冗余递增混合 ARQ 能提供较高的数据通过率,但也带来了较大的传输时延。该文提出一种具备低时延冗余递增策略的混合 ARQ 系统并与自适应调制系统相结合,不但根据不同的接收信噪比,选取不同的调制方式,而且还选择不同的冗余递增策略。仿真和计算结果表明,与采用固定冗余递增策略的自适应调制混合 ARQ 系统相比,该系统在保证较高的数据通过率的前提下,大大降低了系统传输时延。

关键词 混合 ARQ, 冗余递增, 自适应调制, 通过率, 传输时延

中图分类号: TN919.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)09-1649-05

The Study of Low-Delay Incremental Redundancy Hybrid ARQ Schemes in Adaptive Modulation System

Cheng Yu-xin Xiang Hai-ge

(Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract The incremental redundancy hybrid ARQ scheme can provide high throughput efficiency. Meanwhile, it also leads to high transmission delay. This paper presents a Low-Delay Incremental Redundancy hybrid ARQ scheme with Adaptive Modulation (AM-LD-IR). It adopts different strategy of incremental redundancy and constellation size according to the received Signal-to-Noise Ratio (SNR). The calculation and simulation results in the paper show, comparing to the ordinary incremental redundancy hybrid ARQ systems with adaptive modulation, the AM-LD-IR system can provide a little higher throughput efficiency and can reduce much transmission delay.

Key words Hybrid Automatic Repeat reQuest(ARQ), Incremental redundancy, Adaptive modulation, Throughput, Delay

1 引言

在无线数据传输中,混合ARQ(Automatic Repeat reQuest)是一种能有效保证传输可靠性并提供较高数据通过率的差错控制方式,被广泛应用于各种无线通信系统中。冗余递增(IR: Incremental Redundancy)混合ARQ^[1](HARQ)是一种高效的ARQ方案,与简单的完全重传的ARQ系统相比,它可以提供更高的数据通过率,但同时也带来了较大的时延。时延增大会使ARQ系统的收发缓冲区增大,增加系统处理复杂度,同时也会使有关业务质量下降。如何在保证较高系统通过率的同时有效降低传输时延是混合ARQ系统研究的一个重要课题。

自适应调制(Adaptive Modulation, AM)^[2]是提高系统频带利用率的有效方式,它是根据收端的信噪比信息,选择一种最佳的调制方式,使系统频带利用率最高。当带宽一定时,提高频带利用率的实质也是提高信息传输的通过率,这与冗余递增混合ARQ是相同的。若将冗余递增的混合ARQ和自适应调制系统相结合^[2],就有可能获得更高的数据通过率和频带利用率。

文献[2-6]研究了 HARQ 与不同调制方式相结合的系统,

其基本思想是:在高信噪比区域,用高阶的调制方式;在低信噪比区域,降低调制阶数。其中文献[5,6]研究了 I 型 HARQ 与自适应编码调制相结合的系统,其中发端通过反馈信道获知收端的信道信息,并依据信道信息改变调制方式和编码速率。

本文将自适应调制系统和冗余递增混合 ARQ 相结合,并将前者的思想应用于冗余递增策略的优化当中,提出了一种应用低时延冗余递增策略的自适应调制混合 ARQ(Adaptive Modulation-Low Delay-Incremental Redundancy, AM-LD-IR)系统。它根据接收信噪比,在选取最佳调制方式的基础上,进而也选取最佳的冗余递增策略,使系统在尽量少的传输次数内完成数据传输,从而在保证较高的系统数据通过率的同时,大大缩短了系统的传输时延(本文的冗余递增策略是指冗余递增混合ARQ过程中,收端每次在新的冗余信息后,与前面收到的信息合并后所达到的码率,也就是系统在每次ARQ过程中所采用的编码速率集)。本文还采用了Turbo码作为纠错编码,以RCPT^[7](速率兼容的删余Turbo)码作为速率兼容码。

本文第2节对Turbo编码调制系统进行简单描述;第3节介绍冗余递增混合ARQ及其性能指标;第4节说明了冗余递增自适应调制混合ARQ(AM-IR)系统;第5节提出了低时延冗余递增策略的自适应调制混合ARQ(AM-LD-IR)系统

的设计方法;第 6 节给出通过计算机搜索得到的 AWGN 信道下 AM-LD-IR 系统方案,并对 AM-LD-IR 系统和 AM-IR 的性能进行了比较,讨论了信噪比估计误差对系统性能的影响,最后一节讨论了 AM-LD-IR 系统在慢衰落信道中的应用情况。

2 Turbo 编码调制系统模型

自适应调制系统涉及多种调制方式,这里采用 Goff 提出的 Turbo 编码调制方案^[8],它易于实现且在高斯和衰落信道中都有较好的性能。图 1 为 Turbo 编码调制系统示意图,在收端,对信息数据包 $\{I_i\}$ 先进行 Turbo 编码,通过删余得到所需的编码速率,然后进行信道交织,经串并转换后分成 m 个比特的分组 $\{s_{k,j}, j=1, \dots, m\}$,每一分组通过格雷映射得到信道传输符号 (A_k, B_k) ,经调制后在信道中传输。其中每信道符号包含 m 比特信息,调制星座大小为 2^m , A_k 和 B_k 分别对应同相和正交分量。

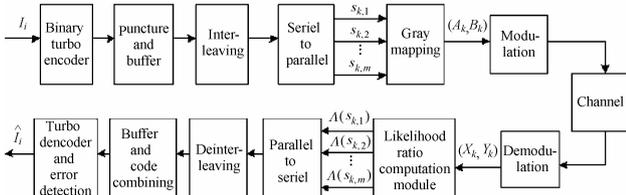


图 1 Turbo 编码调制系统模型

Fig.1 Turbo coded-modulation system structure

在收端,假设理想相干解调,接收符号为 (X_k, Y_k) ,可以 X_k 和 Y_k 分别计算出构成本符号的 m 个比特的似然比 $\{A(s_{k,j}), j=1, \dots, m\}$,经并串转换和解交织后送 Turbo 译码器, Turbo 译码器根据当前删余情况对删去的比特用 ‘0’ 代替,然后进行 Turbo 译码。其中

$$\begin{cases} X_k = \rho_k A_k + U_k \\ Y_k = \varphi_k B_k + V_k \end{cases} \quad (1)$$

ρ_k 和 φ_k 为衰落因子, U_k 和 V_k 分别为零均值高斯随机变量。似然比 $A(s_{k,j})$ 为

$$A(s_{k,i}) = \frac{P\{s_{k,i} = 1 | X_k, Y_k\}}{P\{s_{k,i} = 0 | X_k, Y_k\}}, \quad i=1, \dots, m \quad (2)$$

对于二进制的 Turbo 编码调制系统,则省去格雷映射过程,直接将编码比特 ‘1’ 和 ‘0’ 映射为 ‘+1’ 和 ‘-1’ 即可,同时在收端也不进行比特似然比的计算,直接将接收到的信道软信息送入 Turbo 解码器译码。在 ARQ 系统中,收端还要进行检错处理,如果译码失败则请求重传,同时存储似然当前比较信息,在下次解码中与新接收到的信息合并后再进行 Turbo 译码。

3 冗余递增混合 ARQ 及其性能指标

这里的冗余递增混合 ARQ 基于 RCPT 码, RCPT 码的构成和删余方式参见文献[7]。为限制传输时延,在应用中通常会限定 RCPT-ARQ 系统的最大传输次数。设最大发送次数为 n , 系统所采用的一组编码速率为 $r_i, i=1, \dots, n$, 它们对应删

余矩阵分别为 $p_i, i=1, \dots, n$, 每次发送后收端得到的 RCPT 编码速率为 r_i 。这里假定选择性重传,反馈信道无差错传输,检错码理想检错,发送和接收缓冲区不受限制。RCPT-ARQ 的工作过程为

(1) 新输入的信息数据包加入检错码后按 RCPT 码的母码速率进行编码,并将编码输出比特存入发送缓冲区;

(2) 对母码进行删余,按编码速率 r_i 发送信息比特和校验比特;

(3) 收端先将接收码字存入接收缓冲区,然后进行 Turbo 译码,对译出码字进行检错,若无错,收端通过反向信道向送端发送 ACK 应答,发送和接收缓冲区被清空,回步骤(1);若有错,收端存储本次的接收比特,发送 NAK 应答,发端进入重传过程;

(4) 在第 1 次重传中,发端发送删余矩阵 $p_2 - p_1$ 对应的比特,使收端在合并后编码速率达到 r_2 ;在第 $i-1$ 次重传中,发端发送删余矩阵 $p_i - p_{i-1}$ 对应的比特,使收端在合并后编码速率达到 r_i ;

(5) 收端在每次接收到重传比特后,将本次收到的比特和缓冲区中预先存储的比特进行合并译码,检错,直到译码成功或达到最大发送次数 n ;

(6) 当系统传输达到最大重传次数时,接收到的数据包仍然有错,则丢弃本数据包,重新开始新的数据包发送。

衡量混合 ARQ 系统的性能指标主要有:平均通过率 η (又称吞吐量)和平均时延 T_{av} ,有时也要用到总误帧率 P_F 。平均通过率体现了系统的能量利用率,若系统信噪比相同,在发送总能量一定的情况下,则通过率越高,系统成功传送的有用信息越多。若在一次 ARQ 过程中收端的信噪比和调制方式保持不变,且各次传输相互独立,则系统平均通过率 η 为

$$\eta(\mathcal{R}_n, b_m) = b_m \sum_{i=1}^n r_i \left\{ [1 - P_w(r_i, b_m)] \left[\prod_{j=1}^{i-1} P_w(r_j, b_m) \right] \right\} \quad (3)$$

其中 b_m 为在第 m 种调制方式下,每信道符号的比特数; $P_w(r_i, b_m)$ 为第 m 种调制方式下,速率为 r_i 时的误帧率; $\mathcal{R}_n: (r_1, r_2, \dots, r_n)$ 为系统采用的编码速率集; r_i 为各次接收合并后 RCPT 码的编码速率,可见在相同信噪比下,系统应用的编码速率集和调制方式不同,平均通过率则不同。

设系统循环时间为 τ , 系统平均时延为各种可能传输次数的概率平均(认为首次传输时延为 $\tau/2$):

$$\begin{aligned} T_{av}(\mathcal{R}_n, b_m) = & \tau/2 + \sum_{i=2}^{n-1} i\tau \left\{ [1 - P_w(r_i, b_m)] \cdot \prod_{j=1}^{i-1} P_w(r_j, b_m) \right\} \\ & + n\tau \prod_{j=1}^n P_w(r_j, b_m) \end{aligned} \quad (4)$$

另外系统误帧率 P_F 也是一个重要指标:

$$P_F(\mathcal{R}_n, b_m) \approx \sum_{i=1}^n P_w(r_i, b_m) < P_w(r_n, b_m) \quad (5)$$

计算上述性能指标,必须已知 $P_w(r_i, b_m)$, 它可以通过理

论分析或仿真得到。由式(3)一式(5)可以看出, $P_w(r_i, b_m)$ 较大时(如 $1 \sim 10^2$)对性能指标的计算起到了决定作用, 通常理论分析在这个区域很不准确, 因此本文中涉及到的在各个调制方式各种编码速率下的误帧率是由仿真得到的。本文所采用的 RCPT 码分量为速率 1/2 的系统递归卷积码, 生成多项式 $(1, 23/35)_{\text{oct}}$, RCPT 码母码速率为 1/3, 交织长度为 1024, 交织器类型为 s 交织器, 删余周期 $t=8$, 总的编码速率数为 $L=16$, 删余模式见文献[7]。

4 自适应调制混合 ARQ 系统(AM-IR)

编码速率集 \mathcal{R}_n 一定, 根据收端信噪比改变系统调制方式为冗余递增自适应调制混合 ARQ(AM-IR)系统, 与低时延冗余递增策略相对比, 将其称作固定冗余递增策略的自适应调制混合 ARQ 系统。系统选择调制方式的原则为, 使平均通过率最大:

$$b_m = \arg \max_{b_m \in B} (\eta(\mathcal{R}_n, b_m)) \quad (6)$$

其中 m 为所选择的调制方式, b_m 为在第 m 种调制方式中每信道符号所含的二进制比特数, B 为所有可能调制方式的集合。本文中考虑 4 种调制方式: BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM。

图 2 为 AWGN 信道下固定冗余递增策略(即固定编码速率集为 $\{4/5, 2/3, 4/7, 1/2, 4/9, 2/5, 4/11, 1/3\}$)的自适应调制混合 ARQ 平均通过率曲线。图中虚线为 4 种调制方式下采用上述冗余递增策略时的平均通过率曲线, 每种调制方式都有自己的最佳工作区域, 即平均通过率最大的区域, 它们的包络即是自适应调制下的平均通过率曲线(图 2 中的实线)。可见, 自适应调制系统的平均通过率大于等于任一单一调制方式下的平均通过率。

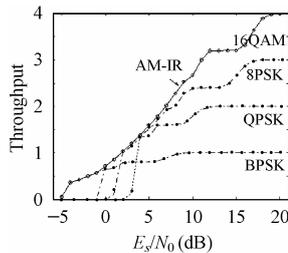


图 2 自适应调制冗余递增 ARQ 系统的平均通过率

Fig. 2 Throughput of AM-IR system

5 低时延冗余递增策略的自适应调制混合 ARQ 系统(AM-LD-IR)

冗余递增 ARQ 系统通过自动重传来接近当前信道条件下的最佳编码速率。当系统最低编码速率一定且各次传输相互独立时, 每次重传时增加的冗余信息越少(即系统编码速率的递增越精细), 系统最终的编码速率就越接近最佳编码速

率, 从而系统的平均通过率就越高。另一方面, 每次增加的冗余信息越少, 重传的次数就越多, 传输时延就越大。事实上, 对于不同的信道条件, 应该采用不同的冗余递增策略(即不同的编码速率集), 这样就可以用尽量少的重传次数来逼近最佳编码速率。在自适应调制系统中, 要根据当前信道条件选取最佳的调制方式, 因此自适应调制混合 ARQ 系统中, 同样可以根据信道条件选取系统的冗余递增策略。在 AM-LD-IR 系统中, 系统根据当前的接收信噪比, 预先确定本次 ARQ 过程中每次重传时的冗余递增策略, 也就是预先确定本次 ARQ 过程中, 各次传输后在收端所要达到的编码速率, 从而可以在保证平均通过率前提下, 大大减少了传输时延。

设 RCPT 码经过删余所有可能的编码速率为全集 \mathcal{R} , 系统最大传输次数为 n , AM-LD-IR 系统即是选择最佳的编码速率集 $\mathcal{R}_n = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 且 $\mathcal{R}_n \subset \mathcal{R}$ 和调制方式 $b_m (b_m \in B)$, 使系统平均通过率最大:

$$(\mathcal{R}_{\text{opt}}, b_m) = \arg \max_{b_m \in B; \mathcal{R}_n \subset \mathcal{R}; P_T < P_{\text{th}}} (\eta(\mathcal{R}_n, b_m)) \quad (7)$$

其中 b_m 为在调制方式 m 下每信道符号所表示的比特数, B 为所有可能调制方式的集合, P_{th} 为系统总误帧率的门限。设定总误帧率门限的目的是在选择编码速率集的同时, 保证系统的总误帧率在一个允许的数值内。根据式(7)采用计算机搜索的方法, 可以找到给定信噪比下的最佳编码速率子集 \mathcal{R}_n 和调制方式 m 。

6 计算和仿真结果

本文对比了如下 4 种系统: AM-LD-IR-3, 低时延冗余递增策略的自适应调制混合 ARQ 系统, 最大传输次数 $n=3$, 总误帧率 $P_{\text{th}} \leq 10^{-4}$; AM-LD-IR-2, 低时延冗余递增策略的自适应调制混合 ARQ 系统, 最大传输次数 $n=2$, $P_{\text{th}} \leq 10^{-4}$; AM-IR-5, 固定冗余递增策略的自适应调制混合 ARQ 系统, 最大传输次数 $n=5$, 编码速率集为 $\{1, 2/3, 1/2, 2/5, 1/3\}$; AM-IR-3, 固定冗余递增策略的自适应调制混合 ARQ 系统, 最大传输次数 $n=3$ 编码速率集为 $\{2/3, 1/2, 1/3\}$ 。

表 1 列出了 AM-LD-IR 系统, AWGN 信道下, 利用计算机搜索得到的在不同信噪比下的编码速率子集和调制方式。图 3(a)比较了 AWGN 信道下上述 4 种系统的平均通过率性能, 图 3 中实线是先根据仿真得到误帧率, 再通过式(3)计算得到的; 图 3 中的两条虚线分别是对 AM-LD-IR-3 和 AM-IR-5 两系统进行仿真得到的通过率曲线; 从图 3 中可看出, 它们和对应的计算得到的曲线基本重合, 说明利用仿真得到的误帧率再利用式(3)计算平均通过率是较准确的。图 3(b)是 4 种系统的平均时延曲线。

表 1 AM-LD-IR 系统在不同信噪比下编码速率子集和调制方式
Tab.1 Coding rate sets and modulation levels of the AM-LD-IR system

E_s/N_0 (dB)	AM-LD-IR-3		AM-LD-IR-2		E_s/N_0 (dB)	AM-LD-IR-3		AM-LD-IR-2	
	编码速率	调制	编码速率	调制		编码速率	调制	编码速率	调制
-4	8/21 8/23 1/3	BPSK	注 ¹⁾	BPSK	8	8/13 4/7 1/2	16QAM	4/7 8/17	16QAM
-3	4/9 8/19 4/11		2/5 8/21		9	2/3 8/13 7/4		8/13 4/7	
-2	8/15 1/2 4/11		1/2 4/11		10	8/11 2/3 8/13		8/11 8/15	
-1	8/13 4/7 8/17		4/7 4/9		11	4/5 8/11 2/3		4/5 8/13	
0	4/11 8/23 1/3	QPSK	8/23 1/3	QPSK	12	8/9 4/5 8/11		4/5 8/11	
1	4/9 8/19 2/5		8/19 2/5		13	8/9 4/5 8/11		8/9 8/11	
2	8/15 1/2 8/17		1/2 8/17		14	1 8/9 4/5		8/9 4/5	
3	8/19 2/5 4/11	8PSK	4/7 8/15	8PSK	15	1 8/9 4/5		8/9 4/5	
4	8/17 4/9 8/19		2/3 8/13		16	1 8/9 4/5		1 8/9	
5	8/19 8/21 4/11	16QAM	8/21 4/11	16QAM	17	1 8/9 4/5		1 8/9	
6	8/17 4/9 2/5		4/9 8/21		18	1 8/9 4/5		1 8/9	
7	8/15 1/2 8/17		1/2 8/17		19	1 8/9 4/5		1 8/9	

注¹⁾: 由于信噪比很低, 未能搜索到符合条件的编码速率子集。

从图 3 可以看出, 在中低信噪比区域, AM-LD-IR 系统在平均通过率方面有一定的优势, 而 AM-LD-IR-3 系统的平均通过率要略高于 AM-LD-IR-2 系统; 在平均时延方面, AM-LD-IR-3 系统明显低于 AM-IR-5 系统, 除个别信噪比外也低于 AM-IR-3 系统, 而 AM-LD-IR-2 的平均时延最小。在高信噪比区, 各种系统都采用的高阶的调制方式, 从而使平均通过率的差别变大, 从图 3(a)可以看出, AM-LD-IR 系统在平均通过率方面优于 AM-IR 系统; 在平均时延方面, 两种 AM-LD-IR 系统和 AM-IR-5 系统较接近, 但比 AM-IR-3 系统略高, 这是由于 AM-IR-3 系统采用了较低的编码速率, 因此平均时延较小, 由于 AM-LD-IR 系统通常将系统最大重传次数限制在较小的次数上, 所以系统的平均时延被限制在一个较合理的水平上。在图 3(b)中 AM-IR 系统的平均时延产生较大波动, 正是由于采用固定递增策略, 在不同信噪比点上, 其性能差异较大; 而 AM-LD-IR 系统的平均时延也有波动, 是由于公式(3)是按照平均通过率进行优化的, 所以在时延方面也会带来波动, 但其最大传输次数 n 较小, 所以波动也较小。

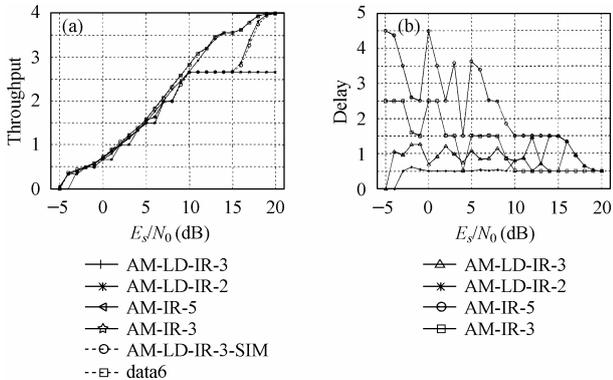


图 3 AM-LD-IR 系统和 AM-IR 系统的平均通过率和平均时延
Fig.3 The throughput and delay of AM-LD-IR and AM-IR systems
(a)Throughput (b) Delay

AM-LD-IR 系统需要对当前的信噪比进行准确的估计, 才能保证一个较高的平均通过率, 图 4(a)和图 4(b)分别表示信噪比估计产生误差对 AM-LD-IR-3 和 AM-LD-IR-2 系统平均通过率的影响。其中, 曲线 A 表示没有误差时的平均通过率, 曲线 B 表示当信噪比估计高 1dB 时的平均通过率, 曲线 C 是信噪比估计低 1dB 时的情况。从图中可以看出, 当信噪比被过高估计, 系统平均通过率会受到较大影响; 而信噪比被过低估计时, 系统平均通过率收到的影响则相对较小。同时还可以发现, 当信噪比估计产生误差时, AM-LD-IR-3 系统的平均通过率受到的影响比 AM-LD-IR-2 系统小一些。

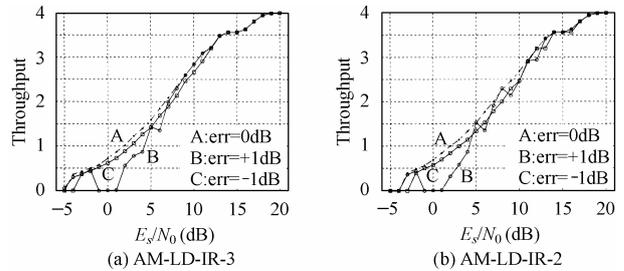


图 4 信噪比估计误差对 AM-LD-IR 系统平均通过率的影响
Fig. 4 The influence of throughput by SNR estimation error in AM-LD-IR system

总的来看, 与 AM-IR 系统相比, AM-LD-IR 系统可以在获得较高的平均通过率的同时, 提供更小的系统传输时延, 而且其传输时延也不会像前者那样随信噪比的改变而产生较大的波动。AM-LD-IR-2 系统比 AM-LD-IR-3 系统有更低的传输时延, 但它对信噪比估计误差会更敏感一些。

7 AM-LD-IR 系统在慢衰落信道下的应用

这里考虑慢衰落的情况, 衰落因子在每帧的传输时间内保持不变, 可以将 AWGN 信道下的 AM-LD-IR 系统应用于衰落信道, AM-LD-IR 系统根据每次 ARQ 起始时的信噪比选择冗余递增策略和调制方式, 如在表 1 中 AM-LD-IR-3 系

统, 信噪比 $E_s/N_0 = \rho_i$ 时对应的速率集为 $\mathcal{R}_n^{(i)}$, 调制方式为 m , 则在衰落信道中, 当每次 ARQ 起始时的 E_s/N_0 在信噪比子区间 $[\rho_i - \alpha(\rho_{i-1} + \rho_i), \rho_i + (1 - \alpha)(\rho_i + \rho_{i+1})]$ 时, 采用速率集 $\mathcal{R}_n^{(i)}$ 和调制方式 m , 其中 α 为调整因子, 由于信噪比估计误差的符号对 AM-LD-IR 系统性能产生的差别较大(见图 4), 因此上述区间将是非对称的, 这里取 $\alpha = 0.2$ 。在衰落信道中平均通过率 $\bar{\eta}$ 为各次 ARQ 过程得到的通过率的平均值, 即 $\bar{\eta} = E\{\eta_i(\mathcal{R}_n, b_m)\}$ 。

图 5(a)和 5(b)分别是瑞利信道下, AM-LD-IR-3 和 AM-IR-5 系统平均通过率和平均时延的仿真结果。仿真中瑞利衰落因子采用 Jakes 模型产生, 最大多普勒频移 $f_m = 5.56\text{Hz}$ (相当于载波为 2GHz, 移动速度为 3km/h 时的情况), 环回时间 $\tau = 2\text{ms}$ 。

由图 5(a)看出, 除个别点外, AM-LD-IR-3 系统的平均通过率都略高于 AM-IR-5 系统; 而图 5(b)表明 AM-LD-IR-3 系统的平均时延明显小于 AM-IR-5 系统, 而且随着平均信噪比的减少, 这种差距会更明显。这说明, 在慢衰落信道中, AM-LD-IR 系统同样可以在保证高通过率的同时, 大大减少系统传输时延。

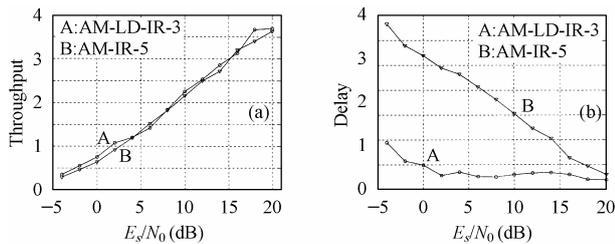


图5 瑞利信道下 AM-LD-IR 系统和 AM-IR 系统的通过率和时延比较
(a) 平均通过率 (b) 平均时延

Fig. 5 The throughput and delay of AM-LD-IR and AM-IR systems in slow Rayleigh fading channels
(a) Throughput (b) Delay

8 结束语

冗余递增混合 ARQ 是一种有效的差错控制方式。它在保证数据传输可靠性的同时, 提供较高的数据通过率, 但它往往带来较大的传输时延。自适应调制可以根据不同的信道条件选择最有效的调制方式, 从而获得更高的频带利用率。本文将自适应调制的思想应用于冗余递增混合 ARQ 当中, 提出了一种低时延冗余递增策略的自适应调制混合 ARQ(AM-LD-IR)系统。它根据不同的接收信噪比, 在选取最

佳调制方式的基础上, 还选择最佳的冗余递增策略(即编码速率子集)。仿真和计算结果表明, 与采用固定冗余递增策略的自适应调制混合 ARQ 系统相比, AM-LD-IR 系统可以提供更高的数据通过率, 同时大大降低了系统传输时延。

参考文献

- [1] Hagenauer J, Seshadri N, Sundberg C. Rate-compatible punctured convolutional codes (RCPC codes) and their applications. *IEEE Trans. on Communications*, 1988, 36(4): 389-400.
- [2] Falahati S, Svensson A. Hybrid type-II ARQ schemes with adaptive modulation systems for wireless channels. *IEEE Vehicular Technology Conference, Amsterdam, the Netherlands 1999(VTC 1999 - Fall)*: 2691-2695.
- [3] Najoh M, Sampei S, Morinaga N, Kamio Y. ARQ schemes with adaptive modulation/TDMA/TDD systems for wireless multimedia communication services. *IEEE International Symposium on PIMRC, Helsinki, Finland, 1997, Vol2*: 709-713.
- [4] Ghosh A, Jalloul L, Cudak M, Classon B. Performance of coded high order modulation and hybrid-ARQ for next generation cellular CDMA systems. *IEEE Vehicular Technology Conference, Boston, USA, 2000 (VTC Fall '00)*: 500-505.
- [5] Kingsley, Oteng-Amoako, Jinhong Yuan, Saeid Nooshabadi. Adaptation of turbo punctured codes for hybrid-ARQ. *IEEE Vehicular Technology Conference, Orlando, USA, 2003(VTC 2003-Fall)*:1853-1857.
- [6] Jungnam Yun, WunCheol Jeong, M Kavehrad. Throughput performance analysis for automatic-repeat-request techniques as combined with adaptive rate transmission. *IEEE Radio and Wireless Conference, Boston, USA, 2002*: 31-33.
- [7] Rowitch D N, Milstein L B. On the performance of hybrid FEC/ARQ systems using rate compatible punctured turbo (RCPT) codes. *IEEE Trans. on Communications*, 2000, 48 (6): 948-959.
- [8] Le Goff, Glavieux A, Berrou C. Turbo-codes and high spectral efficiency modulation. *IEEE Int. Conf. on Communications, New Orleans, USA, 1994*: 645-649.

程宇新: 男, 1974年生, 讲师, 主要研究方向为纠错编码和混合 ARQ 技术。

项海格: 男, 1941年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, 中国通信学会会士, 主要研究领域为数字通信理论和系统。