

## TDD 慢衰落系统中的预重传 GBN-ARQ 性能分析

何波<sup>①</sup> 李军<sup>②</sup> 林家儒<sup>①</sup> 吴伟陵<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(北京邮电大学信息工程学院 北京 100876)

<sup>②</sup>(山东轻工业学院电子信息与控制工程学院 济南 250100)

**摘要** 该文提出一种新的适于 TDD 时变慢衰落系统的预重传 GBN-ARQ 算法, 并与 Nakamura Osamu 提出的预重传方案分析比较。比较的结果认为: 吞吐率较低时该文提出的预重传方案改善明显, 吞吐率较高时 Nakamura Osamu 方案增益较大, 且该文算法对预测准确率的稳健性明显高于 Nakamura Osamu 预重传方案。仿真结果表明归一化吞吐率为 0.6 附近, 该文预重传方案吞吐率相对于普通 GBN 提高大约 4dB。

**关键词** 移动通信, 预测, GBN(退 N 步重传), ARQ

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)11-2086-04

## Adaptive Predicted Repeat GBN-ARQ Algorithm in TDD Slowly Fading Channel

He Bo<sup>①</sup> Li Jun<sup>②</sup> Lin Jia-ru<sup>①</sup> Wu Wei-ling<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Information Science and Engineering, Beijing University of Post and Telecommunications, Beijing 100876, China)

<sup>②</sup>(School of Electrical Information and Control Engineering, Shandong Institute of Light Industry, Jinan 250100, China)

**Abstract** This paper presents a pre-repeat GBN ARQ scheme, which suits for slowly fading TDD system. The normalized throughputs also analysed and compared between the proposed scheme and Nakamura Osamu's. It turns out that, depending on the normalized throughput, the optimum scheme is one of the two following alternatives: (1) in the higher throughput, Nakamura Osamu's scheme is better; (2) in the lower cases, the proposed scheme works better and is more robust to the error prediction. Simulation results verify that the scheme improves the throughput efficiency: the gain is about 4 dB when the normalized throughput is around 0.6.

**Key words** Mobile communication, Predicted, GBN, ARQ

### 1 引言

随着移动通信日益增长的需求, 未来频谱资源弥足珍贵, 因此未来的通信系统应尽可能提高频谱效率。采用 HARQ 技术可以获得较大吞吐率及较高可靠性的数据传输<sup>[1,2]</sup>。不幸的是: 移动通信系统环境中, 基站与移动终端之间的通信总是受到阴影衰落和多径衰落的影响, 使得传输质量随时间改变, 固定编码速率的 HARQ 难以适应时变的要求, 在信道质量较好的情况下, 过多的冗余将浪费信道容量, 反之在信道质量较差时, 将因为差错率过高需要反复重传而增大延时。因此预测信道的优劣, 并选择与之相适应的传送模式就显得至关重要。

ARQ 通信系统主要有 3 种基本工作方式: 发送等候 (Stop-and-Wait, SW) 方式、退 N 步 (Go-Back-N, GBN) 方式和选择性重传 (Selective-Repeat, SR) 方式。其中 SW 方式简单但吞吐率低; SR 方式虽然吞吐率较高, 但接收端不仅需要缓冲器, 还需要进行重排等复杂的操作, 而未来个人移动通信系统的趋势是终端的设计趋于简便, 省功耗, 待机时间长, 故不宜采用。GBN 方式相对来说复杂度不高且吞吐率较之

SW 方式要高得多, 尤其适用于个人移动通信系统。这类系统的共同特点是: 小的环路延时, 时分复用 (TDD) 慢衰落, 如 PHS, PCS, DECT 等, 因为其简便的终端结构及成本决定了不宜做复杂的信道预测。目前很少有利用这类系统本身 TDD 的特点做简单预测的研究。Nakamura Osamu<sup>[3]</sup> 提出了一种预重传方案, 在吞吐率为 0.9 时改善达到 4dB 左右。本文提出一种新的预重传算法, 并对两个预重传方案进行分析比较。

### 2 预重传方案

分析 GBN 吞吐率受到限制的主要原因就是一旦某一帧传送出现错误, 接收端检测到错误后反馈 NACK 信号给发送端, 就不再接收后续帧, 不管后续帧正确与否, 一直等待该帧的重新发送。从出错位置到该帧的正确接收位置之间的所有数据帧不管正确与否都被抛弃, 严重影响吞吐率, 尤其当信道条件恶劣, 重发几次后才正确接收, 这样势必造成资源的极大浪费, 吞吐率急剧降低。因此, 如果发送端能够预测到发送的数据帧可能因为信道条件恶劣而发送失败, 不需要等到接收端的反馈 NACK 到来, 立刻将该帧数据重新发送一遍, 那么将对于系统的吞吐率会有很大提高。

由于 TDD 系统上下行链路具有相关信道信息, 根据这

个信道信息来预测数据帧传送的正误。具体来说,上行链路的发送端利用下行链路中接收到的数据帧来预测信道状态,如果接收到的数据帧出错,就认为信道状态较差,发送出去的数据帧也极有可能出错,在接收到上行链路的接收端反馈的 NACK 信号之前将上行链路中经历的衰落与该出错帧历经衰落最接近的数据帧重传一次,这样当上行链路的接收端反馈信号 NACK 到来之前就已经将该帧预重传了一遍。这样相对于普通 GBN-ARQ 节省了时延,提高了吞吐率。这就是预重传的基本思想。见图 1, 帧 S4 发送之后,收到上行链路送来的数据帧 D4, D4 传送失败,此时即认为与上行链路刚送来的数据帧 D4 历经相关衰落的数据帧 S2 也可能传送失败,因此下一帧不再按顺序传送数据帧 S5,而改为预重传数据帧 S2。为方便以下分析均以下行链路作为正向信道,上行链路作为反馈信道。注意:本文提到的预重传方案的接收端协议均与普通的 GBN 协议相同,即无需缓存,顺序接收。

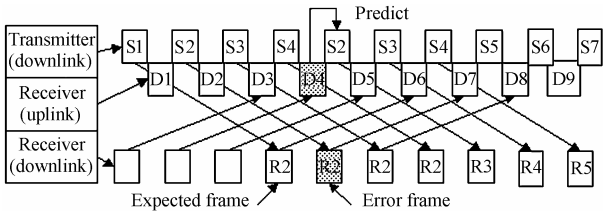


图 1 预重传 GBN-ARQ 方案  
Fig.1 Predict repeat retransmission GBN ARQ scheme

2.1 预重传方案 1

Nakamura Osamu<sup>[3]</sup>提出了一种预重传方案,见图 2,在这里我们简称为预重传方案 1。为了更清楚地看到预重传方案 1,把上行链路的传输省略了。在发送端设计一个滑动窗口,窗口长度为  $N$ ,滑动窗的内容是最近一个环路延时传送的数据帧。基本思想是:如果收到反馈信号 NACK,则对滑动窗口内同一帧数据传送次数进行累计,累计结果如果不超过 1 帧,即在刚过去的环路延时长度内该帧数据反馈信号均已到达,则重传该帧,否则按顺序传送下一帧。如果收到反馈信号 ACK,则判断有没有需要预重传的数据帧,否则按顺序传送下一帧。(即上行链路送来的数据帧是否发送失败,如果发送失败,看成有预重传,否则认为无需预重传)。

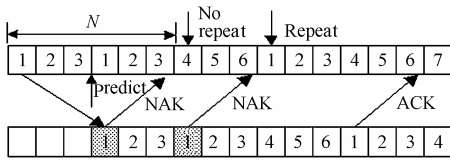


图 2 预重传 GBN-ARQ 方案 1  
Fig.2 Predict retransmission scheme 1

由图 2 可见,数据帧 3 第 1 次发送之后,上行链路传来的数据帧失败,改为预重传数据帧 1;数据帧 3 第 2 次发送之后,即收到数据帧 1 的 NAK 反馈,但是因为前一个  $N$  长窗口内有两个数据帧 1,亦即预重传的那一帧反馈信号没到,因此按顺序传送数据帧 4。

2.2 预重传方案 2

本文提出另外一种预重传的实现方案。在发送端设计一个滑动窗口,窗口长度为  $N$ ,滑动窗的内容是最近一个环路延时传送的数据帧。如果收到反馈信号 NACK,则对滑动窗口内同一帧数据传送次数进行累计,累计结果如果不超过 2 帧,即在刚过去的环路延时长度内该帧数据的发送不超过 2 次,则重传该帧,否则按顺序传送下一帧。如果收到反馈信号 ACK,则判断有没有需要预重传的数据帧,否则按顺序传送下一帧。(即上行链路送来的数据帧是否发送失败,如果发送失败,看成有预重传,否则认为无需预重传)。

第 1 次数据帧 3 发送之后,因为预测,重传数据帧 1;第 2 次数据帧 3 发送之后,收到数据帧 1 的反馈信号 NACK,此时对滑动窗口内数据帧 1 传送次数进行累计,累计结果为 2 帧,即在刚过去的环路延时长度内该帧数据的发送不超过 2 次,重传该帧,如图 3 所示。

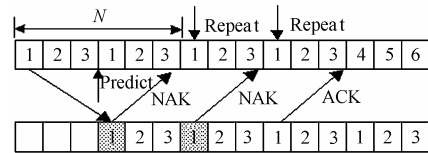


图 3 预重传 GBN-ARQ 方案 2  
Fig.3 Predict retransmission scheme 2

3 性能分析

假设可检测概率,不可检测错误概率和正确接收概率分别是:  $p_d, p_e, p_c$ , 本文假设反馈信号可以正确传送,  $p_e$  很小,可以忽略不计。为便于比较,给出普通 GBN 在随机错误信道的吞吐率公式<sup>[4]</sup>:

$$\eta_G = \frac{n-r-b}{n} \frac{1-p}{1+(N-1)p} \tag{1}$$

其中  $1-p_d = p_e + p_c$  文中用  $p$  代替  $p_d$ ,  $N$  环路延时长度。  $n$  表示数据帧长度,  $r$  是码组中的校验位数,  $b$  是应答信号所占的码元数,下文分析中符号与上式一致。

下面分析缓存预测的吞吐率性能。由于错误预测的存在,预测 GBN 方案吞吐率很难从理论上分析,本文仅分析一种特例:即假设预测完全准确。为便于分析,可以将传送分为两个阶段<sup>[3,4]</sup>,阶段 1 是无错传输阶段,阶段 2 从出错到恢复阶段:阶段 1 即 A 段有效传输数据帧数为  $M_A$ , 总共传输的数据帧为  $V_A$ , 阶段 2 即 B 段有效传输数据帧数为  $M_B$ , 总共传输数据帧  $V_B$ , 则吞吐率可以表示为<sup>[2]</sup>

$$\eta_p = \frac{n-r-b}{n} \frac{E[M_A] + E[M_B]}{E[V_A] + E[V_B]} \tag{2}$$

其中  $E[M_A] = E[V_A] = \sum_{i=0}^{\infty} i \cdot (1-p)^i p = 1-p/p$ ,  $E[M_B]$  和  $E[V_B]$  两种预重传方案各不相同,下面分别分析,为便于区别不妨把方案 1 的分别称为:  $E[M_{B1}]$  和  $E[V_{B1}]$ , 把方案 2 的分别称为:  $E[M_{B2}]$  和  $E[V_{B2}]$ 。

3.1 预重传方案 1 性能分析

下面分析  $E[M_{B1}]$  和  $E[V_{B1}]$ , 显然  $E[M_{B1}]=1$ 。图 4 分别表示需要一次、两次、三次重传才能正确接收数据帧:

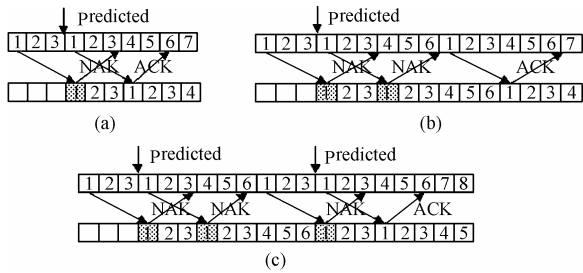


图 4 (a), (b), (c) 分别表示预重传方案 1 第 1, 第 2, 第 3 次重传之后正确接收

Fig.4 (a), (b), (c) respectively denote the correct receive after the first, second and third retransmission of predict retransmission scheme 1

从图 4 中可以看出, 奇数次重传数据帧的长度为  $(N + 3iN)/2 + 1$ ,  $2i + 1$  表示重传次数。偶数次重传的数据帧长度为  $(3iN)/2 + 1$ ,  $2i$  表示重传次数。得到下式:

$$E[V_{B1}] = \sum_{i=0}^{\infty} p^{2i} (1-p) \cdot [N + 3iN]/2 + \sum_{i=1}^{\infty} p^{2i-1} (1-p) \cdot [3iN]/2 + 1 = N(1+2p)/2(1-p^2) + 1 \quad (3)$$

$$\eta_{p1} = \frac{n-r-b}{n} \cdot \frac{1-p}{1+(N/2-1)p + Np^2/2(1+p)} \quad (4)$$

3.2 预重传方案 2 性能分析

下面分析  $E[M_{B2}]$  和  $E[V_{B2}]$ 。图 5 分别表示需要一次、两次、三次重传才能正确接收数据帧:

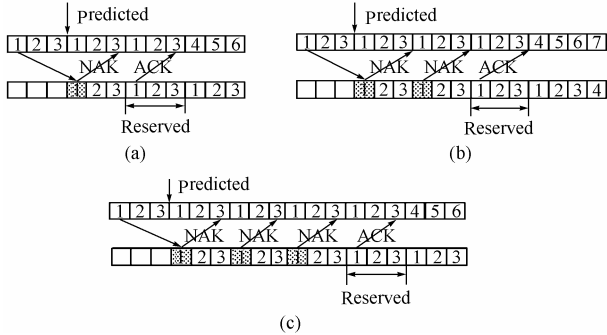


图 5 (a), (b), (c) 分别表示预重传方案 2 第 1, 第 2, 第 3 次重传之后正确接收

Fig.5 (a), (b), (c) respectively denote the correct receive after the first, second and third retransmission of predict retransmission scheme 2

从图 5 可以看出, 数据帧的长度为  $(N + iN)/2 + 1$ , 重传次数  $i$  次, 因此阶段 B 总共传送的数据帧:

$$E[V_{B2}] = \sum_{i=1}^{\infty} p^{i-1} (1-p) [N/2 + iN/2] + 1 = (1+1/(1-p))N/2 + 1 \quad (5)$$

阶段 B 有效传送的帧:

$$E[M_{B2}] = 1 + \sum_{i=1}^{N/2-2} i(1-p)^i p + \left(\frac{N}{2} - 1\right)(1-p)^{N/2-1} \quad (6)$$

$$\eta_{p2} \approx \frac{n-r-b}{n} \cdot \frac{1-p+p(1-p)E[M_{B2}]}{1+(N/2-1)p + Np(1-p)} \quad (7)$$

3.3 两种预重传方案比较

以上吞吐率的分析基于理想的预测和随机错误信道。把仿真结果和理论分析放在一起比较, 见图 6 仿真时采用典型的 TDD 慢衰落信道仿真参数, 见表 1。图 6 中为方便起见, 在理论分析结果前加上字母 a, 仿真结果前加上字母 s 区别。agbn: GBN 的理论分析吞吐率; apre1: 方案 1 的理论分析吞吐率; apre2: 方案 2 的理论分析吞吐率; spre1: 方案 1 的吞吐率仿真结果; spre2: 方案 2 的吞吐率仿真结果。从图 6 可以看出, 理论分析和仿真结果基本吻合, 在误码率较低时, 方案 1 吞吐率略高, 误码率较高时, 方案 2 性能优于方案 1。

表 1 仿真参数表

Tab.1 Simulation parameters

仿真软件	MATLAB
信道条件	瑞利衰落+高斯噪声
仿真帧数	10000 帧
调制方式	QAM
信道编码	BCH(511, 502, 1)

一般来说相同误码率时突发错误信道的吞吐率要高于随机错误信道, 这一点从图 7 可以看出。也就是说在仿真环境下, 如果能够理想预测, 吞吐率应高于随机错误下的理论分析结果, 换句话说就是存在错误预测的情况。

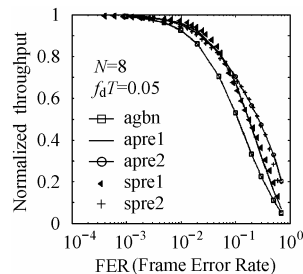


图 6 理论分析与仿真结果比较  
Fig.6 Comparison of simulation results and analytical performances

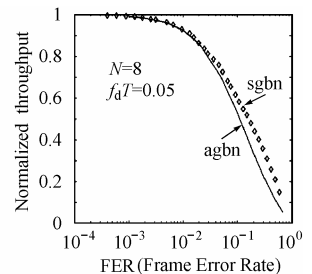


图 7 GBN 理论分析与仿真结果比较  
Fig.7 Comparison of GBN simulation results and analytical performances

错误预测有两种情况: 其一是下行链路传送出错, 但是上行链路对应帧正确, 这种情况直接退化为普通 GBN; 其二是下行链路传送本身没有错误, 但是上行链路对应帧出错。可以看出方案 2 中不论需要几次重传始终只用到一次预测, 而方案 1 则随着重传次数增加预测次数也增加, 因此方案 2 对预测的稳健性高于方案 1, 即对预测依赖性低。

4 性能仿真

我们对系统进行了仿真, 仿真参数如表 1。

在仿真图中, 环路延时长度  $N = 8$ , 从仿真性能图上可

以看出方案 1 和方案 2 性能均有改善,且方案 1 的改善主要集中在信噪比较高的情况下,而方案 2 的性能改善主要集中在信噪比相对低一点的位置,吞吐率在 0.75 左右是两种算法的分界线,当吞吐率高于 0.75 时,方案 1 改善更大,低于 0.75 时方案 2 改善相对明显,改善幅度大约 4dB,见图 8,低信噪比时方案 1 的吞吐率甚至略低于普通 GBN。

在相同的环路延时长度  $N=8$ , 归一化多普勒频移  $f_d T=0.05$  时性能改善比  $f_d T=0.1$  明显,多普勒频移加大,两种方案的改善均有减小趋势,相对来说方案 2 受影响的程度低于方案 1,如图 8,图 9。多普勒频移增大,预测准确率降低,这说明方案 2 对于错误预测的稳健性高于方案 1。

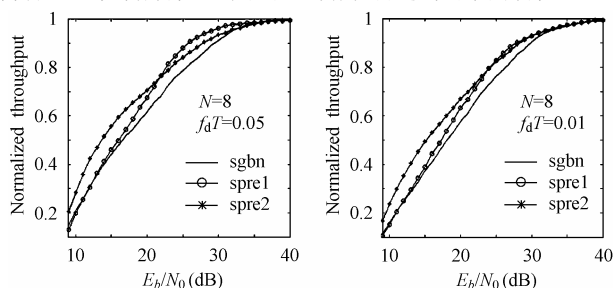


图 8 仿真性能比较 1  
Fig.8 Simulation results  
comparison 1

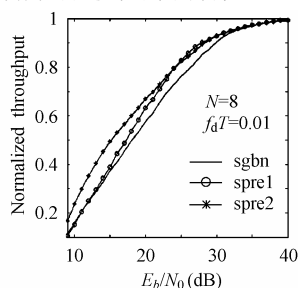


图 9 仿真性能比较 2  
Fig.9 Simulation results  
comparison 2

## 5 结束语

预重传方案利用 TDD 系统上下行链路历经相关衰落预测重传,方案简单且改善明显。预重传方案 1 在信噪比高,

归一化吞吐率为 0.9 左右的地方改善明显<sup>[3]</sup>,在环境较为嘈杂信噪比较低的情况下改善不明显,甚至在低信噪比时性能略低于普通 GBN,本文提出的方案即预重传方案 2 在吞吐率为 0.6 处增益最明显。改善达到 4dB;当预测准确率降低,两个方案均受影响,但相对来说方案 2 的稳健性高于方案 1。

## 参 考 文 献

- [1] 刑小刚,杨鸿文,郭文彬.一种适用于 OFDM 系统的新型混合 ARQ 方案.北京邮电大学学报,2003,26(1):95-98.
- [2] Yao Y D. An effective Go-Back-N scheme for variable-error-rate channels. *IEEE Trans. on Commun.*, 1995, 43(1): 20-23.
- [3] Nakamura O, Matsuki H, Takanashi H. Pre-repeat Go-Back-N ARQ with error prediction in fading channel. *GLOBECOM '96*. Vol.2, 1011-1014.
- [4] 王新梅 编著. 纠错码与差错控制. 北京, 人民邮电出版社, 1989, 第八章.

何 波: 女, 1976 年生, 博士生, 研究方向为 OFDM 系统、混合 ARQ 等.

李 军: 男, 1972 年生, 教师, 主要研究方向为 OFDM 系统、混合 ARQ 等.

林家儒: 男, 1958 年生, 教授, 博士生导师, 中国通信学会高级会员, 全国专业标准化技术委员会委员, 主要从事移动通信、信息处理、编码理论、通信系统、无线数据传输等领域的教学和研究工作.

吴伟陵: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为 CDMA 扩频技术、OFDM 多载波传输技术、MIMO 空时编码等.